



کاربرد یادگیری ماشین در سیستم‌های قدرت

نام مدیر پروژه : نیکی مسلمی

نام مجری: سید محسن مرجانمهر



کاربرد یادگیری ماشین در سیستم‌های قدرت

مدیر پروژه:

نیکی مسلمی

همکار/همکاران پروژه:

فرخنده جباری - محمد ستاره - محمدرضا شیبانی - حمیدرضا آراسته - عظیم سلیمی لاهیجی -
مهدی زراعتی

مجری:

سید محسن مرجانمهر

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-1026-PONPN09-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.323

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت کاربرد یادگیری ماشین در سیستم‌های قدرت/ مدیر پروژه: نیکی مسلمی. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۴۵۴ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. فرخنده جباری، محمد ستاره، محمدرضا شیبانی، حمیدرضا آراسته، عظیم سلیمی لاهیجی، مهدی زراعتی؛ همکاران پروژه. ۲. مرجانمهر، محسن، مجری.



انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب نیکی مسلمی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران:

۱. فرخنده جباری
۲. محمد ستاره
۳. محمدرضا شیبانی
۴. حمیدرضا آراسته
۵. عظیم سلیمی لاهیجی
۶. مهدی زراعتی

پیش‌گفتار

سرعت تغییرات محیطی و پیش‌رانی‌های علم و فن‌آوری در نظام تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری دنیا به عاملی انکارناپذیر تبدیل شده است. صنعت برق کشور هم از این قاعده مستثنی نیست. سابقه پژوهشگاه نیرو در انجام پروژه‌های مورد نیاز صنعت برق به خوبی نشان می‌دهد لازمه انجام پژوهش‌های کارآمد در این محیط پویا و درهم‌تنیده، داشتن بینش آینده‌نگرانه و درکی عمیق از چگونگی تغییر شرایط و تدوین و اجرای سیاست‌ها و اقدامات و تحلیل پیامدهای ناشی از این سیاست‌ها و اقدامات است. بدین منظور گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت پژوهشگاه نیرو با هدف آشنایی مسئولین صنعت برق کشور با کاربردهای فناوریانه تکنیک‌های یادگیری ماشین در مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت مدرن و شناسایی آینده‌های محتمل این فناوری، اقدام به اجرای پروژه تحقیقاتی تحت عنوان «کاربرد یادگیری ماشین در سیستم قدرت» نموده است.

- ❖ مرحله اول پروژه با عنوان «تعیین متدولوژی شناسایی کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت مدرن» فصل اول این گزارش را شامل می‌گردد، که در آن مبانی مطالعات آینده و آینده‌پژوهی توضیح داده شده است و روش‌های مختلف آن نام برده شده است. سپس بر اساس نتایج حاصل از جلسه با کارشناسان گروه پژوهشی آینده‌نگاری و سیاست‌پژوهی پژوهشگاه نیرو، روش‌های آینده‌پژوهی مناسب برای اجرای پروژه حاضر و همچنین ابزارهای کاربردی برای اجرای روش‌های انتخابی انتخاب شده و تشریح گردیده است.
- ❖ مرحله دوم پروژه با عنوان «شناسایی و تحلیل قابلیت‌های انواع تکنیک‌های یادگیری ماشین و ابزارهای مناسب برای پیاده‌سازی آن‌ها» در واقع فصل دوم تا هفتم این گزارش می‌باشد، که تاریخچه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین شرح داده شده، زبان‌های برنامه‌نویسی مناسب و چارچوب‌ها و کتابخانه‌های تهیه شده برای پیاده‌سازی انواع تکنیک‌های یادگیری ماشین مطرح شده‌اند. سپس مبانی انواع روش‌های یادگیری ماشین شامل روش‌های یادگیری با نظارت، یادگیری بدون نظارت و یادگیری تقویتی به تفکیک توضیح داده شده است. انواع تکنیک‌های پیاده‌سازی روش‌های یادگیری ماشین که در سه حوزه فوق قرار دارند بررسی شده است و مزایا و معایب هر کدام از آن‌ها عنوان شده است.
- ❖ مرحله سوم و چهارم پروژه با عنوان «بررسی کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه مطالعات سیستم‌های قدرت و استخراج موضوعات تحقیقاتی» در واقع فصل هشتم این گزارش می‌باشد، در این فصل به ترتیب با عناوین بررسی کاربرد فناوریانه تکنیک‌های مختلف یادگیری ماشین در محورهای تخصصی گروه پژوهشی مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت و استخراج مجموعه موضوعات تحقیقاتی مبتنی بر کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در راستای محورهای تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت ارائه شده است. بدین‌منظور، از تکنیک‌های متن‌کاوی و تحلیل اثر روند، به کمک پایگاه استاد علمی اسکوپوس و نمایه علم‌سنجی سایول برای تحلیل مطالعات در حوزه‌های ۱۲ محور تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت استفاده شده است. در ادامه بر اساس تحلیل‌های ذکر شده، اولویت‌های تحقیقاتی مشخص و در پایان ذی‌نفعان پروژه تعیین شده است.

این گزارش شامل هشت فصل می‌باشد:

در فصل اول تاریخچه روش‌های مطالعات آینده و مبانی آن بحث شده و روش‌های مختلف آن نام برده است. سپس متناسب با مشخصات پروژه تحقیقاتی حاضر، روش‌های مناسب آینده‌پژوهی با توجه ویژگی‌هایشان برای اجرای پروژه حاضر انتخاب گردیده است.

در فصل دوم، انواع فناوری‌های هوش مصنوعی توضیح داده می‌شود.

در فصل سوم به فناوری یادگیری ماشین که جزئی از هوش مصنوعی است پرداخته شده است. در این فصل، تاریخچه شکل‌گیری یادگیری ماشین، زبان‌های برنامه‌نویسی برای پیاده‌سازی صنعتی تکنیک‌های یادگیری ماشین و کتابخانه‌ها و چارچوب‌های آماده‌شده در این زبان‌های برنامه‌نویسی معرفی می‌شود.

در فصل چهارم، مبانی انواع تکنیک‌های یادگیری با نظارت که یکی از روش‌های یادگیری ماشین است شرح داده می‌شود.

در فصل پنجم، روش یادگیری بدون نظارت و تکنیک‌های پایه‌ای آن مطرح می‌شود.

در فصل ششم، دسته روش‌های یادگیری تقویتی که مبتنی بر فرآیند یادگیری بر اساس تجربیات به دست آمده در طول زمان است و با پیدایش عامل‌های مستقل مختلف در مدیریت و کنترل شبکه‌های برق از کاربرد و محبوبیت بسیار زیادی برخوردار شده‌اند توضیح داده می‌شود.

در فصل هفتم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل‌های دوم تا ششم ارائه شده است.

در فصل هشتم، به بررسی کاربردهای تکنیک‌های یادگیری ماشین در مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت پرداخته شده است.

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
XXVII	مقدمه.....
۱	فصل ۱- تعیین متدولوژی مطالعات آینده مناسب جهت شناسایی و بررسی کاربردهای یادگیری ماشین در مطالعات سیستم‌های قدرت.....
۲	۱-۱- مقدمه.....
۲	۲-۱- تعریف مطالعات آینده.....
۳	۳-۱- ضرورت مطالعات آینده.....
۳	۴-۱- تاریخچه مطالعات آینده.....
۵	۵-۱- روش‌های مطالعات آینده.....
۶	۱-۵-۱- دسته‌بندی روش‌های مطالعات آینده بر مبنای الگوی کلاسیک.....
۷	۲-۵-۱- دسته‌بندی روش‌های مطالعات آینده بر مبنای الگوی سازمان‌دهی آلتونن.....
۹	۱-۶-۱- نیازسنجی اجرای پروژه در زمینه استفاده از روش‌های آینده پژوهی.....
۱۰	۱-۶-۱- روش متن‌کاوی.....
۱۱	۱-۶-۱-۱ فرایند متن‌کاوی.....
۱۲	۲-۶-۱- روش تحلیل اثر روند.....
۱۳	۳-۶-۱- نحوه پیاده‌سازی مطالعات آینده در پروژه حاضر.....
۱۵	۷-۱- ابزار علم‌سنجی سای‌ول در اسکوپوس.....
۱۸	۸-۱- جمع‌بندی.....
۱۹	۹-۱- مراجع.....
۲۰	مقدمه.....
۲۱	فصل ۲- فناوری هوش مصنوعی.....
۲۲	۱-۲- مقدمه.....
۲۲	۲-۲- تاریخچه هوش مصنوعی.....
۲۳	۳-۲- تعریف و مفهوم هوش مصنوعی.....
۲۶	۴-۲- سیر تکاملی فناوری هوش مصنوعی.....
۲۹	۱-۴-۲- مفهوم نسل جدید هوش مصنوعی.....
۳۲	۵-۲- انواع فناوری‌های هوش مصنوعی.....
۳۲	۱-۵-۲- دسته‌بندی بر اساس نحوه کاربرد و دامنه مسائل قابل حل.....
۳۳	۲-۵-۲- دسته‌بندی بر اساس ویژگی‌ها و قابلیت‌های ذاتی.....
۳۳	۶-۲- نقشه دانش فناوری‌های هوش مصنوعی.....
۳۴	۱-۶-۲- دامنه مسائل هوش مصنوعی.....
۳۷	۲-۶-۲- الگوهای هوش مصنوعی.....
۳۸	۱-۲-۶-۲ طبقه‌بندی الگوریتم‌های/فناوری‌های شناخته شده هوش مصنوعی.....
۴۹	۷-۲- جایگاه ایران در نظام رتبه‌بندی SCImago در زمینه هوش مصنوعی.....

فصل ۳- یادگیری ماشین	۵۵
۱-۳- مقدمه	۵۶
۲-۳- تعریف یادگیری ماشین	۵۶
۳-۳- تکنیک‌های یادگیری ماشین	۵۷
۴-۳- سیر تکاملی یادگیری ماشین	۶۰
۵-۳- جریان کار معمول یادگیری ماشین	۶۱
۶-۳- زبان‌های مناسب برنامه‌نویسی تکنیک‌های یادگیری ماشین	۶۴
۱-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی پایتون	۶۵
۲-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی اسکالا	۶۵
۳-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی R	۶۵
۴-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی جولیا	۶۶
۵-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی C++	۶۶
۶-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی جاوا	۶۶
۷-۳- چارچوب‌ها و کتابخانه‌های پیشرفته برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین	۶۷
۱-۷-۳- چارچوب Apache Singa	۶۸
۲-۷-۳- چارچوب Apache Mahout	۶۹
۳-۷-۳- چارچوب caffe	۶۹
۴-۷-۳- چارچوب میکروسافت Microsoft Azure ML Studio	۷۰
۵-۷-۳- ابزار Distributed Machine Learning Toolkit (DMTK)	۷۱
۶-۷-۳- کتابخانه Google TensorFlow	۷۲
۷-۷-۳- چارچوب Microsoft Cognitive Network Toolkit	۷۳
۸-۷-۳- سکوی توزیع‌شده Veles	۷۴
۹-۷-۳- چارچوب Pytorch	۷۵
۱۰-۷-۳- چارچوب Apache MxNet	۷۵
۱۱-۷-۳- کتابخانه Apache Spark MLlib	۷۶
۱۲-۷-۳- کتابخانه Open Neural Networks Library (OpenNN)	۷۷
۱۳-۷-۳- کتابخانه Scikit Learn	۷۸
۱۴-۷-۳- کتابخانه mlpack2	۷۹
۱۵-۷-۳- کتابخانه Theano	۸۰
۱۶-۷-۳- سکوی Amazon machine learning	۸۰
۱۷-۷-۳- سکوی H2O.ai	۸۱
۱۸-۷-۳- سکوی Google AutoML Cloud	۸۲
۱۹-۷-۳- مقایسه چارچوب‌ها	۸۲
۸-۳- کاربردهای یادگیری ماشین	۸۵
فصل ۴- یادگیری با نظارت	۸۸

۸۹.....	۱-۴- مقدمه.....
۸۹.....	۲-۴- مبانی یادگیری بانظارت.....
۹۰.....	۳-۴- تکنیک کلاس‌بندی (طبقه‌بندی).....
۹۲.....	۱-۳-۴- الگوریتم K -نزدیک‌ترین همسایگی.....
۹۵.....	۱-۱-۳-۴- معرفی روابط انواع فاصله‌های مورد استفاده در الگوریتم K -نزدیک‌ترین همسایگی.....
۹۷.....	۲-۳-۴- درخت تصمیم.....
۹۸.....	۱-۲-۳-۴- الگوریتم ساختن درخت تصمیم‌گیری.....
۱۰۲.....	۲-۲-۳-۴- ویژگی‌های درخت رگرسیون و درخت دسته‌بندی.....
۱۰۲.....	۳-۳-۴- ماشین بردار پشتیبان.....
۱۰۵.....	۱-۳-۳-۴- ماشین بردار پشتیبان در حالت داده‌های جدایی‌پذیر.....
۱۰۹.....	۲-۳-۳-۴- ماشین بردار پشتیبان در حالت داده‌های جدایی‌ناپذیر.....
۱۱۲.....	۳-۳-۳-۴- ماشین بردار پشتیبان غیرخطی.....
۱۱۴.....	۴-۳-۳-۴- ماشین‌های بردار پشتیبان تفکیک‌کننده‌های چند کلاسه.....
۱۱۴.....	۵-۳-۳-۴- مزایا و معایب الگوریتم ماشین بردار پشتیبان.....
۱۱۵.....	۴-۳-۴- کلاس‌بند بیز.....
۱۱۷.....	۱-۴-۳-۴- ساخت کلاس‌بند براساس مدل احتمالاتی.....
۱۱۹.....	۱-۱-۱-۱- مزایا و معایب.....
۱۱۹.....	۵-۳-۴- تکنیک رگرسیون منطقی.....
۱۲۱.....	۱-۵-۳-۴- مزایا و معایب.....
۱۲۱.....	۴-۴- رگرسیون.....
۱۲۲.....	۱-۴-۴- رگرسیون خطی ساده.....
۱۲۳.....	۲-۴-۴- رگرسیون چندجمله‌ای.....
۱۲۴.....	۳-۴-۴- مزایا و معایب.....
۱۲۵.....	فصل ۵- یادگیری بدون نظارت.....
۱۲۶.....	۱-۵- مقدمه.....
۱۲۶.....	۲-۵- مبانی یادگیری بدون نظارت.....
۱۲۷.....	۳-۵- تکنیک خوشه‌بندی.....
۱۲۸.....	۱-۳-۵- خوشه‌بندی تفکیکی.....
۱۲۹.....	۲-۳-۵- خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی.....
۱۳۰.....	۳-۳-۵- خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی.....
۱۳۱.....	۴-۳-۵- خوشه‌بندی مبتنی بر مدل.....
۱۳۲.....	۵-۳-۵- معرفی الگوریتم‌های پر کاربرد خوشه‌بندی.....
۱۳۳.....	۱-۵-۳-۵- الگوریتم K -Means.....
۱۳۴.....	۲-۵-۳-۵- الگوریتم DBSCAN.....
۱۳۷.....	۳-۵-۳-۵- الگوریتم Mean-Shift.....

۱۳۹	BIRCH الگوریتم	۴-۵-۳-۵
۱۴۴	مدل آمیخته گاوسی با استفاده از بیشینه‌سازی انتظار	۵-۵-۳-۵
۱۴۹	تکنیک قوانین انجمنی (وابستگی)	۴-۵
۱۴۹	Apriori الگوریتم	۱-۴-۵
۱۵۲	FP-Growth الگوریتم	۲-۴-۵
۱۵۵	تکنیک کاهش ابعاد	۵-۵
۱۵۵	تجزیه مقادیر منفرد	۱-۵-۵
۱۵۷	تجزیه و تحلیل مولفه اساسی	۲-۵-۵
۱۶۰	فصل ۶- یادگیری تقویتی	
۱۶۱	مقدمه	۱-۶
۱۶۱	مبانی یادگیری تقویتی	۲-۶
۱۶۲	اجزای یادگیری تقویتی	۱-۲-۶
۱۶۴	ویژگی مارکوف در مسئله یادگیری تقویتی	۲-۲-۶
۱۶۵	توابع ارزش	۳-۲-۶
۱۶۷	توابع ارزش بهینه	۴-۲-۶
۱۶۹	روش‌های انتخاب عمل	۵-۲-۶
۱۷۱	رویکردهای یادگیری تقویتی	۶-۲-۶
۱۷۲	تکنیک برنامه‌نویسی پویا	۳-۶
۱۷۶	تکنیک مونت کارلو	۴-۶
۱۸۲	تکنیک یادگیری تفاضلی موقتی	۵-۶
۱۸۸	فصل ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	
۱۹۳	مراجع	۱-۷
فصل ۸- بررسی کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه مطالعات سیستم‌های قدرت و استخراج موضوعات تحقیقاتی		
۲۰۱		
۲۰۲	مقدمه	8-1-
۲۰۲	"راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت"	8-2- متن کاوی در حوزه
۲۰۲	"راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت"	۱-۲-۸ معرفي کليدواژه‌های محور پژوهشی
۲۲۲	"راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت"	۲-۲-۸ معرفي موضوعات پژوهشی محور پژوهشی
۲۲۳	"راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت"	8-3- متن کاوی در حوزه "برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت"
۲۲۳	"برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت"	۱-۳-۸ معرفي کليدواژه‌های محور پژوهشی
۲۳۸	"برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی سیستم‌های قدرت"	۲-۳-۸ معرفي موضوعات پژوهشی محور پژوهشی
۲۳۹	"بازار برق"	8-4- متن کاوی در حوزه
۲۳۹	"بازار برق"	۱-۴-۸ معرفي کليدواژه‌های محور پژوهشی
۲۴۴	بازار برق	8-4-2- نتایج حاصل از متن کاوی در حوزه محور پژوهشی

- ۸-۴-۳- کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "بازار برق" ۲۶۳
- ۸-۴-۴- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "بازار برق" ۲۶۴
- ۸-۵-۸- متن کاوی در حوزه "پایایی سیستم‌های قدرت" ۲۶۵
- ۸-۵-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "پایایی سیستم‌های قدرت" ۲۶۵
- ۸-۵-۲- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات پایایی" ۲۸۵
- ۸-۶-۸- متن کاوی در حوزه "مطالعات پایداری سیستم‌های قدرت" ۲۸۷
- ۸-۶-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "مطالعات پایداری سیستم‌های قدرت" ۲۸۷
- ۸-۶-۲- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات پایداری" ۳۰۸
- ۸-۷-۸- متن کاوی در حوزه "حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق" ۳۰۹
- ۸-۷-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق" ۳۰۹
- ۸-۷-۲- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق" ۳۳۲
- ۸-۸-۸- متن کاوی در حوزه "مطالعات ریزشبکه" ۳۳۴
- ۸-۸-۱-۸- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "مطالعات ریزشبکه" ۳۳۴
- ۸-۸-۲-۸- نتایج حاصل از متن کاوی در حوزه محور پژوهشی مطالعات ریزشبکه ۳۳۸
- ۸-۸-۳-۸- کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات ریزشبکه" ۳۶۱
- ۸-۸-۴-۸- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات ریزشبکه" ۳۶۲
- ۸-۹-۸- متن کاوی در حوزه "مطالعات کیفیت توان سیستم‌های قدرت" ۳۶۵
- ۸-۹-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "کیفیت توان سیستم‌های قدرت" ۳۶۵
- ۸-۹-۲-۸- نتایج حاصل از متن کاوی در حوزه محور پژوهشی مطالعات کیفیت توان ۳۷۰
- ۸-۹-۳-۸- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات کیفیت توان" ۳۹۲
- ۸-۱۰-۸- متن کاوی در حوزه "مدیریت پیک بار در سیستم‌های قدرت" ۳۹۳
- ۸-۱۰-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "مدیریت پیک بار در سیستم‌های قدرت" ۳۹۳
- ۸-۱۰-۲-۸- کاربردهای الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در محور "مدیریت پیک بار" و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با آن ۴۰۴
- ۸-۱۱-۸- متن کاوی در حوزه "مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت" ۴۰۶
- ۸-۱۱-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت" ۴۰۶
- ۸-۱۱-۲-۸- کاربردهای الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در محور "مدیریت دارایی سیستم‌های قدرت" و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با آن ۴۱۹
- ۸-۱۲-۸- پیشنهاد روند تحقیقات ۴۲۰
- ۸-۱۳-۸-۱-۳-۸- معرفی کنشگران مرتبط با پروژه ۴۲۱
- ۸-۱۳-۲-۸- معرفی نهادهای ذی‌نفع از پروژه ۴۲۳
- ۸-۱۴-۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۴۲۵
- ۸-۱۵-۸- مراجع ۴۲۶

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: مقوله‌های مطالعات آینده.....	۳
شکل ۱-۲: الگوی آلتون برای سازمان‌دهی روش‌های مطالعات آینده.....	۸
شکل ۱-۳: مراحل فرایند متن‌کاوی.....	۱۲
شکل ۱-۴: پارامترهای کلی تأثیر رویدادها.....	۱۳
شکل ۱-۵: صورت جلسه اعضای همکار در پروژه حاضر با کارشناسان آینده‌نگاری و سیاست‌پژوهی پژوهشگاه نیرو.....	۱۴
شکل ۲-۱: سیر تکامل فناوری هوش مصنوعی [۱].....	۲۸
شکل ۲-۲: بازی گو (وی چی).....	۲۹
شکل ۲-۳: شاخه‌های تحقیقات امروزه در زمینه نسل جدید هوش مصنوعی [۱].....	۳۰
شکل ۲-۴: محتویات اصلی نسل جدید هوش مصنوعی [۱].....	۳۱
شکل ۲-۵: نقشه دانش هوش مصنوعی [۱۰]، [۱۳].....	۳۵
شکل ۲-۶: رابطه میان یادگیری عمیق، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی [۱۷]، [۱۸].....	۴۱
شکل ۲-۷: یک نمونه شبکه عصبی مولد مخاصم [۲۱].....	۴۲
شکل ۲-۸: یک نوع از کاربرد بینایی کامپیوتر [۱۰]، [۲۲].....	۴۳
شکل ۲-۹: کاربرد بازشناسی تصویر [۱۰]، [۲۲].....	۴۴
شکل ۲-۱۰: یک نوع کاربرد بینایی ماشین.....	۴۴
شکل ۲-۱۱: فرآیند تکامل یک ربات انسان‌نما.....	۴۷
شکل ۲-۱۲: تعداد مقالات و رتبه ایران در جهان بر اساس نظام رتبه‌بندی سایمگو در حوزه دانش هوش مصنوعی در طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ میلادی.....	۵۲
شکل ۲-۱۳: مقدار شاخص <i>Hindex</i> در جهان بر اساس نظام رتبه‌بندی سایمگو در حوزه دانش هوش مصنوعی در طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ میلادی.....	۵۲
شکل ۲-۱۴: پنج کشور نخست منطقه خاورمیانه در حوزه دانش هوش مصنوعی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ در نظام رتبه‌بندی نظام سایمگو بر اساس شاخص <i>H index</i>	۵۴
شکل ۳-۱: انواع الگوریتم‌های یادگیری ماشین [۳۶]–[۴۲].....	۵۸
شکل ۳-۲: سیر تکاملی تکنیک‌های یادگیری ماشین. تکنیک‌های <i>DL</i> ، <i>DNN</i> و <i>SVM</i> [۱].....	۶۲
شکل ۳-۳: جریان کار معمول یادگیری ماشین [۴۷].....	۶۴
شکل ۳-۴: رابطه بین کتابخانه و چارچوب.....	۶۸
شکل ۳-۵: کاربردهای عمومی یادگیری ماشین.....	۸۵
شکل ۴-۱: ساختار یادگیری با نظارت [۷۴].....	۹۰
شکل ۴-۲: توزیع نمونه‌ها.....	۹۲
شکل ۴-۳: تعیین کلاس نمونه جدید.....	۹۳
شکل ۴-۴: طبقه‌بندی نمونه سبزرنگ با استفاده از الگوریتم <i>K</i> -نزدیک‌ترین همسایگی [۷۱]–[۷۳]، [۷۸].....	۹۴
شکل ۴-۵: جداسازی دو مجموعه داده توسط ماشین بردار پشتیبان با استفاده از یک خط (ابرفضا) [۸۶]–[۹۰].....	۱۰۳

- شکل ۴-۶: جداسازی داده‌ها توسط خطوط (ابرفصله‌های) مختلف [۸۶]–[۹۰]..... ۱۰۴
- شکل ۴-۷: خط (ابرفصله) مشکی بهترین جداکننده [۸۶]–[۹۰]..... ۱۰۴
- شکل ۴-۸: ابرفصله‌ای با حداکثر حاشیه برای یک ماشین بردار پشتیبانی که با نمونه داده‌های دو دسته تفکیک پذیر یادگرفته شده است [۸۶]–[۹۰]..... ۱۰۶
- شکل ۴-۹: نمایش بردارهای پشتیبان [۸۶]–[۹۰]..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۰: ماشین‌های بردار پشتیبان در حالت داده‌های جدایی ناپذیر [۸۶]–[۹۰]..... ۱۱۲
- شکل ۴-۱۱: تفکیک پذیر کردن داده‌ها با انتقال آن‌ها از فضای دوبعدی به فضایی سه بعدی [۸۶]–[۹۰]..... ۱۱۳
- شکل ۴-۱۲: تابع منطقی استاندارد [۹۶]–[۹۹]..... ۱۲۰
- شکل ۵-۱: ساختار الگوریتم یادگیری بدون نظارت [۷۴]..... ۱۲۷
- شکل ۵-۲: نمونه‌ای از خوشه‌بندی تفکیکی..... ۱۲۹
- شکل ۵-۳: شمای کلی خوشه‌بندی سلسله مراتبی [۱۱۵]–[۱۱۹]..... ۱۳۰
- شکل ۵-۴: نمونه‌ای از خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی..... ۱۳۱
- شکل ۵-۵: نمونه‌ای از خوشه‌بندی مبتنی بر مدل..... ۱۳۲
- شکل ۵-۶: روندنمای الگوریتم *K-Means* [۱۲۰], [۱۲۱]..... ۱۳۴
- شکل ۵-۷: مقایسه نتایج خوشه‌بندی تفکیکی با روش چگالی..... ۱۳۵
- شکل ۵-۸: روندنمای الگوریتم *BDSCAN* [۱۲۴], [۱۲۵]..... ۱۳۷
- شکل ۵-۹: روندنمای الگوریتم *Mean-Shift* [۱۲۶]–[۱۲۸]..... ۱۳۹
- شکل ۵-۱۰: نمونه‌های از *CF-Tree*..... ۱۴۲
- شکل ۵-۱۱: روندنمای الگوریتم *BIRCH* [۱۳۵]..... ۱۴۴
- شکل ۵-۱۲: یک توزیع آمیخته گاوسی تک بعدی نوعی [۱۳۶]..... ۱۴۵
- شکل ۵-۱۳: روندنمای الگوریتم *GMM* با استفاده از *EM* [۱۳۷]–[۱۴۲]..... ۱۴۸
- شکل ۵-۱۴: روندنمای الگوریتم *Apriori* [۱۴۴]–[۱۴۶]..... ۱۵۱
- شکل ۵-۱۵: نمونه‌های از جدول فرآیند، درخت *FP-tree* و جدول الگوهای شرطی پایه [۱۴۷]–[۱۵۱]..... ۱۵۳
- شکل ۵-۱۶: روندنمای الگوریتم *FP-Growth* [۱۵۲]–[۱۵۴]..... ۱۵۴
- شکل ۵-۱۷: روندنمای الگوریتم تجزیه مقادیر منفرد [۱۵۵], [۱۵۶], [۱۵۸]–[۱۶۱]..... ۱۵۷
- شکل ۵-۱۸: روندنمای الگوریتم تجزیه و تحلیل مولفه اساسی [۱۶۲]–[۱۶۷]..... ۱۵۹
- شکل ۶-۱: ساختار یادگیری تقویتی [۱۶۸]..... ۱۶۲
- شکل ۶-۲: اجزای مدل‌سازی یادگیری تقویتی [۱۶۸]–[۱۷۳]..... ۱۶۳
- شکل ۶-۳: دنباله عمل‌ها و پاداش‌های عامل [۱۶۸]–[۱۷۳]..... ۱۶۴
- شکل ۶-۴: رویکردهای مختلف یادگیری تقویتی..... ۱۷۱
- شکل ۶-۵: روش‌های مختلف پیاده‌سازی یادگیری تقویتی..... ۱۷۲
- شکل ۶-۶: روندنمای تکنیک برنامه‌نویسی پویا بر مبنای الگوریتم تکرار سیاست [۱۷۳]–[۱۷۵]..... ۱۷۴
- شکل ۶-۷: روندنمای تکنیک برنامه‌نویسی پویا بر مبنای الگوریتم تکرار ارزش [۱۷۳]–[۱۷۵]..... ۱۷۵
- شکل ۶-۸: روند تکرار سیاست تعمیم یافته [۱۷۳]–[۱۷۵]..... ۱۷۷
- شکل ۶-۹: روندنمای الگوریتم بر سیاست شبه‌نرم در تکنیک برنامه‌نویسی مونت کارلو [۱۷۳]–[۱۷۵]..... ۱۷۹
- شکل ۶-۱۰: روندنمای الگوریتم برون سیاست در تکنیک برنامه‌نویسی مونت کارلو [۱۷۳]–[۱۷۵]..... ۱۸۱

- شکل ۱۱-۶: روندنمای الگوریتم $TD(0)$ در تکنیک تفاضلی موقتی [۱۷۳]–[۱۷۵]..... ۱۸۳
- شکل ۱۲-۶: روندنمای الگوریتم $SARSA$ در تکنیک تفاضلی موقتی [۱۷۳]–[۱۷۵]..... ۱۸۵
- شکل ۱۳-۶: روندنمای الگوریتم Q در تکنیک تفاضلی موقتی [۱۷۳]–[۱۷۵]..... ۱۸۷
- شکل ۱-۸: عبارات کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۰۳
- شکل ۲-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته اول در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۰۸
- شکل ۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۱۰
- شکل ۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته دوم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۱۱
- شکل ۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۱۲
- شکل ۶-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته سوم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۱۳
- شکل ۷-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته سوم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۱۵
- شکل ۸-۸: پنجاه کلیدواژه مرتبط با دسته چهارم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۱۶
- شکل ۹-۸: تعداد مقالات به تفکیک سال در دسته چهارم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۱۸
- شکل ۱۰-۸: پنجاه کلیدواژه مرتبط با دسته پنجم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۱۹
- شکل ۱۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت..... ۲۲۱
- شکل ۱۲-۸: کلمات کلیدی تعدادی از مطالعات مربوط به محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری..... ۲۲۴
- شکل ۱۳-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته اول در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۲۸
- شکل ۱۴-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته اول در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۲۹
- شکل ۱۵-۸: کلیدواژه‌های اصلی دسته دوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۳۰
- شکل ۱۶-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته دوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۳۱
- شکل ۱۷-۸: کلیدواژه‌های اصلی دسته سوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۳۳
- شکل ۱۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته سوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۳۴
- شکل ۱۹-۸: کلیدواژه‌های اصلی دسته پنجم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۳۵
- شکل ۲۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته پنجم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۳۶
- شکل ۲۱-۸: کلیدواژه‌های اصلی دسته ششم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۳۷
- شکل ۲۲-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته ششم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت..... ۲۳۸
- شکل ۲۳-۸: عبارت کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با کلیدواژه بازار برق..... ۲۴۰
- شکل ۲۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول محور بازار برق..... ۲۴۵
- شکل ۲۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول محور بازار برق..... ۲۴۶
- شکل ۲۶-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم محور بازار برق..... ۲۴۷
- شکل ۲۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم محور بازار برق..... ۲۴۸
- شکل ۲۸-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته سوم محور بازار برق..... ۲۴۹

- شکل ۲۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم محور بازار برق..... ۲۵۰
- شکل ۳۰-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم محور بازار برق..... ۲۵۱
- شکل ۳۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم محور بازار برق..... ۲۵۲
- شکل ۳۲-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته پنجم محور بازار برق..... ۲۵۳
- شکل ۳۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم محور بازار برق..... ۲۵۵
- شکل ۳۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم محور بازار برق..... ۲۵۶
- شکل ۳۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم محور بازار برق..... ۲۵۷
- شکل ۳۶-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته هفتم محور بازار برق..... ۲۵۸
- شکل ۳۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم محور بازار برق..... ۲۵۹
- شکل ۳۸-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته هشتم محور بازار برق..... ۲۶۰
- شکل ۳۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هشتم محور بازار برق..... ۲۶۲
- شکل ۴۰-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته نهم محور بازار برق..... ۲۶۳
- شکل ۴۱-۸: کلمات کلیدی تعدادی از مطالعات مربوط به محور مطالعات پایایی..... ۲۶۶
- شکل ۴۲-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول محور مطالعات پایایی..... ۲۷۰
- شکل ۴۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول محور مطالعات پایایی..... ۲۷۱
- شکل ۴۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم محور مطالعات پایایی..... ۲۷۳
- شکل ۴۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم محور مطالعات پایایی..... ۲۷۴
- شکل ۴۶-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم محور مطالعات پایایی..... ۲۷۵
- شکل ۴۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم محور مطالعات پایایی..... ۲۷۶
- شکل ۴۸-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته چهارم محور مطالعات پایایی..... ۲۷۷
- شکل ۴۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم محور مطالعات پایایی..... ۲۷۷
- شکل ۵۰-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته پنجم محور مطالعات پایایی..... ۲۷۹
- شکل ۵۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۰
- شکل ۵۲-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۱
- شکل ۵۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۲
- شکل ۵۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هفتم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۴
- شکل ۵۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۵
- شکل ۵۶-۸: عبارت کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با کلیدواژه پایداری..... ۲۸۸
- شکل ۵۷-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول محور مطالعات پایداری..... ۲۹۳
- شکل ۵۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول محور مطالعات پایداری..... ۲۹۴
- شکل ۵۹-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم محور مطالعات پایداری..... ۲۹۵
- شکل ۶۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم محور مطالعات پایداری..... ۲۹۶
- شکل ۶۱-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته سوم محور مطالعات پایداری..... ۲۹۷
- شکل ۶۲-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم محور مطالعات پایداری..... ۲۹۸
- شکل ۶۳-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم محور مطالعات پایداری..... ۲۹۹
- شکل ۶۴-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۰

- شکل ۶۵-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته پنجم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۱
- شکل ۶۶-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۲
- شکل ۶۷-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۳
- شکل ۶۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۵
- شکل ۶۹-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته هفتم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۶
- شکل ۷۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۷
- شکل ۷۱-۸: عبارت کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با محور تخصصی حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۰
- شکل ۷۲-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته اول محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۵
- شکل ۷۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۶
- شکل ۷۴-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته دوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۸
- شکل ۷۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۹
- شکل ۷۶-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۰
- شکل ۷۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۱
- شکل ۷۸-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته چهارم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۳
- شکل ۷۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۴
- شکل ۸۰-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته پنجم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۶
- شکل ۸۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۷
- شکل ۸۲-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته ششم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۹
- شکل ۸۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۳۰
- شکل ۸۴-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته هفتم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۳۱
- شکل ۸۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۳۲
- شکل ۸۶-۸: عبارت کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با کلیدواژه ریزشبکه..... ۳۳۵
- شکل ۸۷-۸: عبارت کلیدی برتر در دسته اول در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۰
- شکل ۸۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۱
- شکل ۸۹-۸: عبارت کلیدی برتر در دسته دوم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۲
- شکل ۹۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۳
- شکل ۹۱-۸: عبارت کلیدی برتر در دسته سوم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۴
- شکل ۹۲-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۶
- شکل ۹۳-۸: کلیدی برتر در دسته چهارم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۷
- شکل ۹۴-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۸
- شکل ۹۵-۸: عبارت کلیدی برتر در دسته پنجم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۹
- شکل ۹۶-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۱
- شکل ۹۷-۸: عبارت کلیدی برتر در دسته ششم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۲
- شکل ۹۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۳
- شکل ۹۹-۸: عبارت کلیدی برتر در دسته هفتم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۴
- شکل ۱۰۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۶

- شکل ۸-۱۰۱: عبارت کلیدی برتر در دسته هشتم در حوزه مطالعات ریزشبهه..... ۳۵۷
- شکل ۸-۱۰۲: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هشتم در حوزه مطالعات ریزشبهه..... ۳۵۸
- شکل ۸-۱۰۳: عبارت کلیدی برتر در دسته نهم در حوزه مطالعات ریزشبهه..... ۳۵۹
- شکل ۸-۱۰۴: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته نهم در حوزه مطالعات ریزشبهه..... ۳۶۱
- شکل ۸-۱۰۵: عبارت کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با کلیدواژه کیفیت توان..... ۳۶۶
- شکل ۸-۱۰۶: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۱
- شکل ۸-۱۰۷: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۳
- شکل ۸-۱۰۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۴
- شکل ۸-۱۰۹: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۵
- شکل ۸-۱۱۰: کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۶
- شکل ۸-۱۱۱: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۷
- شکل ۸-۱۱۲: کلیدواژه‌های اصلی در دسته چهارم مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۸
- شکل ۸-۱۱۳: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۰
- شکل ۸-۱۱۴: کلیدواژه‌های اصلی در دسته پنجم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۱
- شکل ۸-۱۱۵: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۲
- شکل ۸-۱۱۶: کلیدواژه‌های اصلی در دسته ششم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۳
- شکل ۸-۱۱۷: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۴
- شکل ۸-۱۱۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هفتم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۵
- شکل ۸-۱۱۹: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۶
- شکل ۸-۱۲۰: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هشتم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۷
- شکل ۸-۱۲۱: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هشتم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۹
- شکل ۸-۱۲۲: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته نهم مطالعات کیفیت توان..... ۳۹۰
- شکل ۸-۱۲۳: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته نهم مطالعات کیفیت توان..... ۳۹۱
- شکل ۸-۱۲۴: عبارات کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با کلیدواژه مدیریت پیک بار..... ۳۹۴
- شکل ۸-۱۲۵: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم در محور مدیریت پیک بار..... ۳۹۸
- شکل ۸-۱۲۶: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم واژگان محور مدیریت پیک بار..... ۳۹۹
- شکل ۸-۱۲۷: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته سوم در محور مدیریت پیک بار..... ۴۰۰
- شکل ۸-۱۲۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم واژگان محور مدیریت پیک بار..... ۴۰۱
- شکل ۸-۱۲۹: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم در محور مدیریت پیک بار..... ۴۰۲
- شکل ۸-۱۳۰: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم واژگان محور مدیریت پیک بار..... ۴۰۴
- شکل ۸-۱۳۱: عبارت کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با محور تخصصی مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت..... ۴۰۷
- شکل ۸-۱۳۲: کلیدواژه اصلی در دسته اول محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۲
- شکل ۸-۱۳۳: تعداد اسناد به تفکیک سال در دسته اول محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۳
- شکل ۸-۱۳۴: کلیدواژه‌های اصلی در دسته دوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۴
- شکل ۸-۱۳۵: تعداد اسناد به تفکیک سال در دسته دوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۶

- شکل ۸-۱۳۶: کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۷
- شکل ۸-۱۳۷: تعداد اسناد به تفکیک سال در دسته سوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۹

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: عناوین معروف‌ترین روش‌های مطالعات آینده دارای کاربرد در حوزه فنی و مهندسی.....	۵
جدول ۱-۲: دسته‌بندی روش‌های مطالعات آینده به لحاظ کمی/کیفی و هنجاری/اکتشافی.....	۶
جدول ۱-۳: مراحل پروژه در دست اجرا.....	۹
جدول ۲-۱: تعاریف مختلف هوش مصنوعی.....	۲۴
جدول ۲-۲: تعریف عبارت هوش مصنوعی (<i>Artificial intelligence</i>) در واژه‌نامه‌های معتبر.....	۲۵
جدول ۲-۳: ۵۰ کشور نخست در حوزه دانش هوش مصنوعی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ در نظام رتبه‌بندی سایمگو.....	۵۰
جدول ۲-۴: رتبه‌بندی کشورهای منطقه خاورمیانه در حوزه دانش هوش مصنوعی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۸ در نظام رتبه‌بندی سایمگو.....	۵۳
جدول ۳-۱: پنج دسته اصلی تکنیک‌های یادگیری ماشین و اطلاعات تاریخی توسعه آن‌ها [۱].....	۶۳
جدول ۳-۲: مقایسه چارچوب‌ها و کتابخانه‌های مختلف یادگیری ماشین.....	۸۳
جدول ۴-۱: مزایا و معایب الگوریتم K -نزدیک‌ترین همسایه [۷۷].....	۹۴
جدول ۴-۲: ویژگی‌های روش درخت تصمیم [۸۲]-[۸۴].....	۱۰۰
جدول ۸-۱: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۰۳
جدول ۸-۲: پرارجاع‌ترین مراجع در زمینه راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۰۴
جدول ۸-۳: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۰۷
جدول ۸-۴: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۰۹
جدول ۸-۵: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۱۱
جدول ۸-۶: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۱۳
جدول ۸-۷: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۱۷
جدول ۸-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۲۰
جدول ۸-۹: کاربردها و موضوعات تحقیقاتی پیشنهادی در محور مطالعات راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت.....	۲۲۲
جدول ۸-۱۰: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت.....	۲۲۴
جدول ۸-۱۱: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت.....	۲۲۴
جدول ۸-۱۲: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته اول در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت.....	۲۲۷
جدول ۸-۱۳: پرارجاع‌ترین مراجع دسته اول در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت.....	۲۲۸
جدول ۸-۱۴: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته دوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت.....	۲۲۹
جدول ۸-۱۵: پرارجاع‌ترین مراجع دسته دوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت.....	۲۳۱
جدول ۸-۱۶: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته سوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت.....	۲۳۲

جدول ۱۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع دسته سوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت	۲۳۳
جدول ۱۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته پنجم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت	۲۳۴
جدول ۱۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع دسته پنجم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت	۲۳۵
جدول ۲۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته ششم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت	۲۳۶
جدول ۲۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع دسته ششم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت	۲۳۷
جدول ۲۲-۸: کاربردها و موضوعات تحقیقاتی در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت بر اساس یادگیری ماشین	۲۳۸
جدول ۲۳-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با محور بازار برق در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت	۲۴۰
جدول ۲۴-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه بازار برق	۲۴۱
جدول ۲۵-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور بازار برق	۲۴۴
جدول ۲۶-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول محور بازار برق	۲۴۵
جدول ۲۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم محور بازار برق	۲۴۷
جدول ۲۸-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم محور بازار برق	۲۴۹
جدول ۲۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم محور بازار برق	۲۵۱
جدول ۳۰-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم محور بازار برق	۲۵۳
جدول ۳۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم محور بازار برق	۲۵۶
جدول ۳۲-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم محور بازار برق	۲۵۸
جدول ۳۳-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هشتم محور بازار برق	۲۶۰
جدول ۳۴-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته نهم محور بازار برق	۲۶۳
جدول ۳۵-۸: موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "بازار برق"	۲۶۴
جدول ۳۶-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با مطالعات مربوط به محور مطالعات پایایی	۲۶۶
جدول ۳۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه مطالعات مربوط به محور مطالعات پایایی	۲۶۶
جدول ۳۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور مطالعات پایایی	۲۶۹
جدول ۳۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول محور مطالعات پایایی	۲۷۰
جدول ۴۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم محور مطالعات پایایی	۲۷۱
جدول ۴۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم محور مطالعات پایایی	۲۷۳
جدول ۴۲-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته سوم محور مطالعات پایایی	۲۷۴
جدول ۴۳-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم محور مطالعات پایایی	۲۷۵
جدول ۴۴-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته چهارم محور مطالعات پایایی	۲۷۶
جدول ۴۵-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم محور مطالعات پایایی	۲۷۷
جدول ۴۶-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته پنجم محور مطالعات پایایی	۲۷۸

- جدول ۴۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم محور مطالعات پایایی..... ۲۷۹
- جدول ۴۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته ششم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۰
- جدول ۴۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۱
- جدول ۵۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته هفتم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۲
- جدول ۵۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم محور مطالعات پایایی..... ۲۸۴
- جدول ۵۲-۸: کاربردها و موضوعات تحقیقاتی در حوزه مطالعات پایایی بر اساس یادگیری ماشین..... ۲۸۵
- جدول ۵۳-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با پایداری در سیستم‌های قدرت..... ۲۸۸
- جدول ۵۴-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه مطالعات پایداری..... ۲۸۹
- جدول ۵۵-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور مطالعات پایداری..... ۲۹۱
- جدول ۵۶-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول محور مطالعات پایداری..... ۲۹۳
- جدول ۵۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم محور مطالعات پایداری..... ۲۹۵
- جدول ۵۸-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم محور مطالعات پایداری..... ۲۹۷
- جدول ۵۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم محور مطالعات پایداری..... ۲۹۹
- جدول ۶۰-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۱
- جدول ۶۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۳
- جدول ۶۲-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم محور مطالعات پایداری..... ۳۰۶
- جدول ۶۳-۸: موضوعات تحقیقاتی در حوزه مطالعات پایداری بر اساس یادگیری ماشین..... ۳۰۸
- جدول ۶۴-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۰
- جدول ۶۵-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۱
- جدول ۶۶-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۴
- جدول ۶۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۵
- جدول ۶۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۶
- جدول ۶۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۸
- جدول ۷۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته سوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۱۹
- جدول ۷۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۱
- جدول ۷۲-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته چهارم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۲
- جدول ۷۳-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۳
- جدول ۷۴-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته پنجم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۴
- جدول ۷۵-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۶
- جدول ۷۶-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته ششم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۷
- جدول ۷۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۲۹
- جدول ۷۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته هفتم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۳۰
- جدول ۷۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق..... ۳۳۲
- جدول ۸۰-۸: موضوعات تحقیقاتی در حوزه مطالعات حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق بر اساس یادگیری ماشین..... ۳۳۳
- جدول ۸۱-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با ریزش‌بکه در سیستم‌های قدرت..... ۳۳۵
- جدول ۸۲-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه ریزش‌بکه..... ۳۳۶

- جدول ۸-۸۳: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۳۸
- جدول ۸-۸۴: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۰
- جدول ۸-۸۵: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۲
- جدول ۸-۸۶: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۴
- جدول ۸-۸۷: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۷
- جدول ۸-۸۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۴۹
- جدول ۸-۸۹: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۲
- جدول ۸-۹۰: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۴
- جدول ۸-۹۱: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هشتم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۷
- جدول ۸-۹۲: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته نهم در حوزه مطالعات ریزشبکه..... ۳۵۹
- جدول ۸-۹۳: موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی مطالعات زیر شبکه ۳۶۳
- جدول ۸-۹۴: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با کیفیت توان در سیستم‌های قدرت..... ۳۶۶
- جدول ۸-۹۵: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه کیفیت توان..... ۳۶۷
- جدول ۸-۹۶: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۰
- جدول ۸-۹۷: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۱
- جدول ۸-۹۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۴
- جدول ۸-۹۹: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۶
- جدول ۸-۱۰۰: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم مطالعات کیفیت توان..... ۳۷۸
- جدول ۸-۱۰۱: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۱
- جدول ۸-۱۰۲: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۳
- جدول ۸-۱۰۳: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۵
- جدول ۸-۱۰۴: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هشتم مطالعات کیفیت توان..... ۳۸۷
- جدول ۸-۱۰۵: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته نهم مطالعات کیفیت توان..... ۳۹۰
- جدول ۸-۱۰۶: موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات کیفیت توان" ۳۹۲
- جدول ۸-۱۰۷: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با مدیریت پیک بار..... ۳۹۴
- جدول ۸-۱۰۸: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه مدیریت پیک بار..... ۳۹۵
- جدول ۸-۱۰۹: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم واژگان محور مدیریت پیک بار..... ۳۹۷
- جدول ۸-۱۱۰: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم واژگان محور مدیریت پیک بار..... ۳۹۸
- جدول ۸-۱۱۱: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم واژگان محور مدیریت پیک بار..... ۴۰۱
- جدول ۸-۱۱۲: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم واژگان محور مدیریت پیک بار..... ۴۰۳
- جدول ۸-۱۱۳: کاربردهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در محور مدیریت پیک بار و موضوعات تحقیقاتی مرتبط ۴۰۵
- جدول ۸-۱۱۴: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت..... ۴۰۷
- جدول ۸-۱۱۵: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت..... ۴۰۸
- جدول ۸-۱۱۶: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت ۴۱۱

- جدول ۸-۱۱۷: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۲
- جدول ۸-۱۱۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۳
- جدول ۸-۱۱۹: مراجع موجود در دسته دوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۵
- جدول ۸-۱۲۰: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته سوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۶
- جدول ۸-۱۲۱: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۷
- جدول ۸-۱۲۲: کاربردهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت..... ۴۱۹
- جدول ۸-۱۲۳: دسته موضوعات تحقیقاتی قابل استفاده توسط نهادهای مختلف..... ۴۲۴

مقدمه

در شبکه‌های هوشمند انرژی، جریان دو سویه‌ای برای توان الکتریکی و اطلاعات در سیستم قدرت فراهم شده است. توزیع هوشمند نیروی برق مبتنی بر ترکیب فناوری اطلاعات و ارتباطات با توانمندی‌های پردازشی رایانه‌ها و سیستم‌های الکتریکی می‌باشد. اکنون این پرسش پیش می‌آید که چه چیزی یک شبکه را هوشمند می‌کند؟ چهار فناوری پیشرفته سبب می‌شوند یک شبکه عادی به شبکه هوشمند تبدیل شود.

۱- مسیر مخابراتی دوطرفه خودکار و مجتمع بین همه اجزای شبکه

۲- فناوری‌های اندازه‌گیری دقیق و حسگرهای پیشرفته

۳- کنترل اتوماتیک توزیع توان، خطاها و تعمیرات

۴- مدیریت پیشرفته، سازوکار و نرم‌افزار پشتیبان تصمیم

موارد ۱ و ۲ الزامات سخت‌افزاری شبکه هوشمند هستند. موارد ۳ و ۴ مربوط به الزامات نرم‌افزاری هستند که در راستای فناوری اطلاعات و پردازش داده‌ها می‌باشند. شبکه هوشمند نمی‌تواند همه مشکلات ما را حل کند، اما آنچه مسلم است این است که به استفاده کارآمدتر از انرژی ما را یاری می‌دهد و این چیزی است که فعلاً بسیار مهم است. در مقایسه با سیستم‌های قدرت سنتی، نسل جدید سیستم‌های برق و انرژی (شبکه‌های هوشمند برق و انرژی) کاملاً با اینترنت و فناوری‌های جدید انرژی یکپارچه شده است و منجر به افزایش عدم قطعیت در سیستم شده و لذا کنترل بهینه سیستم نیز پیچیده‌تر شده است و منابع داده موجود نیز فراوان‌تر شده‌اند. بنابراین، چگونگی استفاده از داده‌های عظیم موجود در شبکه‌های برق برای انجام کارهای مختلف و پیچیده سیستم با استفاده از فناوری هوش مصنوعی با در نظر گرفتن قیود عملکرد ایمن، قابل اعتماد، اقتصادی، زیست محیطی و... به یک موضوع تحقیق داغ تبدیل شده است. اجرایی ساختن مفهوم شبکه هوشمند برق و چشم انداز تعیین شده این سیستم مستلزم توسعه و به کارگیری الگوریتم‌های مربوط به یادگیری ماشین برای بهبود عملکرد سیستم قدرت است. بدین منظور مطالعات آینده‌پژوهشی حوزه کاربردهای فناورانه یادگیری ماشین در سیستم‌های قدرت موضوع تحقیقاتی پروژه حاضر است.

آرتور ساموئل (Arthur Samuel) آمریکایی، یکی از پیشروهای حوزه بازی‌های کامپیوتری و هوش مصنوعی، عبارت “یادگیری ماشین” را در سال ۱۹۵۹ که در IBM کار می‌کرد، به ثبت رساند. یادگیری ماشین، که از الگوشناسی و نظریه یادگیری محاسباتی الهام گرفته شده است، مطالعه و ساخت الگوریتم‌هایی را که می‌توانند بر اساس داده‌ها یادگیری و پیش‌بینی انجام دهند بررسی می‌کند. به عنوان یکی از شاخه‌های وسیع و پرکاربرد هوش مصنوعی، یادگیری ماشین به تنظیم و اکتشاف شیوه‌ها و الگوریتم‌هایی می‌پردازد که بر اساس آن‌ها رایانه‌ها و سامانه‌ها توانایی تعلّم و یادگیری پیدا می‌کنند. هدف یادگیری ماشین این است که رایانه‌ها و سامانه‌ها بتوانند به تدریج و با افزایش داده‌ها کارایی بهتری در انجام وظیفه مورد نظر پیدا کنند. گستره این وظیفه می‌تواند از تشخیص خودکار چهره با دیدن چند نمونه از چهره مورد نظر تا فراگیری انتخاب درست تصمیمات با دریافت سیگنال پاداش و تنبیه باشد. طیف پژوهش‌هایی که در یادگیری ماشین انجام می‌شود گسترده است. به لحاظ نظری پژوهشگران بر آن‌اند که روش‌های یادگیری تازه‌ای به وجود بیاورند و امکان‌پذیری و کیفیت یادگیری را برای روش‌هایشان مطالعه کنند و در سوی دیگر عده‌ای از پژوهشگران سعی می‌کنند روش‌های یادگیری ماشینی را بر مسایل تازه‌ای اعمال کنند. البته این طیف گسسته نیست و پژوهش‌های انجام‌شده دارای مؤلفه‌هایی از هر دو رویکرد هستند.

این فناوری، کامپیوترها و به‌طور کلی ماشین‌ها را قادر می‌سازد تا صرف‌نظر از انجام یک کار مشخص بر اساس برنامه‌ریزی‌های ویژه، تصمیمات داده محور و قابل اطمینانی را اتخاذ کنند. چنین برنامه‌ها و الگوریتم‌هایی به گونه‌ای طراحی و ساخته شده‌اند که در طول زمان و دریافت داده‌های جدیدتر، یادگیری را ادامه داده و بهبود یابند.

امروزه، یادگیری ماشین یکی از مباحث داغ در کاربردهای مختلف صنعت برق محسوب می‌شود که محققان بسیاری را مشغول به خود کرده است. روش‌های یادگیری ماشین، سیستم‌های مختلف را قادر می‌کنند که یاد بگیرند، استنتاج کنند و به

بهره‌بردار سیستم قدرت پیشنهادهای کاربردی ارائه دهند. این سیستم‌ها، به مرور زمان که با داده‌ها، ادوات، شبکه‌ها و افراد تعامل دارند، باهوش‌تر می‌شوند. با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، این سیستم‌ها قادر هستند ما را در حل مسائل مهم، کاربردی و روزمره یاری دهند. غالباً این کار، با استناد و استفاده از داده‌هایی انجام می‌شود که به دلیل حجم زیاد و یا ماهیت نامفهوم، برای ما انسان‌ها چندان قابل استفاده نیست. با توجه به اهداف روش‌های یادگیری ماشین و از طرفی دیگر سرعت بالای سرمایه‌گذاری برای هوشمند شدن شبکه برق، استفاده از یادگیری ماشین یک گزینه مناسب برای پیاده‌سازی عملی شبکه‌های هوشمند هستند. استفاده از این روش‌ها در تحلیل، بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت پیشرفته و هوشمند امروزی روز به روز در حال گسترش است. به عنوان مثال، امروزه الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پردازش و تحلیل مسائلی مانند تخمین حالت سیستم، پخش بار اقتصادی، حفظ پایداری سیستم، مکان‌یابی خطا، تخمین فرکانس و... با استفاده از حجم بالای اطلاعات اندازه‌گیری شده در شبکه‌های برق به کار گرفته می‌شوند.

**فصل ۱- تعیین متدولوژی مطالعات آینده
مناسب جهت شناسایی و بررسی کاربردهای
یادگیری ماشین در مطالعات سیستم‌های
قدرت**

۱-۱- مقدمه

موضوع تحقیقاتی پروژه حاضر، شناسایی کاربردهای دانشی و فناوریانه یادگیری ماشین در مطالعات سیستم‌های قدرت مدرن است. با توجه به ماهیت آینده‌پژوهی پروژه حاضر، لازم است که متدولوژی مناسب جهت شناسایی و بررسی کاربردهای یادگیری ماشین در مطالعات سیستم‌های قدرت تعیین شود. لذا در این فصل، متدولوژی‌های مناسب جهت اجرای این پروژه شناسایی و معرفی خواهد شد تا اقدامات مراحل بعدی بر مبنای آن صورت گیرد. در ابتدای این فصل، بررسی مختصری از مفهوم و تعریف مطالعات آینده ارائه می‌شود و سپس عناوین متدولوژی‌های مطالعات آینده با استفاده از مراجع معتبر علمی و علی‌الخصوص نتایج پروژه «تدوین نقشه راه گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت» که در سال ۱۳۹۵ در پژوهشگاه نیرو انجام شده است، معرفی می‌گردد. در انتها، متدولوژی‌های مناسب برای اجرای پروژه حاضر، به تفصیل معرفی و بررسی می‌گردد.

۱-۲- تعریف مطالعات آینده

مطالعات آینده مشتمل بر مجموعه تلاش‌های سیستماتیک است که با استفاده از تجزیه و تحلیل منابع، الگوها و عوامل تغییر و یا ثبات، به تجسم آینده‌های بالقوه و برنامه‌ریزی برای آن‌ها می‌پردازد. مطالعات آینده منعکس می‌کند که چگونه از دل تغییرات (یا تغییر نکردن) «امروز»، واقعیت «فردا» تولد می‌یابد [۱].

مطالعات آینده معادل لغت لاتین «Futures Study» است. کلمه جمع Futures به این دلیل استفاده شده است که با به گمانه‌زنی‌های سیستماتیک و خردورانه، در فقط «یک آینده» بهره‌گیری از طیف وسیعی از متدولوژی‌ها و به جای تصور مورد نه فقط «یک آینده» بلکه «چندین آینده متصور» مبادرت می‌شود.

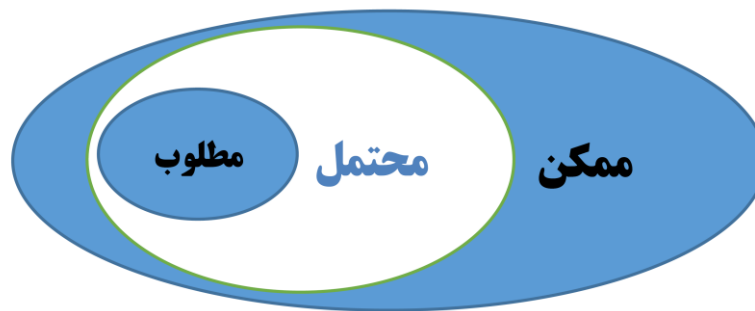
مطالعات آینده شاخه‌ای از علم و فناوری است که با کشف آینده و شکل بخشیدن به دنیای مطلوب فردا سروکار دارد [۲]: علم است؛ چون مبانی معرفتی و نظری دقیق و متدولوژی علمی دارد و در دانشگاه‌های پیشرفته دنیا به عنوان یک رشته تحصیلی، آموزش داده می‌شود.

فناوری است؛ چون بر پایه یک مجموعه از تکنیک‌های علمی استوار است و می‌تواند در حل و فصل مسایل پیچیده جامعه، و همچنین در «ساختن آینده» به کار آید. مطالعات آینده در زمره «فناوری‌های نرم» قرار می‌گیرد.

یکی از پیش‌فرض‌های مطالعات آینده اذعان به وجود گزینه‌های متعدد آینده است که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است [۲]: آینده ممکن: هر چیزی اعم از خوب یا بد، محتمل یا بعید، می‌تواند در آینده رخ دهد.

آینده‌های محتمل: آنچه به احتمال بسیار زیاد در آینده به وقوع خواهد پیوست (مبتنی بر استمرار روندهای کنونی در آینده). آینده‌های مطلوب: آنچه مطلوب‌ترین و مرجح‌ترین رویداد آینده به شمار می‌رود.

درواقع آینده امری است که افراد می‌توانند آن را با اقدامات هدفمند خود طراحی کرده و شکل دهند. افراد برای آنکه عاقلانه عمل کنند، باید نسبت به پیامدهای اقدامات خود و دیگران آگاهی و شناخت کافی داشته باشند و همچنین واکنش‌های دیگران و نیروهایی را که خارج از کنترل آن‌ها است بررسی کنند؛ به این ترتیب، افراد نه تنها می‌کوشند امور در حال وقوع را بفهمند؛ بلکه می‌کوشند اموری را که بالقوه امکان وقوع دارد و یا تحت شرایط خاصی در آینده اتفاق خواهد افتاد، نیز بشناسند. افراد با استفاده از این شناخت حدسی موقعیت کنونی خود را تشخیص داده، کارهایشان را دنبال کرده و از بستر زمان و فضای مادی و اجتماعی می‌گذرند. به همین دلیل مطالعات آینده مشتمل بر مجموعه تلاش‌هایی است که با استفاده از تجزیه و تحلیل منابع، الگوها و عوامل تغییر و یا ثبات، به تجسم آینده‌ای بالقوه و برنامه‌ریزی برای آن می‌پردازد [۲]



شکل ۱-۱: مقوله‌های مطالعات آینده

۳-۱- ضرورت مطالعات آینده

بسیاری از حوادث و رویدادهای آینده قابل پیش‌بینی هستند. دخالت انسان در این روند موجبات تغییر و تحولات مطلوب را ایجاد خواهد کرد. اما در اغلب موارد اشتغال به زمان حال و تلاش در جهت رفع مشکلات موجود، مانع از آن می‌شود که مدیران و تصمیم‌گیرندگان به آینده بیندیشند؛ حال آن‌که مشکلات کنونی ناشی از عدم شناخت آینده‌ای بوده است که اینک "زمان حال" نامیده می‌شود. به بیان روشن‌تر، بحران‌ها و مشکلات کنونی، موجه‌ترین دلیل برای اندیشیدن پیرامون درباره آینده است. ناگفته پیداست که بحران‌های امروز نتیجه قهری نپرداختن به موانع و مشکلات، قبل از بروز آن‌ها به شکل بحران است.

عامل دیگری که پرداختن به آینده را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد در سرعت تحولات نهفته است. تحولات حیرت‌آور عصر حاضر، ناشی از دگرگونی‌های شگفت در حوزه فناوری و روند شتابناک جهانی‌شدن می‌باشد. شاید تحول در فناوری عمده‌ترین نقش را در ایجاد چنین فضایی ایفا می‌کند، زیرا تحول فناوری به مثابه تغییر در شئون و ابعاد مختلف زندگی است. باید توجه داشت که حضور عاملانه در روند تحولات آینده، کاهش تهدیدات و افزایش فرصت‌ها و گزینه‌ها، نیازمند رویکردی آینده‌پژوهانه است که امکان کنش‌گری در رخدادهای آینده را فراهم می‌سازد.

امروزه تغییرات با نرخ سریع‌تری به وقوع می‌پیوندند. تغییرات فناوری و متعاقباً تغییر در دیگر جنبه‌های زندگی، افزایش روزافزون وابستگی متقابل کشورها و ملل، تمرکززدایی جوامع و نهادهای موجود که به دلیل گسترش فناوری اطلاعات شتاب بیشتری یافته است، تمایل روزافزون به جهانی‌شدن به همراه حفظ ویژگی‌های ملی، قومی، فرهنگی و بسیاری عوامل دیگر، لزوم درک بهتر از "تغییرات" و "آینده" را برای دولت‌ها، کسب‌وکارها، سازمان‌ها و مردم ایجاد می‌کند. آینده اساساً قرین به عدم قطعیت است. با این همه آثار و رگه‌هایی از اطلاعات و واقعیات که ریشه در گذشته و حال دارند، می‌توانند رهنمون ما به آینده باشند. ادامه «تصمیم‌گیری صرفاً چندین آینده محتمل بر اساس تجارب گذشته»، غفلت از رصد تغییرات آتی را در پی خواهد داشت و با تلخ‌کامی روبرو خواهد شد. عدم قطعیت نهفته در آینده برای بعضی، توجیه‌کننده عدم دوراندیشی آنان است و برای عده‌ای دیگر منبعی گران‌بها از فرصت‌ها [۳].

۴-۱- تاریخچه مطالعات آینده

از زمانی که بشر بر زمین گام نهاد همواره اشتیاق فهم و درک آینده را داشته است. تلاش برای شناخت آینده توسط بشر به اشکال گوناگون در ادوار تاریخ به صورت متفاوت انجام شده است؛ در عهد باستان پیشگویان و کاهن‌ها از طریق سیر در احوال کواکب، سیاره‌ها و اجرام سماوی و رمل و اسطرلاب و علوم غریبه و ... نمونه‌هایی از کسانی هستند که در گذشته تلاش کردند به

نحوی به این اشتیاق در نزد خاص و عام را پاسخ دهند. برای مثال از روی رنگ آب نیل تشخیص می‌دادند که سال آینده مثلاً سال پُر بارانی خواهد بود یا خیر [۳].

اولین نشانه‌های جدی‌تر توجه بشر به آینده در عصر روشنگری دیده می‌شود، عصری که بشر باور داشت که علوم برای هر چیزی راه‌حلی خواهند یافت. قوانین نیوتن در مورد حرکت، درک و تحلیل بسیاری از پدیده‌ها را ممکن ساخته بود. در اثر رشد شتابان علوم در این دوره، متفکرین عصر روشنگری واقعاً به این نتیجه رسیده بودند که تنها زمان می‌خواهد تا همه قوانین و قواعد جامعه و محیط پیرامون بشر معلوم و آشکار شود. تشکیل «موسسه رند»^۱ در سال ۱۹۴۵ میلادی، انتشار کتاب «هنر حدس زدن»^۲ نوشته بی. دجوونل در سال ۱۹۴۶ میلادی، کتاب «تصویر آینده»^۳ نوشته اف. ال. پولاک در سال ۱۹۵۱ میلادی و تشکیل انجمن‌های تخصصی مطالعات آینده، تشکیل انجمن آینده جهان به وسیله ادوارد کورنیش و دیگران در سال ۱۹۶۶ میلادی، از جمله نشانه‌های پیدایش مطالعات آینده مدرن است.

اولین فعالیت مطالعات آینده در قالب یک تحلیل علمی در سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۳۳ میلادی توسط یک گروه محققین و با سرپرستی ویلیام اف آگبرن در زمینه جامعه‌شناسی که علم نوپایی شناخته می‌شد، در آمریکا انجام شد. این گروه برای اولین بار متدولوژی‌های علمی نظیر برون‌یابی^۲ و بررسی‌های علمی را در مورد روندهای اجتماعی روز آمریکا به انجام رسانده و ضمن انتشار اولین کاتالوگ روندها، موفق به آینده‌بینی‌های مهمی از جمله افزایش نرخ مهاجرت و ازدیاد طلاق شد. همچنین بلافاصله پس از جنگ جهانی دوم و به دنبال تجزیه و تحلیل تکنولوژی‌های مورد استفاده در آلمان و ژاپن، روش‌های نوینی برای آینده‌پژوهی ابداع شد و در نتیجه آن دستاوردهای تکنولوژی مهم دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ میلادی شامل رادار، موشک‌های بالیستیک قاره پیما و حمل و نقل هوایی از قبل پیش‌بینی شد [۳].

در دوران جنگ سرد و مسابقه تسلیحات هسته‌ای، دغدغه مهم دست‌اندرکاران نظامی، پیش‌بینی زنجیره رخدادهایی بود که پس از یک رویارویی احتمالی هسته‌ای می‌توانست اتفاق بیفتد. از همین رو، اولین بازی‌های جنگی به وجود آمد. این‌ها مدل‌هایی از یک رویارویی هسته‌ای بودند که احتمالات مختلف را بررسی و تحلیل می‌کردند. شکل کامل‌تر این مدل‌ها، موجب به وجود آمدن سناریو شدند که امروزه یکی از مهم‌ترین ابزارهای آینده‌پژوهی محسوب می‌شود. با کمک این سناریوها، سلسله رویدادهای متصور در یک زمان بسیار کوتاه پس از شروع یک جنگ هسته‌ای، قابل تصور و مدل کردن بوده و در نتیجه می‌توان عکس‌العمل‌ها و نحوه آمادگی‌های لازم برای روبروشدن با چنین جنگی را تدوین نمود. این مشابه همان نقشی است که سناریو به عنوان یک ابزار در آینده‌پژوهی فعلی بازی می‌کند.

در سال ۱۹۶۴ میلادی نیاز به پیش‌بینی تکنولوژی، منجر به انجام یکی از مشهورترین ارزیابی‌ها با استفاده از روش دلفی^۳ گردید. در چارچوب حمایت‌های موسسه رند، خبرگان فناوری‌های مختلف طی یک پروژه مشترک مأمور شدند که تکنولوژی‌های نوظهور در یکصد سال آینده را پیش‌بینی نمایند. بررسی آنان شش مقوله «تحولات مهم علمی»، «سیستم‌های تسلیحاتی»، «جلوگیری از جنگ»، «پیشرفت در زمینه علوم فضایی»، «اتوماسیون»، «کنترل جمعیت» را شامل می‌شد. این تکنیک از افراد می‌خواست که ضمن ارائه ارزیابی خود، پراکندگی پاسخ‌های سایر خبرگان را نیز در نظر گرفته و پس از بحث در مورد تفاوت‌ها، نهایتاً ارزیابی‌های تجدید نظر شده خود را ارائه کنند. نتایج این تکنیک به طرز عجیبی در پیش‌بینی ظهور تکنولوژی‌های دهه‌های بعدی، دقیق بود [۳] و [۴].

در نهایت آینده‌پژوهی به مثابه یک فعالیت عمومی از ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد. برتراند دوژوئل اولین مطالعه نظری در مورد آینده را به نام «هنر گمان» نوشت. او در این زمینه با اشاره به این که «هیچ واقعیتی در مورد آینده وجود ندارد»، نتیجه گرفت که یافتن مدارک و استنتاجات برای آینده، نیازمند روش‌هایی غیرمتداول می‌باشد.

¹ Rand

² Extrapolation

³ Delphi

۵-۱- روش‌های مطالعات آینده

مطالعات آینده طی سال‌های اخیر گسترش و تعمیق زیادی پیدا کرده و به دلیل اقبال دستگاه‌های حاکمیتی و متصدیان عرصه تجارت، اقتصاد و بازرگانی، از رشد تحقیقاتی و پژوهشی قابل قبولی برخوردار شده است. همچنین موانع ذهنی، سنتی و نظری که در مقابل نگاه به آینده و پیش‌بینی مطرح بودند، تا حد زیادی مرتفع شده‌اند. از سوی دیگر، ضرورت‌ها و اقتضائات اقدامات و برنامه‌ریزی‌های استراتژیک در سطح سازمان‌ها و دولت‌ها، توجه آن‌ها را به حوزه آینده‌نگری کشانده است. افزون بر این‌ها مراجع علمی و دانشگاهی نیز به تدریج به سمت انجام مطالعات آینده، تأسیس گروه‌های علمی و پژوهشی و راه‌اندازی دوره‌های تحصیلات تکمیلی رو آورده‌اند که این امر تأثیر جدی در تعمیق و ترویج موضوعات و نیز روش‌ها و تکنیک‌های آینده‌نگری به‌جا گذاشته است. درمجموع رشد پژوهش‌های آینده‌نگرانه در داخل و خارج از کشور و حساسیت‌هایی که در مورد نتایج و یافته‌های این قبیل پژوهش‌ها از سوی مشتریان و کارفرمایان (دولتی و غیردولتی) و نیز عموم نخبگان و حتی افکار عمومی وجود دارد، موجب شده است تا محققان این حوزه مطالعاتی به دقت و وارسی هرچه دقیق‌تر تکنیک‌ها و روش‌های مطالعات آینده همت گمارند و طیف وسیعی مشتمل بر بیش از ۱۰۰ روش را در خصوص تحقیق در مطالعات آینده استفاده نمایند [۱].

در راستای اجرای بند اول از مرحله اول پروژه «تدوین نقشه راه گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت- پژوهشگاه نیرو» با عنوان «تعریف مبانی و تعیین محدوده موضوع» در سال ۱۳۹۵ به معرفی برخی از مهم‌ترین روش‌های مطالعات آینده پرداخته شده است. این گزارش ارزشمند توسط آقای مهندس امید شاه حسینی تهیه و تدوین شده است. در این گزارش [۵]، تعداد ۲۷ روش مطالعات آینده به تفکیک بررسی و مزایا و معایب آن‌های توضیح داده شده است. به‌منظور جلوگیری از تکرار مطالب ارزشمند حاصل شده در پروژه مذکور، در اینجا عناوین آن‌ها نوشته شده و فقط روش‌هایی که برای اجرای این پروژه مناسب هستند توضیح داده می‌شوند.

در گزارش مذکور [۵]، عناوین روش‌های مطالعات آینده به‌صورت فارسی نوشته شده است. از آنجایی که فارسی‌سازی عناوین این روش‌ها ممکن است نتواند دقیقاً روش مذکور را مشخص نمایند، لذا در جدول ۱-۱ با مطالعه کتاب‌ها و مقالات مختلف مطالعات آینده، عنوان دقیق لاتین آن‌ها هم نوشته شده تا ابهامی برای خوانندگان پیش نیاید [۵]-[۷].

جدول ۱-۱: عناوین معروف‌ترین روش‌های مطالعات آینده دارای کاربرد در حوزه فنی و مهندسی

ردیف	عنوان فارسی	عنوان لاتین
۱	مدل‌سازی عامل	Agent Modeling
۲	تحلیل لایه‌ای علت‌ها	Causal Layered Analysis
۳	آشوب و سیستم‌های غیرخطی	Chaos and Nonlinear Systems
۴	تحلیل تأثیر متقابل	Cross-impact Analysis
۵	مدل‌سازی تصمیم	Decision Modeling
۶	تکنیک‌های دلفی	Delphi Method
۷	مدل‌سازی آماری	Statistical Modeling
۸	پویش محیط	Environmental Scanning
۹	چرخ آینده	Futures Wheel
۱۰	چندضلعی آینده	Futures Polygon
۱۱	سناریوهای تعاملی	interactive Scenario
۱۲	تحلیل ریخت‌شناسی	Morphological Analysis

ردیف	عنوان فارسی	عنوان لاتین
۱۳	چشم‌انداز	Visioning
۱۴	روش پانل	Panel Method
۱۵	ذهن‌انگیزی (طوفان فکری)	Brain Storming
۱۶	بازار پیش‌بینی	Prediction Markets
۱۷	درخت وابستگی	Relevance Tree
۱۸	تصمیم‌گیری پابرجا	Robust Decisionmaking
۱۹	سناریو	Scenario
۲۰	ره‌نگاشت	Roadmapping
۲۱	بازی شبیه‌سازی	Simulation Game
۲۲	سوفی	State of Future Index (SOFI)
۲۳	تحلیل جایگزینی	Alternative Analysis
۲۴	مدل‌سازی سیستمی	Systems Modeling
۲۵	متن‌کاوی	Text mining
۲۶	تحلیل اثر روند	Trend Impact Analysis
۲۷	شگفتی‌سازها	Wild Cards

۱-۵-۱- دسته‌بندی روش‌های مطالعات آینده بر مبنای الگوی کلاسیک

در الگوی کلاسیک که قدیمی‌ترین و مرسوم‌ترین دسته‌بندی روش‌ها است، روش‌های مطالعات آینده از نظر کمی یا کیفی بودن دسته‌بندی می‌شود. روش‌های کمی مبتنی بر اعداد و ارقام هستند و در ارتباط با ریاضی و آمار قرار می‌گیرند. در مقابل در روش‌های کیفی خبری از عدد و رقم نیست و کلمات و جملات جایگزین می‌شوند. برخی از روش‌ها در میانه این طیف قرار می‌گیرند و هم جنبه کیفی و هم جنبه کمی دارند. در سازمان‌دهی کلاسیک علاوه بر دسته‌بندی کمی/کیفی، دسته‌بندی اکتشافی/هنجاری نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. روش‌های هنجاری بر هنجارها و ارزش‌ها بنا شده‌اند. روش‌های هنجاری به دنبال پاسخ به این سؤال هستند: شما چه آینده‌ای می‌خواهید؟ در آینده به دنبال چه چیزی هستید؟ آینده مطلوب شما کدام است؟ در مقابل روش‌های اکتشافی به دنبال شناخت آنچه ممکن است، هستند و به جنبه‌های ترجیحی آینده توجهی ندارند. روش‌های مطالعات آینده در طیفی ترکیبی از هنجاری بودن و اکتشافی بودن قرار می‌گیرند. به عبارتی دیگر روش‌های مطالعات آینده ممکن است هنجاری باشند، اکتشافی باشند و یا جنبه‌هایی از هر دو را داشته باشند. در جدول ۱-۲ دسته‌بندی روش‌های مطالعات آینده معرفی شده نشان داده شده است.

جدول ۱-۲: دسته‌بندی روش‌های مطالعات آینده به لحاظ کمی/کیفی و هنجاری/اکتشافی

روش	کمی	کیفی	هنجاری	اکتشافی
مدل‌سازی عامل		×		×
تحلیل لایه‌ای علت‌ها		×		×
آشوب و سیستم‌های غیرخطی	×			×
تحلیل تأثیر متقابل	×			×

روش	کمی	کیفی	هنجاری	اکتشافی
مدل سازی تصمیم	×			×
تکنیک‌های دلفی		×	×	×
مدل سازی آماری	×			×
پوشش محیط		×		×
چرخ آینده		×	×	×
چندضلعی آینده	×	×	×	×
سناریوهای تعاملی		×	×	×
تحلیل ریخت‌شناسی		×	×	
چشم انداز		×	×	
روش پانل		×	×	
ذهن‌انگیزی (طوفان فکری)		×	×	
بازار پیش‌بینی	×		×	
درخت وابستگی		×	×	
تصمیم‌گیری پابرجا	×			×
سناریو	×	×	×	×
ره‌نگاشت	×	×	×	×
بازی شبیه‌سازی		×		×
سوفی	×	×	×	×
تحلیل جایگزینی		×		×
مدل سازی سیستمی	×			×
متن کاوی		×	×	×
تحلیل اثر روند	×	×		×
شگفتی‌سازها	×	×		×

۲-۵-۱- دسته‌بندی روش‌های مطالعات آینده بر مبنای الگوی سازمان‌دهی آلتونن

در الگوی آلتونن روش‌های بر مبنای طبیعتِ درکِ ممکنِ سیستم^۱ و ابزار کنترل یا هدایت سیستم^۲ دسته‌بندی می‌شوند. بر این اساس، روش‌ها از نظر طبیعتِ درکِ ممکنِ سیستم در دو دسته نوپدید^۳ و طراحی^۴ قرار می‌گیرند. منظور از «طراحی» توانایی مدیر، رهبر گروه، خبره یا پژوهش‌گر برای ایستادن بیرون سیستم و طراحی آن سیستم به عنوان یک کل یکپارچه است. منظور از «نوپدید» این است که نمی‌توان بیرون سیستم قرار گرفت زیرا سیستم از طریق تعاملات عامل‌ها شامل انسان‌ها، فرایندها، فناوری،

^۱ Nature of possible understanding of system

^۲ Means of controlling or directing system

^۳ Emergent

^۴ Design

حکومت و غیره پدید می‌آید. از منظر کنترل یا هدایت سیستم نیز روش‌ها در دو گروه ابتکاری^۱ (پذیرفتن ابهام^۲) و قوانین^۳ (برطرف کردن ابهام^۴) هستند. از تقاطع این دو همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، چهار ناحیه شامل تفکر سیستمی^۵، رویکرد مهندسی^۶، پیچیدگی ریاضی^۷ و پیچیدگی اجتماعی^۸ شکل می‌گیرند.

روش‌های با رویکرد مهندسی از این ویژگی مهم برخوردارند که اجرای آن‌ها نسبتاً ساده است. اجرای روش‌های ناحیه پیچیدگی ریاضی نیاز به پیش‌زمینه ریاضی و توانایی و مهارت برنامه‌نویسی دارند. روش‌های تفکر سیستمی تنها در شرایطی قابل استفاده هستند که تعداد محدودی تعامل وجود داشته باشد و سیستم قابل طراحی باشد. روش‌های موجود در ناحیه پیچیدگی اجتماعی در زمانی که فهم بالایی از شرایط وجود ندارد و با پدیده‌های غیرخطی و به دنبال فهم سیستم بدون کنترل آن هستیم کاربرد دارند. البته در هر یک از نواحی چهارگانه، روش‌ها بر اساس موقعیتی که دارند و دوری یا نزدیکی به محورها قابلیت‌های متفاوتی دارند و این موقعیت‌ها در انتخاب آن‌ها تأثیرگذار است.



شکل ۱-۲: الگوی آلتون برای سازمان‌دهی روش‌های مطالعات آینده

¹ Heuristic

² Allow ambiguity

³ Rules

⁴ Remove ambiguity

⁵ System thinking

⁶ Engineering approaches

⁷ Mathematical complexity

⁸ Social complexity

۱-۶- نیازسنجی اجرای پروژه در زمینه استفاده از روش‌های آینده پژوهی

مراحل انجام پروژه به همراه بندهای هر مرحله مطابق با تعریف پروژه مصوب در جدول ۱-۳ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۱-۳ مشاهده می‌شود، در بند ۳ پروژه حاضر باید با استفاده از مطالعات آینده، رویکرد بین‌المللی در خصوص کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه مطالعات سیستم قدرت تعیین شود. لذا در ابتدا لازم است که ابزار مناسب برای اجرای صحیح مطالعات آینده در فاز اول پروژه تعیین شود. با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بندهای پیشین و همچنین موضوع پروژه حاضر که در راستای مطالعات آینده فناوری یادگیری ماشین در حوزه مهندسی برق- سیستم‌های قدرت است، لذا به‌کارگیری روش‌های با رویکرد مهندسی و تفکر سیستمی که در شکل ۱-۲ نشان داده‌اند مناسب به نظر می‌رسد. از طرف دیگر، روش انتخابی باید جنبه اکتشافی داده باشد تا بتوان روند تحقیقات بین‌المللی را به دست آورد و درنهایت در فاز چهارم پروژه، مسیر کلی تحقیقات آینده داخل کشور در حوزه کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در راستای محورهای تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت را استخراج نمود.

جدول ۱-۳: مراحل پروژه در دست اجرا

مرحله	عنوان / توضیحات
۱	تعیین متدولوژی نحوه شناسایی کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت مدرن با توجه به ماهیت آینده‌پژوهی پروژه حاضر، لازم است که یک متدولوژی مناسب جهت شناسایی و بررسی کاربردهای یادگیری ماشین در مطالعات سیستم‌های قدرت تعیین شود. لذا در این مرحله، مناسب‌ترین متدولوژی جهت اجرای این پروژه شناسایی و معرفی خواهد شد تا اقدامات مراحل بعدی بر مبنای آن صورت گیرد.
۲	شناسایی و تحلیل قابلیت‌های انواع تکنیک‌های یادگیری ماشین و ابزارهای مناسب برای پیاده‌سازی آنها در این مرحله، با توجه به متدولوژی انتخاب شده از مرحله اول، مفاهیم علمی هوش مصنوعی و یادگیری ماشین بررسی می‌شوند. در ادامه، انواع تکنیک‌های اصلی پیاده‌سازی یادگیری ماشین همچون تکنیک‌های یادگیری بانظارت، یادگیری بدون نظارت و یادگیری تقویتی معرفی شده و از نظر توانمندی و کارایی مقایسه و دسته‌بندی می‌شوند. از آنجایی که برای پیاده‌سازی هر کدام از این تکنیک‌ها تاکنون روش‌های مختلف و متنوعی با کاربردهای خاص و منحصر به فرد ارائه شده است، در این مرحله تأکید بر پایه و اصول الگوریتم‌هایی است که قابل پیاده‌سازی و دارای کاربرد در مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت مدرن هستند. از سویی دیگر، با توجه به رشد روزافزون حوزه نرم‌افزاری در دانش فناوری اطلاعات و علم داده، روز به روز زبان‌های برنامه‌نویسی، چارچوب‌ها، کتابخانه‌ها و جعبه‌افزارهای بیشتری با قابلیت‌های کارآمدتر برای پیاده‌سازی و استفاده از تکنیک‌های مختلف یادگیری ماشین توسعه داده می‌شود لذا در انتهای این مرحله به شناسایی و مقایسه ابزارهای یادگیری ماشین نیز پرداخته خواهد شد.
۳	بررسی کاربرد فناوریانه تکنیک‌های مختلف یادگیری ماشین در محورهای تخصصی گروه پژوهشی مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت در این مرحله بر اساس متدولوژی منتخب از مرحله اول، کاربردهای فناوریانه تکنیک‌های یادگیری ماشین با توجه به محورهای تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت بررسی می‌شود. بدین منظور، با استفاده از متدولوژی تعیین شده در مرحله ۱، گزارشات علمی، دسته‌بندی شده و کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در حوزه‌های مذکور

مرحله	عنوان / توضیحات
	مورد تحقیق و تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین، در این مرحله علاوه بر شناسایی کاربردها، متخصصین و ذینفعان امر نیز ذیل حوزه‌های مختلف دانشی و فناورانه مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت شناسایی خواهند شد.
۴	استخراج مجموعه موضوعات تحقیقاتی مبتنی بر کاربردهای فناورانه یادگیری ماشین در راستای محورهای تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت در مرحله انتهایی این پروژه، بر اساس نتایج اقدامات صورت گرفته در مراحل پیشین و با تأکید بر محورهای تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت (شامل ۱۲ محور تخصصی زیر)، عناوین تحقیقاتی مرتبط با کاربردهای یادگیری ماشین در مطالعات سیستم‌های قدرت مدرن استخراج می‌شوند. محور تخصصی ۱- مطالعات برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۲- مطالعات پایایی سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۳- مطالعات راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۴- مطالعات مدیریت بازار برق سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۵- مطالعات پایداری سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۶- مطالعات حفاظت و ایمنی سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۷- مطالعات کیفیت توان سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۸- مطالعات حالت گذرا سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۹- مطالعات مدیریت پیک بار سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۱۰- مطالعات مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت محور تخصصی ۱۱- مطالعات توسعه سامانه‌های محاسباتی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی قدرت محور تخصصی ۱۲- مطالعات ریزشبه در نهایت، بر اساس نتایج حاصل از مراحل دوم و سوم و تحلیل‌های کارشناسی مورد نیاز در این مرحله، مسیر کلی تحقیقات آینده داخل کشور در حوزه کاربردهای فناورانه یادگیری ماشین در راستای محورهای تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت استخراج خواهد شد. ❖ لازم به ذکر است که طبق آخرین مصوبه معاونت پژوهشی پژوهشگاه نیرو، محور تخصصی شماره ۸ از گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت حذف شده است و لذا تحقیقات در خصوص این محور در فاز چهارم انجام نمی‌شود.

از آنجایی که متخصصان حوزه مطالعات آینده ترکیب روش‌های مختلف مطالعات آینده در یک تحقیق را مؤثرتر قلمداد کرده‌اند، لذا استفاده ترکیبی از روش‌های متن‌کاوی و برون‌یابی روند که یکی از مراحل اجرای روش تحلیل اثر روند است، برای پیاده‌سازی مطالعات آینده در پروژه حاضر پیشنهاد می‌شود. لازم به ذکر است طی یک جلسه با کارشناسان گروه پژوهشی آینده نگاری و سیاست پژوهی پژوهشگاه نیرو با حضور دکتر حمیدرضا بزی و دکتر علی چاپرک، متدولوژی‌های مختلف آینده‌پژوهی بررسی گردید و متدولوژی‌های متن‌کاوی و برون‌یابی روند برای تیم اجرای پروژه شرح داده شد. در ادامه برای آشنایی بیشتر با دو روش متن‌کاوی و برون‌یابی توضیحات تکمیلی ارائه می‌شود.

۱-۶-۱- روش متن‌کاوی

متن‌کاوی منابع اطلاعات علم و فن‌آوری را می‌توان به اختصار فن‌کاوی (یا کاوش فن‌آوری) نامید. این روش در بازنگری‌های مرور ادبیات سنتی تحقیق ریشه دارد. رصد یا پایش فن‌آوری، درواقع ادبیات تحقیق را برای یک فن‌آوری مورد علاقه مشخص،

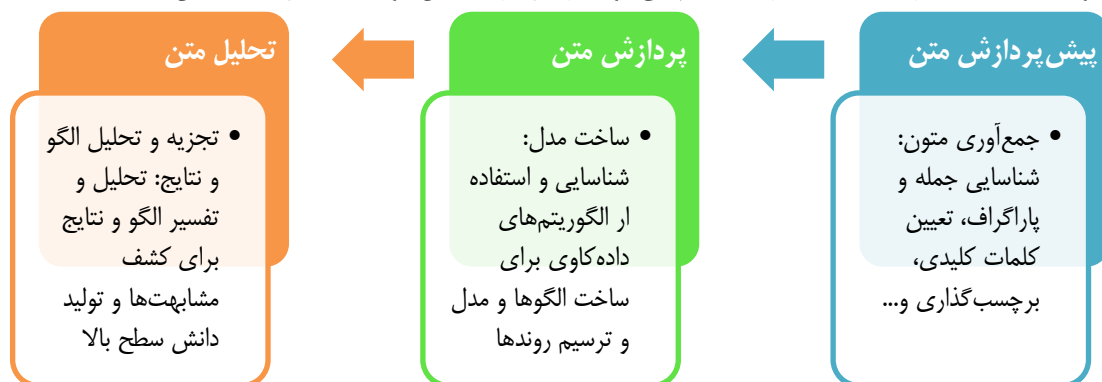
بازنگری می‌کند. این کار معمولاً با بررسی دامنه وسیعی از منابع صورت می‌گیرد. پیدایش منابع اطلاعاتی الکترونیکی با قابلیت دسترسی گسترده، تلاش‌ها برای دستیابی به هوش را به طور کیفی و پیوسته تغییر می‌دهد. به طوری که یک فرد اکنون می‌تواند مقادیر عظیم اطلاعات را به آسانی و مؤثر پردازش کند. شمارش نشریات و یا دیگر اقلام کتاب‌سنجی می‌تواند به پیگیری (روند) توسعه‌های فناورانه و علمی کمک کند [۹].

متن کاوی یکی از تکنولوژی‌های نوظهوری است که تلاش می‌کند تا اطلاعات معناداری را از داده‌های متنی ساختار نیافته استخراج کند. این روش شکل توسعه‌یافته داده کاوی برای داده‌های متنی است که با تکیه بر داده‌های متنی ساختار نیافته مانند فایل‌های متنی، فایل‌های HTML، پیام‌های متنی، مقالات و نامه‌های الکترونیکی به یافتن مدل‌های مفید، روندها، الگوها و یا مجموعه‌ای از قوانین برای آینده می‌پردازد. به عنوان یک تکنیک خودکار، متن کاوی می‌تواند برای شناسایی، استخراج، مدیریت، ادغام و بهره‌برداری دانش از متون موجود به گونه‌ای کارا و نظام‌مند استفاده شود. برخلاف تجزیه و تحلیل محتوا به روش سنتی، متن کاوی عمدتاً از داده‌ها مشتق می‌شود و هدف اصلی آن شناسایی خودکار الگوها و روندهای پنهان در میان داده‌ها و پس از آن تفسیر الگوها و روندهایی است که از داده‌های متنی حاصل می‌شود [۱۰].

درواقع متن کاوی، بازیابی و درک اطلاعات پنهان موجود در متون را تسهیل می‌کند و می‌توان آن را به عنوان یکی از شاخه‌های داده کاوی در نظر گرفت. این روش، نوعی اکتشاف و تحلیل داده‌های متنی توسط ابزارهای خودکار و نیمه خودکار به منظور کشف دانش جدید است. این مفهوم برای اولین بار توسط فلدمن و داگان در سال ۱۹۹۵ به عنوان روش تجزیه و تحلیل ماشینی متن، مطرح گردید. متن کاوی از روش‌هایی نظیر بازیابی اطلاعات، استخراج اطلاعات و همچنین فرایند زبان طبیعی^۱ استفاده کرده و سپس آن‌ها را با الگوریتم‌ها و روش‌های داده کاوی، یادگیری ماشینی و تجزیه و تحلیل‌های آماری مرتبط می‌کند. متن کاوی فرایندی دانش‌محور است که کاربر می‌تواند با بهره‌گیری از این فرایند و با استفاده از ابزارهای تحلیل‌گر مناسب، با مجموعه‌ای از اسناد در تعامل قرار گرفته و برای پیش‌بینی آینده، الگوها و روندهایی متناسب با داده‌های متنی موجود ترسیم کند [۱۰] و [۱۱]. هدف نهایی از متن کاوی، پیش‌بینی و ارزیابی است. در پیش‌بینی هدف آن است تا طرح‌ریزی‌هایی که از نمونه‌های گذشته حاصل شده و بر پایه تجربیات قبلی بوده را به نمونه‌های جدید تعمیم داد و با ارزیابی اسناد و توجه به قوانین، الگوها و روندهای میان تجربیات قبلی، الگوها، قوانین و روندهای را برای وقایع آتی پیش‌بینی نمود [۱۲].

۱-۶-۱-۱ فرایند متن کاوی

فرایند عمومی متن کاوی متشکل از سه مرحله آماده‌سازی متن، پردازش متن و تحلیل متن است که در هریک از این مراحل، مجموعه فعالیت‌های مرتبط با هدف مرحله انجام می‌شود. مراحل فرایند متن کاوی در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



¹ Natural language process

شکل ۳-۱: مراحل فرایند متن کاوی

- ✓ آماده‌سازی متن: انتخاب، پاک‌سازی و پردازش مقدماتی متن در مرحله آماده‌سازی متن صورت می‌گیرد. در این مرحله، منابعی که باید بر روی آن‌ها متن کاوی انجام شود انتخاب شده و پردازش مقدماتی متن نظیر شناسایی کلمات کلیدی پرداخته می‌شود.
- ✓ پردازش متن: در این مرحله، از الگوریتم‌های داده کاوی جهت پردازش داده‌های آماده‌سازی شده استفاده می‌شود و مدل پژوهش و روندها بر پایه کلمات کلیدی استخراج شده شکل می‌گیرند.
- ✓ تحلیل متن: در این مرحله، خروجی متن کاوی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. درواقع در تحلیل متن، الگوهای به دست آمده در مرحله قبل، برای کشف مشابهت‌های بین اسناد بر پایه کلمات کلیدی تحلیل می‌شوند.

۲-۶-۱- روش تحلیل اثر روند

روش تحلیل اثر روند در اوایل دهه ۷۰ میلادی توسط گوردون پدید آمد. در آن زمان روش‌های کمی بر اساس داده‌های تاریخی و از طریق برون‌یابی روند با هدف ایجاد پیش‌بینی استفاده می‌شد. چنین روش‌هایی تأثیر اتفاقات غیرمنتظره در آینده را نادیده می‌گرفتند. این اشکال برای تمامی روش‌های کمی که فقط به داده‌های تاریخی وابسته هستند وارد است. روش تحلیل اثر روند، روش‌های عددی را پایه‌ای برای روش‌های خود قرار می‌دهد اما با استفاده از رخدادهای محتمل‌الوقوع در آینده از دید کارشناسان سعی در بهبود پیش‌بینی کمی اولیه دارد. تحلیل اثر روند یکی از پرکاربردترین روش‌های مطالعات آینده است. از این روش می‌توان برای پیش‌بینی، برنامه‌ریزی احتمالی، تحلیل گزینه‌های سیاسی، برنامه‌ریزی استراتژیک و یا سناریوسازی استفاده کرد [۱۴] و [۱۵].

برای انجام این روش دو مرحله اصلی باید طی شود. در مرحله اول با استفاده از داده‌های موجود درباره موضوع مطالعه یک برون‌یابی انجام می‌شود تا یک پیش‌بینی اولیه حاصل شود. در گام بعدی با استفاده از نظر خبرگان، رویدادهایی را که در آینده احتمال وقوع دارند شناسایی می‌شوند. با اعمال تأثیر این رویدادها بر پیش‌بینی انجام گرفته، نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. پس در حالت کلی دو گام ذیل مورد نیاز است:

رسم یک منحنی بر اساس داده‌های تاریخی به‌منظور روشن شدن روند آینده

استفاده از قضاوت خبرگان در مورد اتفاقات احتمالی آینده. قضاوت و ابتکار برای مرحله دوم ضروری است.

در این مرحله، برون‌یابی بدون غافل‌گیری و با احتساب اتفاقات مهمی که در آینده امکان رخ دادن دارند، تصحیح می‌شود. ابتدا لیستی از رویدادهای بالقوه تهیه می‌شود. این رویدادها باید قابل قبول، دارای تأثیر شدید و قابل اثبات در نگاه به گذشته باشند. منبع چنین لیستی از رویدادها می‌تواند شامل مرور ادبیات، به‌کارگیری روش دلفی و یا توافق میان خبرگان باشد. رخدادهای انتخاب‌شده شامل مجموعه‌ای از نیروهای بالقوه است می‌توانند باعث انحراف روند آینده از حالت بدون اتفاق شوند. چندین قضاوت درباره هر رخداد انجام می‌شود. ابتدا تخمینی از احتمال وقوع هر رخداد به‌عنوان تابعی از زمان محاسبه می‌شود. سپس تأثیر هر رخداد روی روند مطالعه تخمین زده می‌شود. تأثیرات را می‌توان به روش‌های مختلف بیان کرد.

مطابق شکل ۴-۱ یک روش شامل بازه‌های زمانی است از لحظه وقوع رویداد تأثیرگذار تا زمانی که :

روند تحت تأثیر آن رویداد قرار گیرد.

تأثیر رویداد روی روند به حداکثر میزان خود برسد.

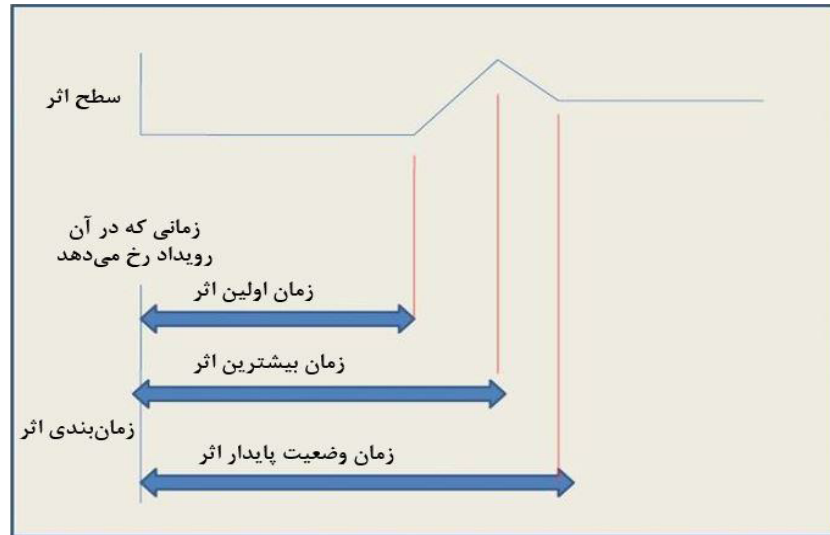
تأثیر رویداد به یک حد نهایی یا مقدار ثابت ثابت برسد.

یا با توجه به اندازه:

بزرگ‌ترین تأثیر

وضعیت پایدار تأثیر

هر کدام از سه زمان مشخص شده و دو اندازه تأثیری که مرتبط با آن‌هاست کاملاً مستقل در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال تأثیر نهایی می‌تواند مثبت و وضعیت پایدار می‌تواند منفی باشد یا وضعیت پایدار می‌تواند صفر باشد و تأثیر موقتی باشد. شکل تأثیر می‌تواند حالات دیگری نیز داشته باشد ولی در اکثر موارد ۵ حالت صدرالذکر کفایت می‌کند.



شکل ۴-۱: پارامترهای کلی تأثیر رویدادها

۳-۶-۱- نحوه پیاده‌سازی مطالعات آینده در پروژه حاضر

با عنایت به ویژگی‌های روش‌های مختلف مطالعات آینده و همچنین جلسه برگزار شده با کارشناسان گروه پژوهشی آینده‌نگاری و سیاست‌پژوهی پژوهشگاه نیرو که صورت جلسه آن در شکل ۵-۱ نمایش داده شده است، روش‌های متن‌کاوی و تحلیل اثر روند برای انجام آینده‌پژوهی پروژه حاضر انتخاب شده است. در این جلسه، نظرات ارزشمند کارشناسان گروه پژوهشی آینده‌نگاری و سیاست‌پژوهی دریافت گردید و مشخصات روش‌های مختلف آینده‌پژوهی مناسب برای اجرای پروژه حاضر بررسی گردید. با توجه به مباحث مطرح شده در جلسه مذکور و بررسی انجام شده توسط همکاران پروژه حاضر، پایگاه داده اسکوپوس^۱ برای انجام متن‌کاوی و تحلیل اثر روند انتخاب گردید.

^۱ SCOPUS

تاریخ: ۱۳۹۷/۱۱/۱۳ شماره: پیوست: ندارد		صور تجلسه MQF03-0		پژوهشگاه نیرو	
مرحله:		گروه:		موضوع جلسه: هم‌اندیشی اعضای تیم تحقیقاتی پروژه "کاربرد یادگیری ماشین در سیستم قدرت" با کارشناسان گروه آینده پژوهی پژوهشگاه نیرو	
حاضران: یکتا مهملی - مرتضی تقیان زاده - محمدرضا بنیر - رکن‌الاحق - دکتر جباری					
آغاز: ۱۴:۱۵		پایان: ۱۷:۱۵		غایبان:	
دستور جلسه: مشورت و استفاده از نظرات کارشناسان آینده‌پژوهی در خصوص انتخاب روش مناسب آینده‌پژوهی برای اجرای پروژه تحقیقاتی "کاربرد یادگیری ماشین در سیستم‌های قدرت"					
توضیحات		عناوین			
دستور جلسه بعد:					
ردیف	عناوین	اقدام / پیگیری	مسئول	نتیجه / تاریخ	
۱	روش‌های ۱- Text mining (متون‌یادگیری، علمی و -)				
۲	۲- Patent analysis (تحلیل حقوق‌پاتنت)				
۳	۳- (علم سنجی)				
۴	۴- آمار و احتمال و منطق فازی و منطق فازی				
۵	۵- ریشه‌یابی و تحلیل علل (فاز مقرر)				
۶	۶- ریشه‌یابی و تحلیل علل (فاز مقرر)				
۷	۷- ریشه‌یابی و تحلیل علل (فاز مقرر)				
۸					
۹					
۱۰					
نام و امضای اعضای حاضران جلسه:					

شکل ۵-۱: صورت جلسه اعضای همکار در پروژه حاضر با کارشناسان آینده‌نگاری و سیاست‌پژوهی پژوهشگاه نیرو

داده کاوی یا کشف دانش در پایگاه داده، رویکردی است که به واسطه آن، الگوهای جالب و مفهومی از مجموعه بزرگی از داده‌های استخراج می‌شود. متن کاوی یکی از زمینه‌های داده کاوی می‌باشد که شباهت بسیار زیادی با داده کاوی دارد با این تفاوت که ابزارهای داده کاوی برای مدیریت داده‌های ساختاریافته طراحی شده‌اند، اما متن کاوی می‌تواند بر مجموعه‌ای از داده‌های نیمه

ساختاریافته و ساختارنیافته نیز استخراج الگوها و روندهای جدید تمرکز کند. در حقیقت داده‌کاوی به دنبال استخراج اطلاعات مفید از اشکال مختلف داده است و به‌طور معمول در تجزیه و تحلیل داده‌های عددی کاربرد دارد. این در حالی است که روش متن‌کاوی بیشتر به پردازش و تحلیل داده‌های متنی می‌پردازد. در مقایسه با داده‌کاوی، متن‌کاوی به دنبال آن است که اطلاعات مفید را از منابع موجود استخراج کرده و الگوهای موردنظر را شناسایی کند. از دیدگاه این روش، منبع داده‌های موردنیاز مجموعه‌ای از اسناد معتبر هستند [۱۶].

تاکنون، بسیاری از محققان تجربه موفقیت‌آمیزی در استفاده از روش‌های متن‌کاوی برای تجزیه و تحلیل حجم وسیعی از داده‌های متنی در حوزه کسب و کار، علوم پزشکی، آموزش و پرورش، مدیریت منابع انسانی، فناوری، مدیریت دانش و ... داشته‌اند. با عنایت به اینکه پایگاه داده اسکوپوس بزرگ‌ترین و معتبرترین نمایه استنادی جهان است، لذا برای طبقه‌بندی موضوعی و اجرای روش متن‌کاوی و نمایش روندها در مرحله سوم پروژه حاضر از این پایگاه داده استفاده خواهد شد [۱۷]. این پایگاه داده دارای یک ابزار بسیار قوی علم‌سنجی به نام سای‌ول^۱ و Analysis search results است که با استفاده از آن‌ها می‌تواند نمودارهای مختلف را برای تجزیه و تحلیل روند هر موضوعی در یک سیر تاریخی تجزیه و تحلیل کرد. لذا ابتدا کلیدواژه‌های مناسب با استفاده از مرور ادبیات موضوع پژوهش حاضر استخراج می‌شود. سپس این کلیدواژه‌ها و ترکیب آن‌ها برای اجرای متن‌کاوی با استفاده از جعبه‌ابزارهای تحلیل پایگاه داده اسکوپوس به کار گرفته می‌شوند. در مرحله بعد، پس از متن‌کاوی دقیقی که توسط جعبه‌ابزارهای تحلیل پایگاه داده اسکوپوس انجام می‌شود، نمودار روندهای مختلف در حوزه پژوهشی پروژه حاضر استخراج می‌گردد. ترسیم این نمودارها جزئی از روش تحلیل اثر روند است. بعد از دستیابی به روندها، با استفاده از نظر همکاران و خبرگان به قضاوت در مورد آن‌ها پرداخته می‌شود و از این طریق شکاف‌های پژوهش و نیز بسترهای مطالعاتی جدید در حوزه موضوع پژوهی پروژه حاضر شناسایی می‌شود. البته باید توجه داشت که استفاده از پایگاه داده اسکوپوس رایگان نیست.

۷-۱- ابزار علم‌سنجی سای‌ول در اسکوپوس

اسکوپوس بزرگ‌ترین پایگاه چکیده و نمایه‌های استنادی جهان است و یکی از ابزارهای سریع و جامع برای جستجوی منابع علمی به‌شمار می‌رود. اسکوپوس یکی از محصولات ناشر هلندی الزویر (Elsevier) است. در واقع این پایگاه، بزرگ‌ترین پایگاه داده‌های استنادی علوم شامل مجلات علمی، کتاب‌ها و مقالات کنفرانس است. این پایگاه ابزار خوبی برای پژوهشگران در حوزه‌های مختلف است و میزان استنادهای مقاله‌ها و کتاب‌ها به همراه متن آن‌ها را در اختیار قرار می‌دهد. به عبارت دیگر علاوه بر جستجو و دسترسی به مقالات معتبر می‌توان فعال‌ترین نویسندگان، سازمان‌ها، مراکز تحقیقاتی و مجلات بسیار معتبر را که در کلاس‌های آکادمی تحلیل آماری به صورت مداوم بر آن‌ها تاکید می‌شود را در حوزه موضوعی خاص مشخص کرد. این پایگاه با پوشش میان رشته‌ای وسیع خود، مجلات علمی، کتب و مجموعه مقالات کنفرانس را در زمینه‌های تکنولوژی، پزشکی، علوم اجتماعی، هنر و علوم انسانی ارائه می‌دهد. همچنین امکان جستجو در ثبت اختراعات و خلاصه کتب و دانش نامه‌ها را دارا است. پایگاه اسکوپوس اطلاعات کتاب‌شناختی بیش از ۵۶ میلیون سند از بیش از ۵۰۰۰ ناشر جهان را جمع‌آوری کرده است. در مجموع این پایگاه اطلاعات بیش از ۲۰۰۰۰ مجله علمی پژوهشی را در خود نمایه کرده است. همچنین اسکوپوس امکان جستجو در مقالات Article-in-press (مقالاتی که برای چاپ، پذیرش شده اند ولی هنوز به مرحله چاپ نرسیده اند) را نیز فراهم کرده است.

پایگاه استنادی اسکوپوس دارای یک ابزار تحلیل قدرتمند تحت عنوان سای‌ول است که برای انجام مطالعات آماری آینده‌پژوهی از طریق مرور سیستماتیک و ترسیم روندها و نمودارها بسیار مناسب است. پایگاه سای‌ول تحت مالکیت الزویر یکی از حرفه‌ای‌ترین و قوی‌ترین ابزارهای علم‌سنجی برای سازمان‌های پژوهشی و دانشگاه‌ها محسوب می‌شود. این ابزار قدرتمند و انعطاف‌پذیر این

¹ Scival

امکان را فراهم می‌کند تا کارایی تحقیق و پژوهش، ارزیابی مربوط به همکاری مؤسسه‌ها، روند جدید تحقیقات در حال ظهور و گزارش‌های منحصر به فرد شناسایی و تحلیل شود. سای‌ول از جهت عملکرد با پایگاه استنادی incites که موسسه اطلاعات علمی ISI عرضه می‌کند قابل مقایسه است و در واقع این دو، رقیب جدی یکدیگر محسوب می‌شوند. پایگاه سای‌ول که برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ معرفی شد، امکان تجزیه و تحلیل‌های استنادی پیشرفته و عمیق را بر مبنای داده‌های پایگاه اسکوپوس فراهم می‌سازد؛ به این ترتیب، پایگاه استنادی سای‌ول یک نمایه استنادی محسوب نمی‌شود، بلکه یک پایگاه استنادی تجزیه و تحلیل پژوهشی است که همچون incites، امکان مقایسه نتایج بدست آمده را با میانگین‌ها و استانداردهای جهانی ایجاد می‌کند. به این ترتیب، با استفاده از سای‌ول می‌توان عملکرد پژوهشی یک پژوهشگر، سازمان، کشور، منطقه، مجله، گروه پژوهشی و مانند آنها را ارزیابی کرد. همچنین استفاده از این پایگاه، در مطالعات علم سنجی از جایگاهی مؤثر برخوردار است. داده‌ها در اسکوپوس روزانه و در سای‌ول هر هفته به‌روزرسانی می‌شود. سای‌ول یک کپی از داده‌های پایگاه اسکوپوس را دریافت می‌کند که سپس داده‌ها به منظور بهینه‌سازی معیارها و قابلیت‌های آن ساختار بندی می‌شود.



عمده کاربران سای‌ول عبارتند از:

- محققان
- مدیران پژوهشی
- تحلیل‌گران پژوهشی

پایگاه اطلاعاتی سای‌ول، پنج نوع سازمان را در تجزیه و تحلیل خود استفاده می‌کند که عبارتند از:

- دانشگاهی: دانشگاه کالج، دانشکده پزشکی و مؤسسه‌های تحقیقاتی
- شرکت: شرکت‌های بزرگ و شرکت‌های حقوقی
- دولت: دولت و سازمان‌های نظامی
- پزشکی: پزشکی و بیمارستان
- دیگر: سازمان‌های غیردولتی

پایگاه سای‌ول تجزیه و تحلیل موارد زیر را امکان‌پذیر می‌سازد:

- ❖ عملکرد پژوهشی افراد، گروه‌های تحقیقاتی و مؤسسه‌ها

❖ عملکرد پژوهشی شبکه‌های همکاری‌های علمی در حوزه‌ها و موضوعات تحقیقاتی مختلف

با استفاده از سای‌ول می‌توان عملکرد پژوهشی یک پژوهشگر، سازمان، کشور، منطقه، مجله، گروه پژوهشی و مانند آن‌ها را در ۴ بخش زیر ارزیابی کرد:

- Overview: دریافت بررسی جامعی از عملکرد پژوهشی موسسه‌ها، کشورها و گروهی از محققان
- Benchmarking: مقایسه و تطبیق مؤسسات، پژوهشگران و گروهی از محققان با یکدیگر با استفاده از شاخص‌های سنجش مختلف
- Collaboration: کاوش شبکه همکاری مؤسسات با یکدیگر
- Trends: دریافت روند و سیر تاریخی حوزه‌های مختلف تحقیقاتی و ارتباط اجزای درون آن‌ها با یکدیگر و همچنین دریافت اطلاعات جامعی همچون اسامی محققان، مؤسسات، همکاری‌های علمی و ... در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی و میزان مشارکت آن‌ها و ...
- Reporting: ایجاد گزارش غنی به‌ویژه در جهت پشتیبانی از استراتژی و گرایش تحقیقاتی متمایز مؤسسات مختلف سای‌ول همچنین به استنادهای خروجی علمی اختراعات نگاه می‌کند و پیوندهای مربوط به هر دو استناد پروانه‌های ثبت اختراع و استناد مقاله‌های پایگاه اسکوپوس را فراهم می‌کند. این ارتباط بین علم و صنعت و همچنین جریان دانش کمک می‌کند تا این ابزار به‌عنوان یک شاخص قوی برای نشان دادن تأثیر تحقیقات بر صنعت به حساب آید. داده‌های ثبت اختراع در دسترس عموم قرار دارد و برای تحلیل آماری برای اندازه‌گیری نوآوری، روند تکنولوژی و فعالیت‌های تحقیق و توسعه و غیره استفاده می‌شود. سای‌ول پروانه‌های ثبت اختراع بزرگ‌ترین سازمان‌های ثبت اختراع را پوشش می‌دهد که شامل: اداره ثبت اختراع اروپا (EPO)، سازمان ثبت اختراع ایالات متحده آمریکا (USPTO)، دفتر مالکیت معنوی انگلستان (IPO)، دفتر ثبت اختراعات ژاپن (JPO) و سازمان مالکیت معنوی جهانی (WIPO) و ... است.

۸-۱- جمع‌بندی

در این گزارش، متدلوژی‌های مناسب جهت شناسایی کاربردهای دانشی و فناورانه یادگیری ماشین در مطالعات سیستم‌های قدرت مدرن معرفی گردید. با توجه به ماهیت آینده‌پژوهی پروژه حاضر، بررسی مختصری از مفهوم و تعریف مطالعات آینده‌ارائه و سپس عناوین متدلوژی‌های مطالعات آینده با استفاده از مراجع معتبر علمی نقشه راه گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت معرفی شد. در آخر، بر اساس ویژگی‌های روش‌های مختلف مطالعات آینده و همچنین جلسه برگزارشده با کارشناسان گروه پژوهشی آینده‌نگاری و سیاست‌پژوهی پژوهشگاه نیرو مقرر گردید ابزار علم‌سنجی سای‌ول در پایگاه داده اسکوپوس برای انجام متن‌کاوی و تحلیل اثر روند مورد استفاده قرار گیرد. به منظور شناسایی کاربردهای روش‌های مختلف یادگیری ماشین در مطالعات سیستم‌های قدرت، تحلیل قابلیت‌های انواع تکنیک‌های یادگیری ماشین و ابزارهای مناسب برای پیاده‌سازی آن‌ها ضروری بوده و در مرحله دوم پروژه بررسی خواهد شد.

۹-۱- مراجع

- [1] W. Bell, Foundations of futures studies: human science for a new era: values, objectivity, and the good society, *Transaction Publishers*, 2011.
- [۲] س. شکوهیار، ع. مهماندوست، "ترسیم افق داده‌کاوی از طریق آینده‌پژوهی"، فصلنامه آینده‌پژوهی مدیریت (پژوهش‌های مدیریت)، شماره ۲۱، ص ص ۹۹-۱۲۰، ۱۳۹۴.
- [۳] "آشنایی با مبانی آینده‌پژوهی"، دفتر مطالعات و پژوهش‌های اداری، مرکز آموزش و پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری سازمان برنامه و بودجه کشور.
- [۴] "نگاهی به مقوله آینده‌پژوهی در ایران و جهان"، روزنامه شهروند، سال چهارم، شماره ۹۲۰، ص ص ۱۰، ۳ تیر ۱۳۹۵.
- [۵] م. مولایی، "مقایسه الگوهای سازمان‌دهی روش‌ها و تکنیک‌های آینده‌پژوهی"، نخستین کنفرانس ملی آینده‌پژوهی، مدیریت و توسعه، تهران، ۱۳۹۳.
- [۶] "نقشه راه گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت- پژوهشگاه نیرو"، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۵.
- [۷] م. خسروی، "روش‌های آینده‌پژوهی"، آکادمی استراتژی ایران، ۱۳۹۸.
- [۸] ع. پدرام و همکاران، "آینده‌پژوهی، مفاهیم و روش‌ها"، مرکز آینده‌پژوهی علوم و فناوری دفاعی مؤسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی، ۱۳۸۸.
- [۹] ا. حاجیانی، ا. سیاح مفضلی، "مقدمه‌ای بر مفاهیم و ابزارهای روش تحلیل جایگزین در آینده‌پژوهی"، دومین همایش ملی آینده‌پژوهی، تهران، ۱۳۹۲.
- [۱۰] م. رضائیان، ن. جلیلیان، "متن‌کاوی، ابزاری مؤثر در آینده‌پژوهی: معرفی روش و مرور ادبیات"، سومین همایش ملی آینده‌پژوهی، تهران، ۱۳۹۳.
- [11] A. S. Hotho, S. G. Stumme, "Ontologies improve Text document clustering", In Proc. Third IEEE international conference on data mining, pp.541-544, USA, 2003.
- [12] S. M. Weiss, N. Indurkha, and T. Zhang, Fundamentals of predictive text mining, Springer, 2015.
- [۱۳] ا. آقا کاردان، م. کیهانی نژاد، "ارائه مدلی برای استخراج اطلاعات از مستندات متنی، مبتنی بر متن‌کاوی در حوزه یادگیری الکترونیکی"، فصلنامه علمی-پژوهشی فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران، سال چهارم، دوره‌های ۱۱ و ۱۲، ص ص ۴۷-۵۴، ۱۳۹۱.
- [۱۴] ف. میرشاه ولایتی، ف. نظری‌زاده، پویش محیطی، مؤسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی، مرکز آینده‌پژوهی علوم و فناوری‌های دفاعی، تهران، ۱۳۸۹.
- [۱۵] ع. ا. عباسعلی، ح. ساکن، م. بهرامی، "تحلیل تأثیر روند در آینده‌پژوهی"، سومین همایش ملی آینده‌پژوهی، تهران، ۱۳۹۳.
- [16] M. Santo, et al., "Text mining as a valuable tool in foresight exercises: A study on nanotechnology, Technological Forecasting & Social Change", Technological Forecasting and Social Change, vol. 83, no. 8, pp. 1013-1027, 2006.
- [17] <https://www.scopus.com/>

شناسایی و تحلیل قابلیت‌های انواع تکنیک‌های یادگیری ماشین و ابزارهای مناسب برای پیاده‌سازی آن‌ها

فصل ۲- فناوری هوش مصنوعی

۱-۲- مقدمه

کشورهای مختلف مانند آمریکا، چین، انگلیس، آلمان، ژاپن و کره جنوبی به طور فعال در حال توسعه نسل جدید از فناوری هوش مصنوعی^۱ (AI) هستند و استراتژی‌ها، برنامه‌ها و دستورالعمل‌های توسعه هوش مصنوعی را برای به دست آوردن فرصت‌هایی که از این طریق استفاده می‌شود، ساخته‌اند. آمریکا توسعه هوش مصنوعی را به یک استراتژی ملی ارتقا داده است. در نوامبر ۲۰۱۵، مرکز مطالعات استراتژیک و بین‌المللی (CSIS) گزارشی با عنوان Defense 2045 منتشر کرد که در آن ۱۰ فناوری نوظهور حاوی تکنیک‌های پیشرفته محاسبات AI قرار گرفت. کره جنوبی آزمایشگاه AI Star را در سال ۲۰۱۵ تأسیس کرد و این نشان می‌دهد که پروژه AI به یکی از ۵ محور اصلی کره جنوبی تبدیل خواهد شد. در چین، نسل جدید هوش مصنوعی نیز به سطح استراتژی ملی رسیده است. در ژانویه سال ۲۰۱۷، شورای ملی^۲ سه نقطه عطف و وظایف اصلی استراتژی توسعه هوش مصنوعی نسل جدید چین را روشن کرد. علاوه بر این، گزارش "نوآوری علوم و فناوری در افق ۲۰۳۰: پروژه‌های اصلی وزارت علوم و فناوری چین" نسل جدیدی از هوش مصنوعی مبتنی بر تغییرات قابل توجه در محیط اطلاعات جدید را تعریف کرده است [۱].

با توجه به مطالب فوق، می‌توان دریافت که توسعه هوش مصنوعی یک هدف استراتژیک برای توسعه آینده علمی و فناوری در کشورها است. در میان فناوری‌های مختلف هوش مصنوعی، بدون شک فناوری «یادگیری ماشین»^۳ (ML)، هسته (جزء) آفریننده هوش مصنوعی اصلی است. یادگیری ماشین توسط دانشمندان و آمارشناسان به عنوان فرآیند تخمین مدلی که دقیقاً یک مشکل دنیای واقعی را با احتمال خاصی از یک مجموعه داده که توسط مشاهدات محدود در یک محیط ارائه می‌دهد، دیده می‌شود. در این فصل، هوش فناوری هوش مصنوعی توضیح داده شده و تاریخچه ظهور و سیر تکاملی آن ارائه خواهد شد. همچنین در انتهای فصل، جایگاه ایران بر اساس نظام رتبه‌بندی سایمگو^۴ در حوزه هوش مصنوعی بررسی می‌شود.

۲-۲- تاریخچه هوش مصنوعی

هوش مصنوعی توسط فلاسفه و ریاضی‌دانانی نظیر جرج بول که اقدام به ارائه قوانین و نظریه‌هایی در مورد منطق نمودند، مطرح شده بود. با اختراع رایانه‌های الکترونیکی در سال ۱۹۴۳، فناوری هوش مصنوعی دانشمندان آن زمان را به چالشی بزرگ فراخواند. در این شرایط، چنین به نظر می‌رسید که این فناوری قادر به شبیه‌سازی رفتارهای هوشمندانه خواهد بود. با وجود مخالفت گروهی از متفکرین با هوش مصنوعی که با تردید به کارآمدی آن می‌نگریستند تنها پس از چهار دهه، شاهد تولد ماشین‌های شطرنج باز و دیگر سامانه‌های هوشمند در صنایع گوناگون شدیم [۲].

هوش مصنوعی را باید عرصه پهنای تالاقی و ملاقات بسیاری از دانش‌ها، علوم، و فنون قدیم و جدید دانست. ریشه‌ها و ایده‌های اصلی آن را باید در فلسفه، زبان‌شناسی، ریاضیات، روان‌شناسی، عصب‌شناسی، فیزیولوژی، تئوری کنترل، احتمالات و بهینه‌سازی جستجو کرد و کاربردهای گوناگون و فراوانی در علوم رایانه، علوم مهندسی، علوم زیست‌شناسی و پزشکی، علوم اجتماعی و بسیاری از علوم دیگر دارد.

حوزه پژوهش در زمینه هوش مصنوعی در یک کارگاه آموزشی در کالج دارتموت در سال ۱۹۵۶ متولد شد [۳]. اصطلاح هوش مصنوعی برای اولین بار توسط جان ماکارتی که از آن به عنوان پدر علم و دانش تولید ماشین‌های هوشمند یاد می‌شود در سال

¹ Artificial Intelligence (AI)

² State council

³ Machine Learning (ML)

⁴ SCImago

۱۹۵۶ میلادی استفاده شد. وی مخترع یکی از زبان‌های برنامه‌نویسی هوش مصنوعی به نام lisp است. با این عنوان می‌توان به هویت رفتارهای هوشمندانه یک ابزار مصنوعی پی برد. حال آنکه هوش مصنوعی به عنوان یک اصطلاح عمومی پذیرفته شده که شامل محاسبات هوشمندانه و ترکیبی (مركب از مواد مصنوعی) است. آلن نیول (دانشگاه کارنگی ملون)، هربرت سیمون (دانشگاه کارنگی ملون)، جان مک‌کارتی (مؤسسه فناوری ماساچوست)، ماروین منسکی (مؤسسه فناوری ماساچوست) و آرتور ساموئل (آی بی ام) از بنیان‌گذاران و رهبران پژوهش در زمینه هوش مصنوعی شدند. آن‌ها به همراه دانشجویانشان برنامه‌هایی نوشتند که مطبوعات آن را «شگفت‌آور» توصیف می‌کردند، رایانه‌ها استراتژی‌های برنده‌شدن بازی چکرز را فرامی‌گرفتند. سوالاتی در مسائل جبری حل می‌کردند، قضیه‌های منطقی اثبات می‌کردند، و انگلیسی صحبت می‌کردند [۴]–[۷].

طبق تعریف اولیه ارائه شده از سوی جان ماکارتی در سال ۱۹۵۶، «هوش مصنوعی شامل ماشین‌هایی می‌شود که توانایی انجام کارهایی را دارند که تنها با ویژگی هوش انسان قابل اجرا هستند». در حالی که این تعاریف کلی است ولی، شامل مواردی همچون برنامه‌ریزی، یادگیری زبان، تشخیص اشیاء و صدا، یادگیری و حل کردن مشکلات است.

در هر حال فعالیت‌های عمده در این زمینه از سال ۱۹۶۰ میلادی شروع شد. بیشتر کارهای پژوهشی اولیه در هوش مصنوعی بر روی انجام ماشین‌های بازی‌ها و نیز اثبات قضیه‌های ریاضی با کمک رایانه‌ها بود. در آغاز چنین به نظر می‌آمد که رایانه‌ها قادر خواهند بود چنین فعالیت‌هایی را تنها با بهره‌گرفتن از تعداد بسیار زیادی کشف و جستجو برای مسیرهای حل مسئله و سپس انتخاب بهترین روش برای حل آن‌ها به انجام رسانند. در اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی وزارت دفاع آمریکا سرمایه‌گذاری‌های سنگینی در حوزه پژوهش در زمینه هوش مصنوعی انجام داد. در آن دهه آزمایشگاه‌های فراوانی در سراسر جهان تأسیس شد. بنیان‌گذاران هوش مصنوعی در مورد آینده خوش‌بین بودند: هربرت سیمون پیش‌بینی کرد «ماشین‌ها ظرف بیست سال قادر به انجام هر کاری هستند که یک انسان می‌تواند انجام دهد». ماروین مینسکی، نوشت: «در طی یک نسل مسئله هوش مصنوعی اساساً حل خواهد شد».

به طور کلی، هوش مصنوعی به عنوان موضوعی میان رشته‌ای شامل تئوری روش‌شناسی، فناوری و برنامه‌های کاربردی سیستم است که ادغام فرمان‌شناسی (سایبرنتیک)، انفورماتیک، علوم رایانه، منطق ریاضی، نوروفیزیولوژی و سایر رشته‌ها را شامل می‌شود و از آن برای شبیه‌سازی، گسترش و کشش هوش انسانی استفاده می‌شود. هدف نهایی هوش مصنوعی این است که کامپیوترها بتوانند به اندازه انسان‌ها فکر کنند و به آن عمل کنند و در نهایت، تقویت هوش انسانی. هوش مصنوعی به خصوص در مرتب‌سازی از طریق داده‌ها، یافتن الگوها و پیش‌بینی‌ها بسیار مناسب است. به عبارت دیگر هوش مصنوعی به سیستم‌هایی گفته می‌شود که می‌توانند واکنش‌هایی مشابه رفتارهای هوشمند انسانی از جمله درک شرایط پیچیده، شبیه‌سازی فرآیندهای تفکری و شیوه‌های استدلالی انسانی و پاسخ موفق به آن‌ها، یادگیری و توانایی کسب دانش و استدلال برای حل مسایل را داشته باشند [۸].

در سال‌های اخیر، فناوری هوش مصنوعی با فناوری «یادگیری عمیق»^۱ (DL) به عنوان هسته اصلی خود، یک سری از پیشرفت‌ها را رقم زده است. به عنوان یک مسیر توسعه در آینده در کشورهای مختلف، فناوری هوش مصنوعی نقش اساسی در توسعه اقتصادی، تحول صنعتی و پیشرفت علمی و فناوری ایفا می‌کند.

۳-۲- تعریف و مفهوم هوش مصنوعی

هنوز تعریف دقیقی برای هوش مصنوعی که مورد توافق دانشمندان این علم باشد ارائه نشده است و این به هیچ وجه مایه تعجب نیست. چرا که مفهوم خود هوش هم هنوز به‌طور همه‌جانبه و فراگیر تعریف نشده است. در واقع می‌توان نسل‌هایی از

¹ Deep Learning (DL)

دانشمندان را در نظر گرفت که تمام دوران زندگی خود را صرف مطالعه و تلاش در راه یافتن جوابی به این سؤال عمده نموده‌اند که: هوش چیست؟

اینکه هوش مصنوعی چیست و چه تعریفی می‌توان از آن بیان نمود، مبحثی است که تاکنون دانشمندان به یک تعریف جامع در آن نرسیده‌اند و هریک تعریفی را ارائه نموده‌اند که در جدول ۱-۲ نمونه‌هایی از این تعاریف آمده‌است.

جدول ۱-۲: تعاریف مختلف هوش مصنوعی

سال	تعریف کننده	تعریف
۱۹۵۶	جان مک کارتی	هوش مصنوعی شامل ماشین‌هایی می‌شود که توانایی انجام کارهایی را دارند که تنها با ویژگی هوش انسان قابل اجرا هستند
۱۹۷۸	بلمن	خودکارسازی فعالیت‌هایی که ما آن‌ها را به تفکر انسانی نسبت می‌دهیم. فعالیت‌هایی مثل تصمیم‌گیری، حل مسئله، یادگیری و ...
۱۹۸۰	جان مک کارتی	هوش مصنوعی، دانش و مهندسی ساخت ماشین‌های هوشمند و به خصوص برنامه‌های رایانه‌ای هوشمند است. هوش مصنوعی با وظیفه مشابه استفاده از کامپیوترها برای فهم چگونگی هوش انسان مرتبط است، اما مجبور نیست خودش را به روش‌هایی محدود کند که بیولوژیکی باشند
۱۹۸۵	کارنیاک و مک درموت	مطالعه استعدادهای ذهنی از طریق مدل‌های محاسباتی
۱۹۸۵	هاگلند	تلاشی نو و مهیج برای اینکه کامپیوترها را قادر به فکر کردن کنیم. ماشین‌هایی با فکر و حس تشخیص واقعی
۱۹۹۰	کورزویل	هنر ایجاد ماشین‌هایی که وظایفی را انجام می‌دهند که انجام آن‌ها توسط انسان‌ها نیاز به هوش دارد
۱۹۹۰	شالکوف	یک زمینه تخصصی که به دنبال توضیح و شبیه‌سازی رفتار هوشمندانه به وسیله فرآیندهای کامپیوتری است
۱۹۹۱	ریچ و نایت	مطالعه اینکه چگونه کامپیوترها را قادر به انجام اعمالی کنیم که در حال حاضر، انسان آن اعمال را بهتر انجام می‌دهد
۱۹۹۲	وینستون	مطالعه محاسباتی که درک، استدلال و عمل کردن را توسط ماشین‌ها را ممکن می‌سازد

اکثر تعاریف‌هایی که در این زمینه ارائه شده‌اند بر پایه یکی از ۴ باور زیر هستند:

- سیستم‌هایی که به‌طور منطقی فکر می‌کنند
- سیستم‌هایی که به‌طور منطقی عمل می‌کنند
- سیستم‌هایی که مانند انسان فکر می‌کنند
- سیستم‌هایی که مانند انسان عمل می‌کنند

شاید بتوان هوش مصنوعی را این‌گونه توصیف کرد: «هوش مصنوعی عبارت است از مطالعه این که چگونه کامپیوترها را می‌توان وادار به کارهایی کرد که در حال حاضر انسان‌ها آن‌ها را صحیح یا بهتر انجام می‌دهند» [۸]. هوش مصنوعی به هوشی که یک ماشین از خود نشان می‌دهد یا به دانشی در کامپیوتر که سعی در ایجاد آن دارد گفته می‌شود. بیشتر نوشته‌ها و مقاله‌های مربوط به هوش مصنوعی آن را «دانش شناخت و طراحی عامل‌های هوشمند» تعریف کرده‌اند. یک عامل هوشمند، سیستمی است که با شناخت محیط اطراف خود، شانس موفقیت خود را بالا می‌برد.

هوشمندی مفهومی نسبی دارد و نمی‌توان محدوده صحیحی را برای ارائه تعریف از آن مشخص نمود. رفتاری که از نظر یک فرد هوشمند به نظر می‌رسد؛ ممکن است برای یک فرد دیگر این‌گونه به نظر نرسد. اما در مجموع خصوصیات زیر قابلیت‌های ضروری برای هوشمندی است:

- پاسخ به موقعیت‌های از قبل تعریف نشده با انعطاف بسیار بالا و بر اساس بانک دانش
 - معنا دادن به پیام‌های نادرست یا مبهم
 - درک تمایزها و شباهت‌ها
 - تجزیه و تحلیل اطلاعات و نتیجه‌گیری
 - توانمندی آموختن و یادگرفتن
 - برقراری ارتباط دوطرفه
- به فرض اینکه تعاریف بالا از هوشمندی پذیرفته شود، موارد زیر فهرستی است از وظایفی که از یک سیستم هوشمند انتظار می‌رود و تقریباً اکثر دانشمندان هوش مصنوعی بر آن توافق نظر دارند به شرح زیر است:
- تولید گفتار
 - تشخیص و درک گفتار (پردازش زبان طبیعی انسان)
 - دستورپذیری و قابلیت انجام اعمال فیزیکی در محیط طبیعی و مجازی
 - استنتاج و استدلال
 - تشخیص الگو و بازشناسی الگو برای پاسخ گویی به مسائل بر اساس دانش قبلی
 - شمایی گرافیکی یا فیزیکی جهت ابراز احساسات و عکس‌العمل‌های ظریف
 - سرعت عکس‌العمل بالا
- تحقیقات و جستجوهای انجام شده برای رسیدن به ساخت چنین ماشین‌هایی مرتبط با بسیاری از رشته‌های علمی دیگر می‌باشد، مانند علوم رایانه، روان‌شناسی، فلسفه، عصب‌شناسی، علوم ادراکی، تئوری کنترل، احتمالات، بهینه‌سازی و منطق.
- در جدول ۲-۲ تعریف عبارت هوش مصنوعی (Artificial intelligence) در واژه‌نامه‌های معتبر بین‌المللی آورده شده است. لازم به ذکر است این تعاریف عمداً به زبان اصلی (انگلیسی) نوشته شده‌اند. در همه تعاریف، بر شبیه‌سازی رفتار انسان تاکید شده است.

جدول ۲-۲: تعریف عبارت هوش مصنوعی (Artificial intelligence) در واژه‌نامه‌های معتبر

نام واژه‌نامه	تعریف عبارت هوش مصنوعی (Artificial intelligence)
Merriam-Webster's Advanced Learner's English Dictionary	1: a branch of computer science dealing with the simulation of intelligent behavior in computers 2: the capability of a machine to imitate intelligent <u>human behavior</u>
Oxford Advanced Learner's Dictionary	an area of study concerned with making computers copy intelligent <u>human behaviour</u>
Longman Dictionary of Contemporary English	the study of how to make computers do intelligent things that <u>people can do</u> , such as think and make decisions
Cambridge Advanced Learner's Dictionary	the study of how to produce machines that have some of the qualities that the <u>human mind</u> has, such as the ability to understand language, recognize pictures, solve problems, and learn

۴-۲- سیر تکاملی فناوری هوش مصنوعی

مطابق شکل ۱-۲ تحقیقات بر روی موضوع هوش مصنوعی، سه مرحله توسعه را پشت سر گذاشته است. اولین مرحله مربوط به دهه ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ میلادی است. در این مرحله، مفهوم هوش مصنوعی ارائه شد و تمرکز اصلی بر روی ترجمه ماشین^۱ و استدلال منطقی^۲ بود. منطق نمادین^۳ به سرعت پیشرفت نمود و سیستم‌های خبره^۴ و مهندسی دانش^۵ مسیر اصلی جریان تحقیقات را تشکیل دادند. بعد از سال ۱۹۶۰، تحقیقات چندین فراز و نشیب را تجربه کرد. در این مرحله، هربرت سیمون^۶ و آلن نیول^۷ یک سیستم اثبات قضیه خودکار به نام نگرشگر (تئوریسین) منطق^۸ ایجاد کردند که برای تکمیل اثبات کلیه قضایای موجود در کتاب Principia Mathematica در کمتر از ۲ ماه استفاده شد. به تدریج دانشمندان فهمیدند که توانایی استدلال منطقی به تنهایی برای رسیدن به سطح هوشمندی ماشین (دستگاه) کافی نیست. از این رو، مطالعه هوش مصنوعی وارد مرحله دوم خود شد [۱].

مرحله دوم از سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ به طول انجامید. در این مرحله، دانشمندان در نظر داشتند که آیا می‌توان دانش^۹ را خلاصه کرد و سپس به یک سیستم رایانه‌ای تحویل داد. آن‌ها عمدتاً تلاش داشتند تا دانش متخصصان انسانی را برای حل مشکلات خلاصه کنند. بنابراین، آن‌ها چنین دانش را در سیستم‌های رایانه‌ای تولید کردند تا سیستم‌های خبره‌ای بسازند که بتواند برای حل مشکلات واقعی استفاده شود. با این حال، به دلیل هزینه‌های بالای توسعه، این تحقیقات به کندی صورت گرفت. بنابراین، توسعه هوش مصنوعی وارد یک فرورفتگی دیگر شد. در این مرحله، محققان امیدوار بودند که دانش ضمنی در مجموعه داده‌ها را از طریق تکنیک‌های یادگیری ماشین مدل‌سازی کنند. بنابراین، تحقیقات اصلی هوش مصنوعی وارد مرحله سوم یعنی "مرحله یادگیری ماشین (ML)" شد که امروزه همچنان با تمرکز و سرعت بسیار زیاد ادامه دارد [۱].

مرحله سوم از دهه ۱۹۹۰ میلادی آغاز شد. نظم ML برای حل تنگناها در کسب دانش پدید آمد. در این مرحله، در سال ۱۹۹۷، کامپیوتر Deep Blue IBM برای اولین بار استاد بزرگ شطرنج جهان به نام "گری کاسپاروف"^{۱۰} را شکست داد و باعث شد تحقیقات هوش مصنوعی دوباره اوج بگیرد. پس از ورود به قرن ۲۱ میلادی، پیشرفت‌های حوزه یادگیری عمیق (DL) و فناوری داده‌های بزرگ، نسل جدیدی در تحقیقات هوش مصنوعی به وجود آورد. زمینه هوش مصنوعی امروزه به طور عمده تئوری و روش استفاده از رایانه‌ها برای تجزیه و تحلیل داده‌ها را مورد بررسی قرار داده و می‌تواند به عنوان تئوری و روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌های هوشمند در نظر گرفته شود.

به طور خاص، در سال ۲۰۰۶، هوش مصنوعی شروع به ورود به عصر هوش شناختی^{۱۱} کرد که بر تجمع^{۱۲} داده‌های بزرگ، نوآوری در الگوریتم‌های نظری، پیشرفت در قدرت محاسبات و یادگیری خودمختار (مستقل)^{۱۳} تأکید دارد.

هوش مصنوعی در بسیاری از کاربردها پیشرفت چشم‌گیری داشته است. در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ میلادی، جایزه A.M. Turing Award که بزرگ‌ترین جایزه در علوم کامپیوتر است، به دو دانشمند که در دو سال متوالی در پیشرفت تکنیک‌های

¹ Machine translation

² Logical reasoning

³ Symbolic logic

⁴ Expert systems

⁵ Knowledge engineering

⁶ Herbert Simon

⁷ Allen newel

⁸ Logic theorist

⁹ knowledge

¹⁰ Garry Kasparov

¹¹ Cognitive intelligence

¹² Accumulation

¹³ Autonomous

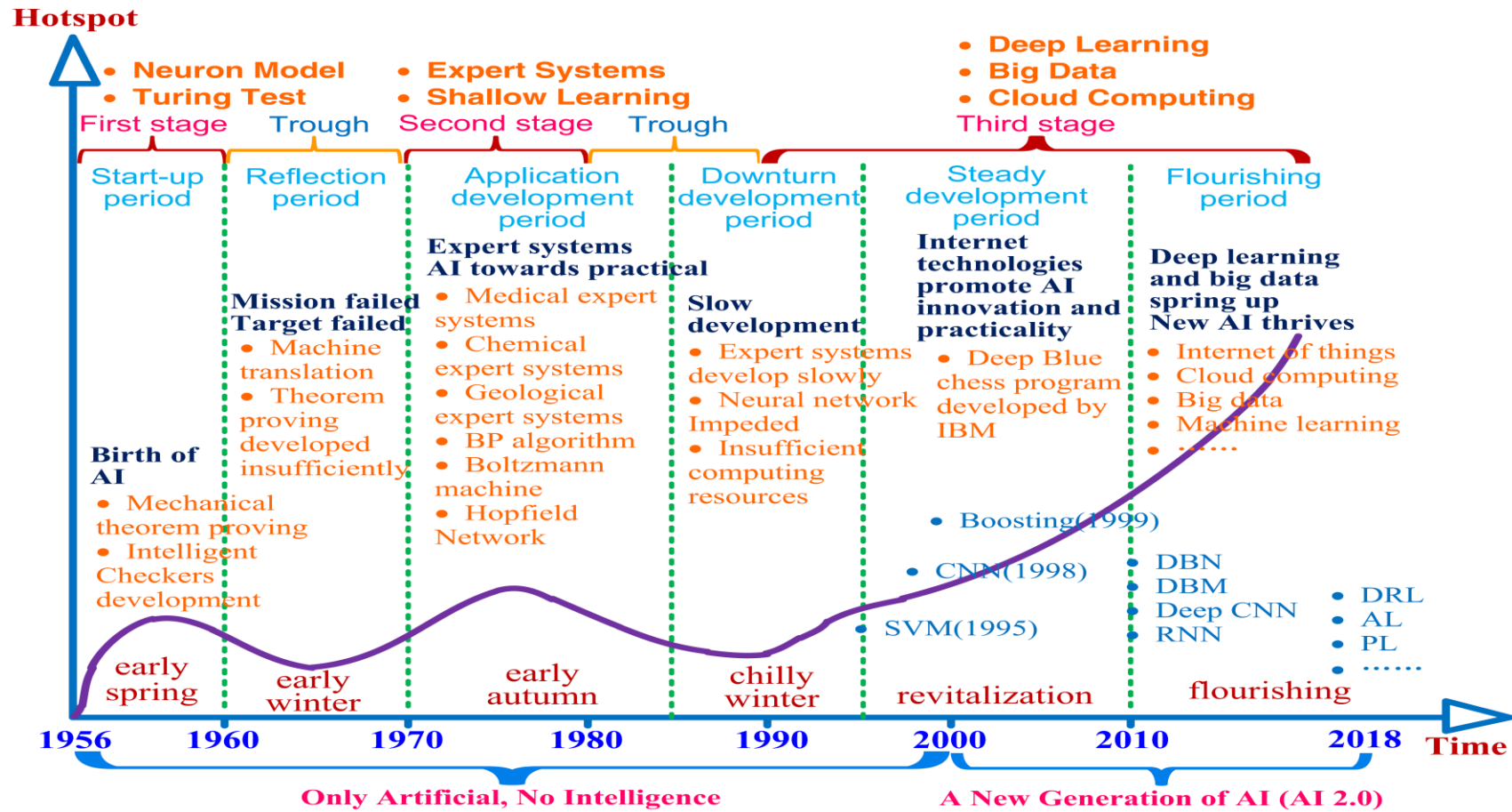
یادگیری ماشین سهم چشم‌گیری داشته‌اند اهدا شد. این اتفاق در اخذ این جایزه بزرگ بین‌المللی بسیار نادر است و مستقیماً نشان‌دهنده اهمیت یادگیری ماشین در زمینه هوش مصنوعی است.

در سال ۲۰۱۶، برنامه کامپیوتری AlphaGo کمپانی گوگل با نتیجه ۴ بر ۱ استاد بزرگ بازی "گو" (وی چی) یعنی "سدول لی"^۲ را شکست داد و این نشان از موفقیت بزرگ هوش مصنوعی پس از ۶۰ سال است. بلافاصله، در سال ۲۰۱۷، برنامه کامپیوتری AlphaGo کمپانی گوگل، با نتیجه ۳ بر صفر، "جی کی"^۳ را که در رده اول جهان قرار داشت شکست داد و این اتفاق به عنوان یک نقطه پایان در "جنگ ماشین و انسان" قرار گرفت.

^۱ گو، یا وی چی یکی از قدیمی‌ترین بازی‌های تخته‌ای تاریخ بشری است. این بازی که به صورت دونفره انجام می‌شود، علی‌رغم قوانین ساده‌ای که دارد راهبردهای (استراتژی‌های) پیچیده‌ای را می‌طلبد. بازی به این صورت انجام می‌گیرد که دو بازیکن به نوبت مهره‌های سیاه و سفید خود را در خانه‌های صفحه بازی که یک شبکه ۱۹ در ۱۹ مربعی است، قرار می‌دهند. وقتی مهره‌های روی صفحه قرار گرفت، نمی‌توان آن را حرکت داد مگر اینکه با مهره‌های رنگ مخالف به‌طور کامل محاصره شود. هدف بازی تصاحب سطح بیشتر از زمین بازی توسط مهره‌ها است. این بازی در شرق آسیا از محبوبیت بالایی برخوردار است

^۲ Sedol Lee

^۳ Jie Ke



شکل ۱-۲: سیر تکامل فناوری هوش مصنوعی [۱]



شکل ۲-۲: بازی گو (وی چی)

۱-۴-۲- مفهوم نسل جدید هوش مصنوعی

نسل جدید هوش مصنوعی، ویژگی‌های جدید مانند یادگیری عمیق، ادغام مرزی^۱، همکاری انسان و رایانه^۲، هوش ازدحام آزاد^۳ (SI) و کنترل مستقل و خودمختار را ارائه می‌دهد. با توسعه سریع اطلاعات، محاسبات و الگوریتم‌ها، هوش مصنوعی توسعه یافته است و وارد مرحله جدیدی به نام نسل جدید هوش مصنوعی (AI 2.0) شده است. در نسل جدید هوش مصنوعی، عمده تحقیقات بر روی تکنیک‌های یادگیری ماشین، پردازش زبان طبیعی^۴ (NLP)، پردازش صدا، پردازش تصویر و فیلم، تعاملات انسان و رایانه، سیستم‌های خبره و ... مطابق شکل ۲-۳ است [۱].

یادگیری دانش مبتنی بر داده‌های بزرگ، پردازش مشارکتی میان رسانه‌ای متقابل^۵، هوش افزایشی همکاری انسان و رایانه، هوش ادغام گروهی^۶ و سیستم‌های هوشمند مستقل، مطابق شکل ۲-۴ امروزه کانون توسعه هوش مصنوعی شده‌اند. هوش مغزی^۷ الهام گرفته از نتایج تحقیقات علوم مغز در حال بلوغ شدن است و روند توسعه تراشه‌های الکترونیکی، سایر دستگاه‌های سخت‌افزاری و توسعه بسترهای نرم‌افزاری روز به روز آشکارتر می‌شود. در مفاهیم مربوط به نسل جدید هوش مصنوعی، منابع داده، قدرت محاسبات و الگوریتم‌های اصلی (سه عنصر اصلی محرک توسعه هوش مصنوعی) هوش مصنوعی را از محاسبه هوش به ادراک سطح بالاتر و رشد هوش شناختی^۸ گسترش می‌دهند و ترویج تکنیک‌های عمومی را توسعه داده‌اند. به طور کلی، مفهوم نسل جدید هوش مصنوعی چهار جنبه اصلی دارد که عبارتند از:

➤ پایه شناخت مغز

¹ Cross-border integration

² Human-computer collaboration

³ Open swarm intelligence

⁴ Natural language processing

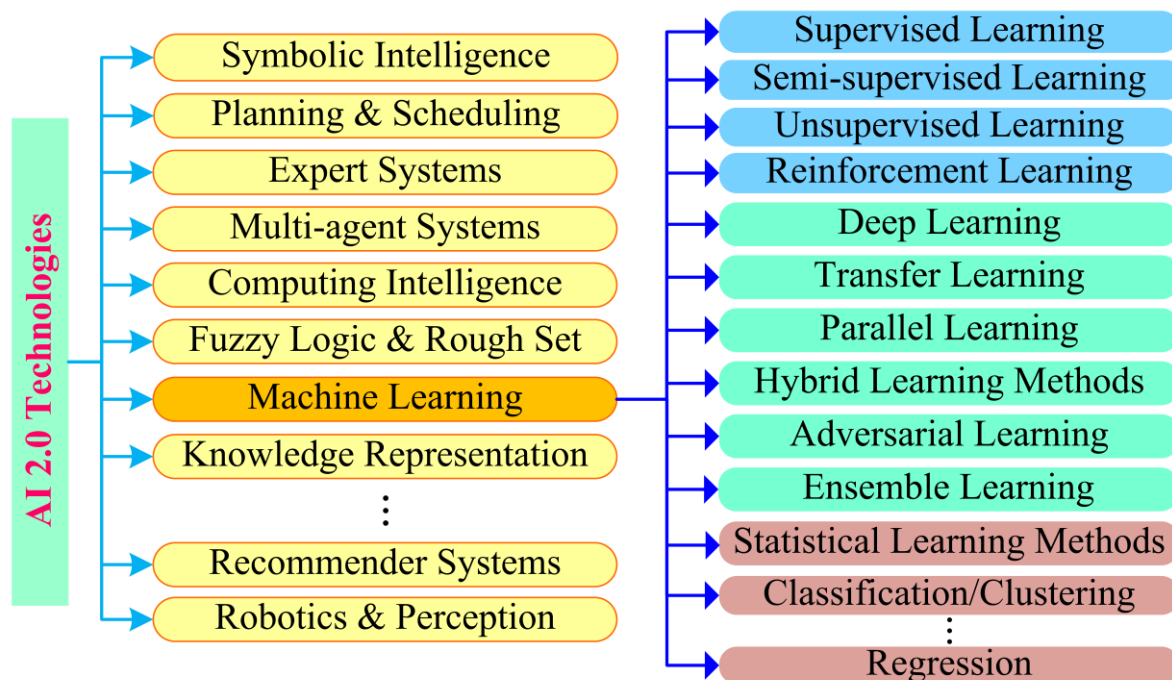
⁵ cross-media collaborative processing

⁶ group integration intelligence

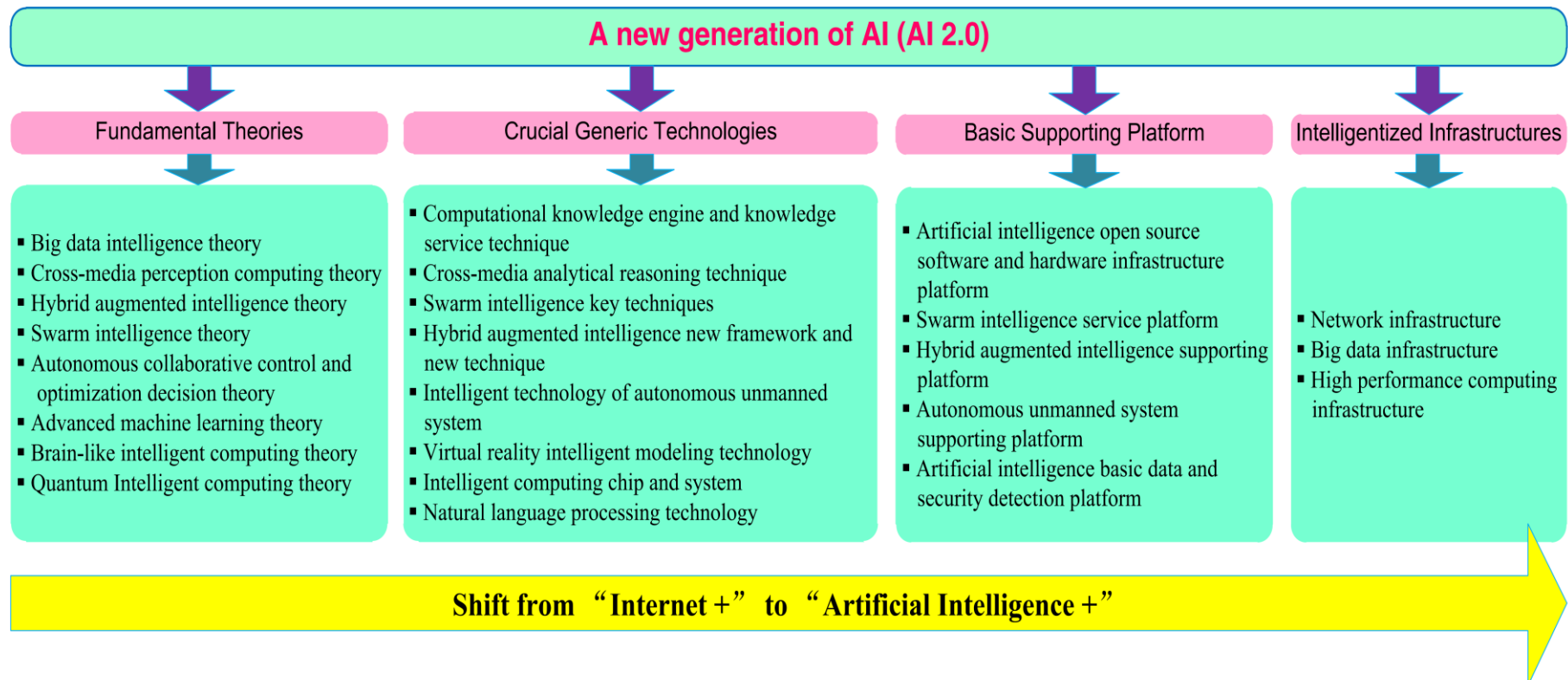
⁷ Brain-like intelligence

⁸ cognitive intelligence

- ادراک دستگاه و شناخت الگوی
- پردازش زبان طبیعی (NLP) و درک آن
- مهندسی دانش



شکل ۳-۲: شاخه‌های تحقیقات امروزه در زمینه نسل جدید هوش مصنوعی [۱]



شکل ۴-۲: محتویات اصلی نسل جدید هوش مصنوعی [۱]

بنابراین، هوش مصنوعی در دیدن، گوش دادن، گفتن، بازی کردن، تفکر و یادگیری و ... استفاده می‌شود که دارای طیف گسترده‌ای از حالات متنوع برنامه هستند. موفقیت برنامه کامپیوتری AlphaGo Zero گوگل نشان می‌دهد که الگوریتم‌ها نسبت به محاسبات خام و در دسترس بودن داده‌ها اهمیت بیشتری دارند. بنابراین، پیشرفت الگوریتم‌های یادگیری ماشین در هوش مصنوعی اجتناب‌ناپذیر است. با این وجود، تحقیقات در زمینه الگوریتم‌های نوین یک مبحث بسیار چالش برانگیزی است که هم‌اکنون و در آینده همواره انجام می‌شود.

مطمناً، هوش مصنوعی همچنین در زمینه شبکه‌های هوشمند برق و انرژی (Smart EEPs) بسیار مهم و مفید خواهد بود، مانند پشتیبانی از بهینه‌سازی هماهنگ و بهره‌برداری از چندین سیستم انرژی ناهمگن، برنامه‌ریزی هماهنگ و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های مکمل چندگانه، ادغام کارآمد و مصرف به موقع منابع تجدیدپذیر، مدیریت انرژی هوشمند و بازارهای برق. در این محورها، هوش مصنوعی، به ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین نقش مهمی را ایفا می‌کند و پیشرفت‌های آینده را می‌توان با استفاده از این الگوریتم‌ها انتظار داشت [۶]، [۹].

۵-۲- انواع فناوری‌های هوش مصنوعی

انواع فناوری‌های هوش مصنوعی را می‌توان به دو روش مختلف دسته‌بندی کرد. در روش اول، فناوری‌های هوش مصنوعی بر اساس قابلیت‌ها، نحوه کاربرد و دامنه مسائلی که می‌تواند در آن اقدام به حل مسأله کند، دسته‌بندی می‌شوند. در روش دوم، فناوری‌های هوش مصنوعی بر اساس ویژگی‌ها و قابلیت‌های ذاتی به گروه‌های مختلف دسته‌بندی می‌شوند [۱۰]، [۱۱].

۱-۵-۲- دسته‌بندی بر اساس نحوه کاربرد و دامنه مسائل قابل حل

در این نوع دسته‌بندی، هوش مصنوعی به طور کلی در دو شاخه هوش مصنوعی عمومی^۱ و هوش مصنوعی محدود^۲ دسته‌بندی می‌شود [۱۰]–[۱۲]:

- **هوش مصنوعی عمومی:** نوعی از سیستم هوش مصنوعی است که شامل تمام ویژگی‌های هوش انسان است. این نوع سیستم هوش مصنوعی ظرفیت فهمیدن یا یادگیری هر کار فکری را (که توسط انسان قابل انجام است) دارند. به عبارت دیگر، در چنین سیستم‌هایی، قابلیت‌های شناختی^۳ انسانی به ماشین‌ها تعمیم داده شده‌اند. چنین سیستم‌هایی، وقتی که با وظایف ناآشنا روبرو می‌شوند، بدون دخالت انسانی قادر به یافتن جواب مسأله خواهند بود. این سیستم‌ها، هنوز در مرحله تحقیق قرار دارند و تاکنون نمونه‌ای از چنین سیستم‌هایی ساخته نشده است.
- **هوش مصنوعی محدود:** نوعی از سیستم هوش مصنوعی است که برای انجام وظایف خاصی ساخته شده و آموزش دیده است. بسیاری از سیستم‌های کامپیوتری هوشمند کنونی که ادعا می‌کنند از فناوری‌های هوش مصنوعی برای انجام وظایف خود استفاده می‌کنند، در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند و برای حل مسائل خاص و دامنه بسیار محدود استفاده می‌شوند. این دسته از فناوری‌های هوش مصنوعی، در نقطه مقابل هوش مصنوعی عمومی قرار دارند. این نوع هوش مصنوعی شامل برخی از قابلیت‌های هوش انسان خواهد بود و درحالی که در انجام آن‌ها بسیار دقیق و عالی عمل می‌کند، در مورد ویژگی‌های دیگر عملکرد مناسبی ندارد.

¹ Artificial general intelligence

² Narrow artificial intelligence

³ Cognitive abilities

به عنوان مثال یک دستگاه اختصاصی تشخیص تصویر در دسته محدود قرار می‌گیرد. دستیارهای شخصی مجازی نظیر «سیری»^۱ شرکت اپل از جمله چنین سیستم‌هایی هستند.

۲-۵-۲- دسته‌بندی بر اساس ویژگی‌ها و قابلیت‌های ذاتی

در این دسته‌بندی، فناوری‌های هوش مصنوعی بر اساس ویژگی‌ها و قابلیت‌های ذاتی به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی‌ها عبارتند از:

- **ماشین‌های واکنش‌گرا**^۲: این دسته، ساده‌ترین شکل فناوری‌های هوش مصنوعی است. این دسته از فناوری‌های هوش مصنوعی، حافظه ندارند؛ نمی‌توانند یادگیری کنند و قادر به استفاده از اطلاعات گذشته برای انجام وظایف آینده نیستند. این سیستم‌ها، در هر مرحله، تمامی راه‌های ممکن برای حل مسئله را می‌سنجند. سپس بهترین استراتژی ممکن را انتخاب می‌کنند.
- **ماشین‌های با حافظه محدود**^۳: این دسته از فناوری‌های هوش مصنوعی قادرند از اطلاعات گذشته، برای تصمیم‌گیری در مورد وظایف آینده استفاده کنند. برخی از قابلیت‌های تصمیم‌گیری موجود در اتومبیل‌های خودران^۴ به این شکل طراحی شده‌اند. مشاهدات انجام شده و اطلاعات به‌دست آمده از وضعیت‌های پیشین در تصمیم‌گیری‌هایی که در آینده اتخاذ می‌شوند، دخیل هستند (نظیر تعویض خطوط رانندگی توسط اتومبیل). مشاهدات انجام شده به طور دائم ذخیره نمی‌شوند.
- **نظریه ذهن**^۵: این دسته از هوش مصنوعی، توانایی فهمیدن احساسات، عقاید، افکار و توقعات انسان‌ها را خواهد داشت و می‌تواند تعاملات اجتماعی با انسان‌ها داشته باشد. اگرچه تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است، اما تاکنون این دسته از فناوری‌های هوش مصنوعی به واقعیت مبدل نشده‌اند.
- **هوش خودآگاهی**^۶: نوعی از سیستم هوش مصنوعی است که هوشیاری، هوش فوق‌العاده، خودآگاهی و احساس داشته باشد؛ به عبارت دیگر یک انسان کامل باشد. چنین سیستم‌هایی وجود خارجی ندارند و پیاده‌سازی آن‌ها نقطه عطف و مقصد نهایی حوزه هوش مصنوعی محسوب می‌شوند.

۲-۶- نقشه دانش فناوری‌های هوش مصنوعی

با همکاری آژانس استراتژیک نوآوری Axilo، یک ابزاری بصری ایجاد شده تا عموم افراد با هر سطح دانشی، در یک نگاه، پیچیدگی و عمق فناوری هوش مصنوعی را درک کنند. لذا نقشه‌ای تحت عنوان "نقشه دانش هوش مصنوعی" تهیه شده که شناسایی جهت‌گیری‌های مختلف در حوزه دانش هوش مصنوعی را مشخص می‌کند. هدف از ارائه نقشه دانش فناوری‌های هوش مصنوعی، ایجاد فضایی جدید برای درک عمق و پیچیدگی حوزه فناوری‌های هوش مصنوعی است. در این راستا، نقشه دانش، یک معماری برای مدل‌سازی و دسترسی به دانش در حوزه فناوری‌های هوش مصنوعی و زمینه‌های کاربردی پویای آن را فراهم می‌کند. شکل ۵-۲، نقشه دانش فناوری‌های هوش مصنوعی را نشان می‌دهد. نقشه دانش پیش‌رو می‌تواند به عنوان مدخلی برای دسترسی به دانش موجود در حوزه هوش مصنوعی نیز تلقی شود. چنین رویکردی، به خوانندگان و محققان اجازه

¹ Siri

² Reactive machines

³ Limited memory

⁴ Self-driving automobiles

⁵ Theory of mind

⁶ Self-awareness intelligence

می‌دهد تا منابع مختلف را برای دستیابی به اطلاعات اضافی جستجو کنند و در نهایت دانش جدیدی در این حوزه تولید کنند. به همین خاطر، به این مدل، نقشه دانش فناوری‌های هوش مصنوعی گفته می‌شود. در این شکل، گروه‌بندی کلان فناوری‌های هوش مصنوعی در محورهای افقی و عمودی نمایش داده شده است. محور افقی، الگوهای هوش مصنوعی^۱ را نمایش می‌دهد. الگوهای هوش مصنوعی، رویکردهایی هستند که برای حل مسائل مرتبط با هوش مصنوعی، توسط محققین و فعالان این حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرند. محور عمودی، دامنه مسائل هوش مصنوعی^۲ را نمایش می‌دهد. دامنه مسائل هوش مصنوعی، انواع مسائلی را نشان می‌دهد که توسط فناوری‌های هوش مصنوعی قابل حل هستند. دامنه مسائل هوش مصنوعی، به نوعی، قابلیت‌های یک الگوریتم هوش مصنوعی را نیز نمایش می‌دهد [۱۰]، [۱۳].

۱-۶-۲- دامنه مسائل هوش مصنوعی

محور عمودی شکل ۵-۲، دسته‌بندی مسائلی را نمایش می‌دهد که توسط فناوری‌های هوش مصنوعی قابل هستند. دسته‌بندی ارائه شده از مسائل هوش مصنوعی، استاندارد این حوزه است.

- استدلال^۳: استفاده از قوانین، روابط، مجموعه‌ها و قضایای موجود در علم منطق برای حل مسائل پیچیده در حوزه فناوری‌های هوش مصنوعی نظیر تشخیص پزشکی و ایجاد زبان طبیعی توسط کامپیوتر
- دانش^۴: قابلیت نمایش و فهم محیط پیرامون برای ایجاد چارچوب‌های لازم برای حل مسئله
- برنامه‌ریزی^۵: قابلیت تعریف اهداف و انجام مرحله به مرحله فعالیت‌های لازم برای رسیدن به آن‌ها
- ارتباطات^۶: قابلیت شناختن زبان (منظور، زبان طبیعی انسان‌ها) و ارتباط برقرار کردن از این طریق
- ادراک^۷: قابلیت تبدیل کردن ورودی‌های خام حس شده (نظیر تصویر، صدا و سایر موارد) به اطلاعات مفید و قابل استفاده برای حل مسائل

¹ Artificial intelligence paradigms

² Artificial intelligence problem domain

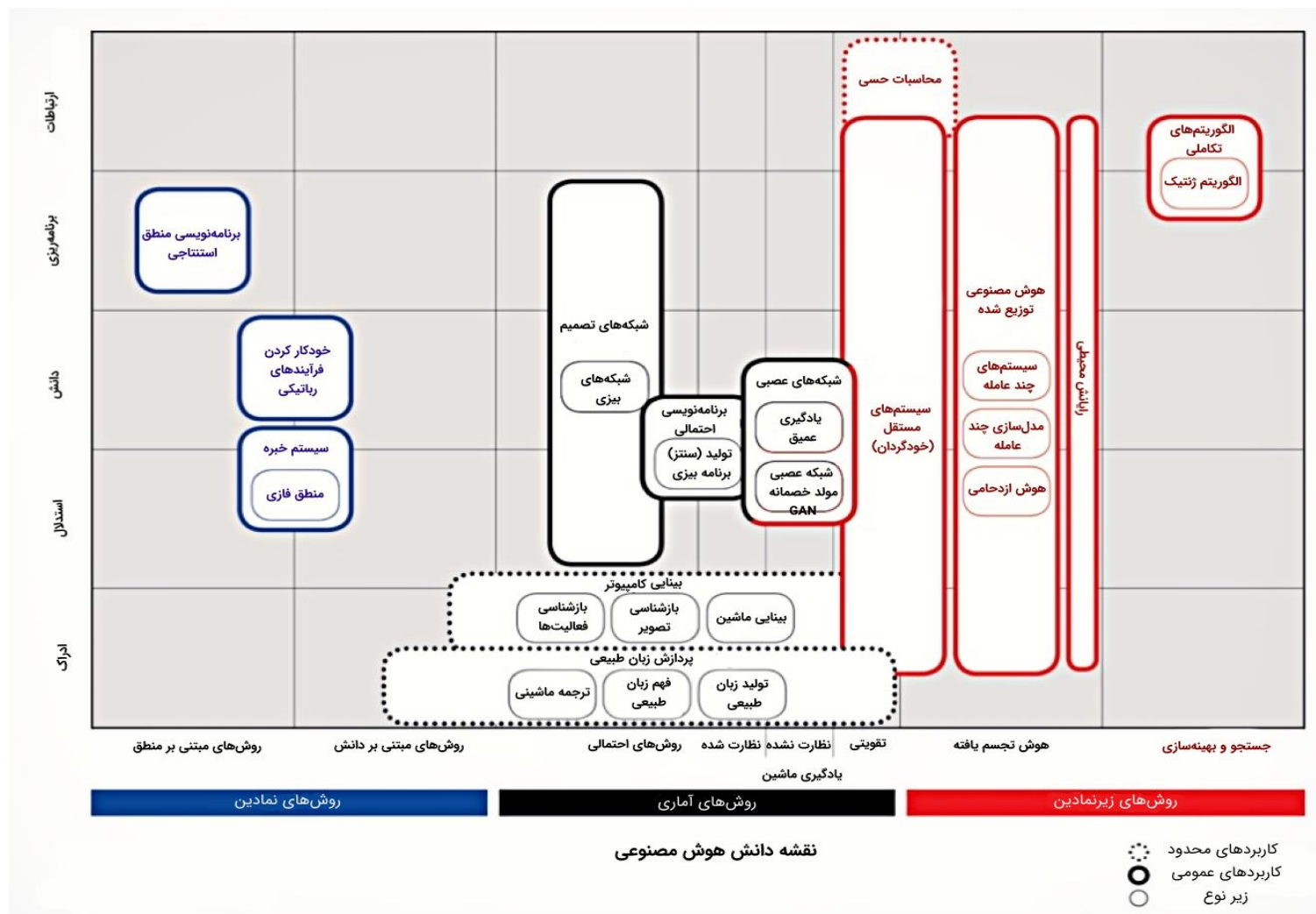
³ Reasoning

⁴ Knowledge

⁵ Planning

⁶ Communication

⁷ Perception



شکل ۵-۲: نقشه دانش هوش مصنوعی [۱۰]، [۱۳]

۲-۶-۲- الگوهای هوش مصنوعی

محور افقی شکل ۵-۲ الگوهای هوش مصنوعی را نشان می‌دهد. در این بخش، الگوهای هوش مصنوعی و یا به عبارت دیگر، روش‌های حل مسائل در فناوری‌های هوش مصنوعی، مورد بررسی قرار گرفته و تعریف می‌شوند. در ابتدا، هر کدام از الگوهای هوش مصنوعی تعریف می‌شوند و سپس در بخش‌های بعدی، طبقه‌بندی الگوریتم‌های شناخته شده هوش مصنوعی شرح داده شده و هر کدام از الگوریتم‌ها تعریف می‌شوند [۱۰]، [۱۳].

در ذیل، الگوهای هوش مصنوعی و یا به عبارت دیگر، روش‌های حل مسائل در فناوری‌های هوش مصنوعی، تعریف می‌شوند:

- ابزارهای مبتنی بر منطق^۱: این ابزارها، برای نمایش دانش در دامنه مسائل هوش مصنوعی و حل مسائل هوش مصنوعی استفاده می‌شوند.
 - ابزارهای مبتنی بر دانش^۲: این ابزارها، مبتنی بر هستی‌شناسی^۳ (هستان‌شناسی) و پایگاه‌های دانش ساخت‌یافته عظیم (متشکل از مفاهیم، تعاریف، اطلاعات و قوانین) هستند.
 - روش‌های احتمالی^۴: روش‌ها و ابزارهایی هستند که به عوامل درگیر در محیط مسئله اجازه می‌دهند که در سناریوهای حاوی اطلاعات ناکامل^۵، به حل مسئله بپردازند.
 - یادگیری ماشین^۶: ابزارهایی هستند که الگوریتم‌های کامپیوتری اجازه می‌دهند تا بتوانند الگوها و مدل‌های داده‌ای را یاد بگیرند.
 - هوش تجسم‌یافته (تجسمی)^۷: ابزارهای مهندسی هستند که فرض می‌کنند شکل‌گیری یک بدنه (و یا حداقل یک مجموعه جزئی از قابلیت‌ها نظیر حرکت، ادراک، تعامل و بصری‌سازی) برای تولید یک هوش مصنوعی کامل و یا یک موجودیت با هوش بالاتر الزامی است.
 - جستجو و بهینه‌سازی^۸: با استفاده از چنین ابزارهایی، امکان پیاده‌سازی روش‌های هوشمند جستجو در فضای جواب‌های مسئله (با قابلیت تولید بیش از یک جواب برای مسئله) فراهم می‌آید.
- تمامی الگوهای شرح داده شده، در یک طبقه‌بندی دیگر نیز قرار می‌گیرند که عبارتند از:
- رویکردهای نمادین^۹: این رویکردها در شکل ۵-۲ با رنگ آبی نمایش داده شده‌اند. این دسته از رویکردها بیان می‌کنند که هوش انسانی، قابلیت‌ها و عملکردهای آن از طریق روش‌های نمادین (مانند نظریه منطق فازی) قابل تعریف و دست‌کاری هستند.
 - رویکردهای زیر-نمادین^{۱۰}: این رویکردها در شکل ۵-۲ با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند. در این رویکردها، هیچ نوع خاصی از نمایش دانش دامنه، پیش از پیاده‌سازی الگوریتم‌های هوش مصنوعی در دسترس نیست.
 - رویکردهای آماری^{۱۱}: در این رویکرد، از روش‌ها و ابزارهای آماری برای حل مسائل حوزه هوش مصنوعی

¹ Logic-based tools

² Knowledge-based tools

³ Ontology

⁴ Probabilistic methods

⁵ Incomplete information

⁶ Machine learning

⁷ Embodied intelligence

⁸ Search and optimization

⁹ Symbolic approaches

¹⁰ Sub-symbolic approaches

¹¹ Statistical approaches

استفاده می‌شود.

۲-۶-۲-۱ طبقه‌بندی الگوریتم‌های/فناوری‌های شناخته شده هوش مصنوعی

در این بخش، سعی شده است تا دسته‌بندی‌هایی که از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در ادبیات موضوعی این حوزه وجود دارد، تشریح شوند.

لازم به ذکر است که با توجه به پیشرفت با شتاب افزایش حوزه دانش هوش مصنوعی، همواره الگوریتم و روش‌های نوین در حال اختراع هستند و لذا شکل ۵-۲ مسلماً یک شکل کاملاً جامع نخواهد بود. همچنین با توجه به وسعت حوزه دانش هوش مصنوعی، دسته‌بندی‌های مختلفی برای الگوها، روش‌ها و الگوریتم‌های حوزه هوش مصنوعی توسط دانشمندان مختلف ارائه شده که بعضاً ممکن است با یکدیگر سازگار نباشند. به عنوان مثال همان‌طور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، الگوریتم‌های تکاملی یک مجموعه از روش‌ها را در خود جای داده است که از الگوهای جستجو و بهینه‌سازی برای حل مشکلات در حوزه‌های ارتباطات و برنامه‌ریزی استفاده می‌کنند. این در حالی است که به عنوان مثال در [۱۴] از الگوریتم ژنتیک با استفاده از روش‌های موجود در الگوی یادگیری تقویتی در یک محیط چندعاملی برای یادگیری عامل‌های^۱ موجود در محیط استفاده شده است. در واقع در این مثال، دو فناوری الگوریتم‌های تکاملی و هوش مصنوعی توزیع شده با یکدیگر ترکیب شده و با استفاده همزمان از الگوهای جستجو و بهینه‌سازی و یادگیری تقویتی به حل مسئله مورد نظر پرداخته شده است. با توجه به این توضیحات، با ترکیب الگوها، فناوری‌ها و الگوریتم‌های مختلف، چارچوب‌های جدیدی به دست می‌آید که نمی‌توان آن‌ها را به عنوان یک چارچوب مستقل در نظر گرفت، زیرا از اجزای مختلف نشان داده شده در شکل ۵-۲ تشکیل شده است. البته مسلماً در آینده‌ای نزدیک، فضاهای خالی درون این شکل با معرفی روش‌های جدید توسط دانشمندان مختلف تکمیل می‌شود [۱۰]، [۱۳]. در ادامه، مبانی هر کدام از روش‌های موجود در دسته‌بندی‌های نشان داده شده در شکل ۵-۲ به طور خلاصه تعریف می‌شوند تا دید بهتری نسبت به این روش‌ها کسب شود.

• برنامه‌نویسی منطق استنتاجی

روش‌های برنامه‌نویسی منطق استنتاجی^۲، نمونه‌ای از ابزارهای مبتنی بر منطق هستند. الگوریتم‌های موجود در این زیر شاخه از حوزه فناوری‌های هوش مصنوعی، از منطق صوری^۳ برای نمایش حقایق و قوانین موجود در یک پایگاه داده و فرمول‌بندی فرضیات^۴ مشتق شده از این پایگاه داده استفاده می‌کنند.

• خودکارسازی فرآیندهای منطق استنتاجی^۵

در این زیر شاخه از فناوری‌های هوش مصنوعی، فناوری‌هایی قرار دارند که از طریق مشاهده عملکرد انسان‌ها در انجام مجموعه‌ای از وظایف خاص، لیستی از قوانین و عملیات مورد نیاز برای انجام این وظایف توسط ماشین را استخراج می‌کنند. عملکرد ماشین در انجام این وظایف ارزیابی و قوانین استخراج شده، در یک فرآیند بازخوردی اصلاح می‌شوند.

• سیستم‌های خبره^۶

سیستم‌های خبره، نمونه‌ای از ابزارهای مبتنی بر منطق و دانش هستند. این فناوری، مجموعه‌ای از برنامه‌های کامپیوتری

¹ Agent

² Inductive logic programming

³ Formal logic

⁴ Hypothesis

⁵ Robotic process automation

⁶ Expert systems

را شامل می‌شود که با استفاده از قوانین کدبندی شده در پیکره آن‌ها، توانایی همانندسازی فرآیند تصمیم‌گیری خبره انسانی را دارند. این دسته از سیستم‌ها، برای حل مسائل بسیار پیچیده در حوزه هوش مصنوعی طراحی شده‌اند. در این دسته از روش‌ها، حقایق و قوانین لازم برای عملیاتی کردن سیستم، توسط قوانین اگر-آن‌گاه (If-Then) در یک پایگاه دانش مدل‌سازی می‌شوند. سیستم خبره روی این پایگاه دانش، استنتاج منطقی انجام می‌دهد و از این طریق به حل مسائل هوش مصنوعی می‌پردازد. مهم‌ترین نمونه سیستم‌های خبره، سیستم‌های فازی^۱ هستند.

✓ سیستم‌های فازی

سیستم‌های فازی، نمونه‌ای از سیستم‌های مبتنی بر قانون^۲ هستند که مقادیر متغیرهای مسئله را به یک بازه پیوستگی از مقادیر بین ۰ و ۱ نگاشت می‌کنند. چنین منطقی، در نقطه مقابل منطق دودویی^۳ قرار دارد که در آن تمامی متغیرها به مقادیر گسسته ۱ یا ۰ نگاشت می‌شوند. سیستم‌های فازی، در دسته سیستم‌های کنترلی^۴ قرار می‌گیرند. سیستم‌های فازی مبتنی بر منطق فازی هستند. در نتیجه، مقادیر متغیرهای کنترلی مسئله می‌توانند در قالبی غیر از True یا False نیز نمایش داده شوند. ویژگی مهم سیستم‌های فازی در حل مسائل این است که می‌توانند جواب ممکن برای یک مسئله خاص را به شکلی نمایش دهند که توسط عامل‌های انسانی نیز قابل فهم باشند.

• شبکه‌های تصمیم^۵

شبکه‌های تصمیم تعمیمی بر مدل‌های شناخته شده استنتاجی شبکه‌های بیزی^۶ هستند. در چنین سیستم‌هایی، مجموعه متغیرهای مسئله و روابط احتمالی میان آن‌ها، توسط یک نقشه خاص نمایش داده می‌شود. به این نقشه، گراف جهت‌دار بدون دور^۷ گفته می‌شود. شبکه‌های تصمیم، یک نمایش ریاضی و مبتنی بر گراف از متغیرها و مقادیر آن‌ها را در یک تصمیم‌گیری خاص ارائه می‌دهند. روش‌های شبکه تصمیم، علاوه بر حل مسائل استنتاج احتمالی، توانایی مدل‌سازی و حل مسائل تصمیم‌گیری^۸ را نیز دارند. مهم‌ترین نمونه شبکه‌های تصمیم، شبکه‌های بیزی هستند.

✓ شبکه‌های بیزی

شبکه‌های بیزی، مدل‌های گرافی احتمالی^۹ هستند که مجموعه متغیرهای مسئله و وابستگی‌های شرطی^{۱۰} میان آن‌ها را در قالب یک گراف جهت‌دار بدون دور نمایش می‌دهند. شبکه‌هایی بیزی، برای حالت‌هایی که یک رویداد خاص اتفاق افتاده باشد و سیستم بخواهد احتمال اینکه کدام یک از علت‌های ممکن شناخته شده، عامل تأثیرگذار در این رویداد بوده را پیش‌بینی کند، بسیار ایده‌آل هستند. به عنوان نمونه، شبکه‌های بیزی می‌توانند روابط احتمالی میان بیماری‌ها و علائم آن‌ها را نمایش دهند. با داشتن یک دسته از علائم خاص، از شبکه بیزی می‌توان برای محاسبه احتمالات وجود بیماری‌های مختلف در بیماران استفاده کرد.

• برنامه‌نویسی احتمالی

یک الگوی برنامه‌نویسی است که در آن، مدل‌های احتمالی برای حل مسئله تعریف می‌شوند و استنتاج روی مدل‌های

¹ Fuzzy systems

² Rule-based

³ Binary logic

⁴ Control systems

⁵ Decision networks

⁶ Bayesian networks

⁷ Directed acyclic graph

⁸ Decision making problems

⁹ Probabilistic graphical model

¹⁰ Conditional dependencies

احتمالی تعریف شده، به طور خودکار صورت می‌پذیرد. این دسته از الگوهای برنامه‌نویسی، با هدف یکپارچه‌سازی مدل‌سازی احتمالی^۱ و روش‌های مرسوم برنامه‌نویسی همه منظوره^۲ طراحی شده است. با چنین الگوهایی به راحتی می‌توان از مدل‌های احتمالی در برنامه‌نویسی استفاده کرد. چنین روش‌هایی، امکان پیاده‌سازی سیستم‌هایی را می‌دهند که می‌توانند در شرایط عدم قطعیت^۳ نیز تصمیم‌گیری کنند. روش‌های تولید (سنتز) برنامه بیزی^۴، از جمله مهم‌ترین الگوهای برنامه‌نویسی احتمالی هستند.

✓ روش‌های تولید (سنتز) برنامه بیزی

در این دسته از الگوهای برنامه‌نویسی، برنامه‌های احتمالی بیزی، به طور خودکار، برنامه‌های بیزی جدید تولید می‌کنند. در حالت مرسوم روش‌های برنامه‌نویسی احتمالی، برنامه‌نویس انسانی برای تصمیم‌گیری در مواجهه با عدم قطعیت، یک برنامه احتمالی بیزی تولید کرده و از آن برای حل مسأله استفاده می‌کند. در روش‌های تولید (سنتز) برنامه بیزی به جای اینکه برنامه‌نویس چنین کاری انجام دهد، برنامه احتمالی بیزی اصلی برای تصمیم‌گیری یا حل مسئله اقدام به تولید یک برنامه احتمالی بیزی جدید می‌کند.

• شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی یا شبکه‌های عصبی مصنوعی^۵، به طور کلی بر پایه ساختارهای عصبی مغز انسان و یا حیوانات مدل شده‌اند. این الگوریتم‌ها، این قابلیت را دارند که بدون دریافت دستورالعمل‌های صریح از جانب برنامه‌نویس و یا خبره، عملکرد خود را بهبود بخشند. به عنوان نمونه، در پردازش تصویر^۶، شبکه‌های عصبی قادرند تا از طریق تحلیل تصاویر نمونه‌ای، تصاویری را حاوی یک شیء خاص هستند شناسایی کنند.

شبکه‌های عصبی مصنوعی، از مجموعه‌ای از واحدهای به هم متصل به نام نرون‌های مصنوعی^۷ تشکیل شده‌اند. نرون‌های مصنوعی، مانند نرون‌های طبیعی به هم متصل هستند و می‌توانند سیگنال (مقدار حقیقی) برای یکدیگر ارسال کنند. خروجی هر کدام از نرون‌ها، از طریق یک واحد خاص به نام تابع انتقال^۸ یا تابع فعال‌سازی^۹ محاسبه می‌شود. هر کدام از نرون‌ها و لینک‌های ارتباطی میان آن‌ها، وزنی^{۱۰} دارند که در طی فرآیند یادگیری تنظیم می‌شود. وزن، قدرت سیگنال‌های ارتباطی میان نرون‌ها را تقویت یا تضعیف می‌کند. نرون‌ها، معمولاً در واحدهایی به نام لایه^{۱۱} تجمع می‌شوند. لایه‌های مختلف، وظایف متفاوتی بر عهده دارند. سیگنال‌ها، از لایه اول^{۱۲} به سمت لایه‌های میانی نهان^{۱۳} و در نهایت به سمت لایه خروجی^{۱۴} منتشر می‌شوند. شبکه‌های عصبی نظیر شبکه‌های یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی مولد مخاصم یا تخاصمی^{۱۵}، از جمله مهم‌ترین شبکه‌های عصبی هستند [۱۵]، [۱۶].

✓ یادگیری عمیق

مطابق شکل ۶-۲ دسته‌ای از خانواده روش‌های یادگیری ماشین هستند که بر پایه شبکه‌های

¹ Probabilistic modelling

² General purpose programming

³ Uncertainty

⁴ Bayesian program synthesis

⁵ Artificial neural networks

⁶ Image processing

⁷ Artificial neurons

⁸ Transfer function

⁹ Activation function

¹⁰ Weight

¹¹ Layer

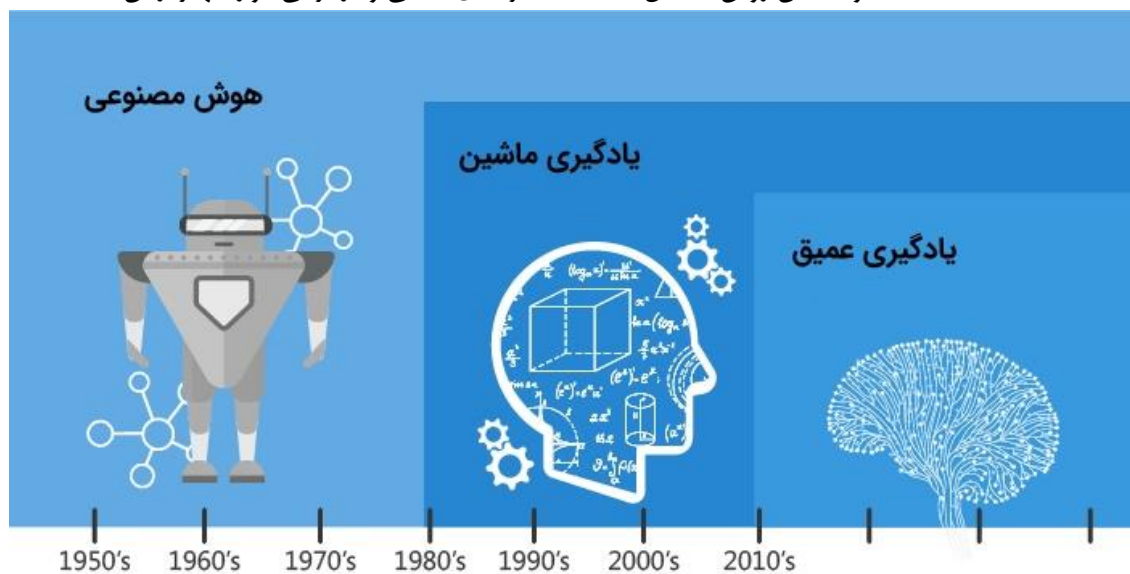
¹² Input layer

¹³ Hidden layers

¹⁴ Output layer

¹⁵ Generative adversarial networks

عصبی مصنوعی بنا نهاده شده‌اند. این دسته از الگوریتم‌ها، از فرآیند پردازش اطلاعات و گره‌های ارتباطی توزیع‌شده در سیستم‌های زیستی الهام گرفته شده‌اند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق از لایه‌های متعدد و چندانگانه برای استخراج تدریجی ویژگی‌های سطح بالا^۱ از داده‌های ورودی خام استفاده می‌کنند. به عنوان نمونه، در پردازش تصویر، لایه‌های پایانی تر شبکه ممکن است ویژگی‌هایی نظیر لبه^۲ را در تصویر شناسایی کنند، در حالی که در لایه‌های بالاتر، ویژگی‌های سطح بالاتر نظیر رقم، حروف و یا صورت استخراج می‌شود. شبکه‌های عصبی نظیر شبکه‌های عصبی پیچشی^۳ و شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلند^۴، از جمله مهم‌ترین الگوریتم‌های یادگیری عمیق هستند. این الگوریتم‌ها در حوزه‌های مختلفی نظیر بینایی کامپیوتر^۵، بازشناسی گفتار^۶، پردازش زبان طبیعی^۷، ترجمه ماشین^۸ و تحلیل تصاویر پزشکی^۹ مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند. نتایج تولید شده توسط این روش‌ها، قابل مقایسه با خبره‌های انسانی و در برخی موارد بهتر از آن‌ها است [۱۷]، [۱۸].



شکل ۶-۲: رابطه میان یادگیری عمیق، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی [۱۷]، [۱۸]

✓ شبکه‌های عصبی مولد مخاصم یا تخصصی

در این دسته از شبکه‌های عصبی مصنوعی، دو شبکه عصبی مصنوعی در یک بازی با هم به رقابت می‌پردازند. در نتیجه چنین فرآیندی، شبکه‌های عصبی به طور تدریجی خطاهای سیستم را شناسایی می‌کند. با در اختیار داشتن یک مجموعه داده آموزشی، این روش یاد می‌گیرد تا داده‌های جدید با ویژگی‌های آماری مشابه داده‌های آموزشی تولید کند. به عنوان نمونه مطابق شکل ۷-۲ یک شبکه عصبی مولد مخاصم که روی تصاویر، آموزش دیده است، می‌تواند تصاویری تولید کند که به

¹ High level features

² Edge

³ Convolutional neural networks

⁴ Long short-term memory networks

⁵ Computer vision

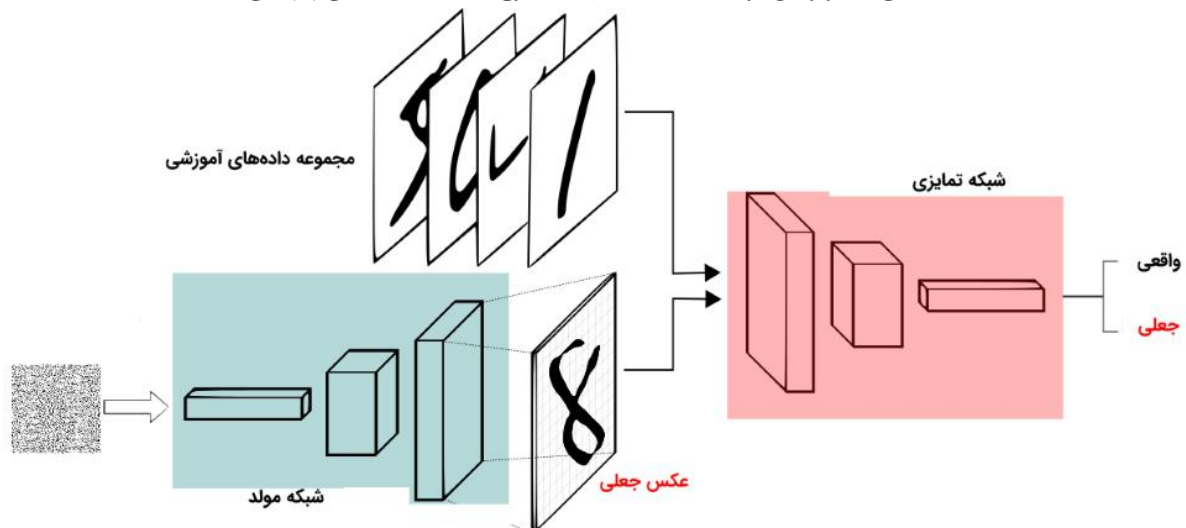
⁶ Speech recognition

⁷ Natural language processing

⁸ Machine translation

⁹ Medical image analysis

صورت سطحی برای انسان‌ها واقعی به نظر بیایند و ویژگی‌های واقع‌گرایانه خوبی از خود نشان دهند. در این دسته از روش‌ها، دو شبکه عصبی مختلف در کنار هم عمل می‌کنند که عبارتند از شبکه‌های مولد^۱ و شبکه‌های تمایزی (متمايزگر)^۲. شبکه‌های مولد، داده‌های جدید تولید می‌کنند و شبکه‌های تمایزی، آن‌ها را ارزیابی می‌کنند. در این روش‌ها، از تکنیک پس‌انتشار^۳ برای آموزش هر دو شبکه استفاده می‌شود؛ از این طریق، شبکه مولد تصاویر بهتری تولید می‌کند و شبکه تمایزی، عملکرد خود را در شناسایی تصاویر سنتز شده بهبود می‌بخشد. شبکه‌های مولد، از نوع شبکه‌های عصبی دکانولوشن^۴ و شبکه‌های تمایزی، از نوع شبکه‌های عصبی پیچشی هستند [۱۹]، [۲۰].



شکل ۷-۲: یک نمونه شبکه عصبی مولد مخاصم [۲۱]

• بینایی کامپیوتر

روش‌های بینایی کامپیوتر^۵، روش‌هایی برای به دست آوردن^۶ و فهم معنای موجود در تصاویر دیجیتال هستند. بینایی کامپیوتر، یک حوزه میان‌رشته‌ای است و روش‌های ممکن برای فهم و ادراک سطح بالا از تصاویر و ویدیوهای دیجیتالی را مورد مطالعه قرار می‌دهد. از دیدگاه مهندسی، این حوزه، بر فرآیند خودکارسازی وظایف قابل انجام توسط «سیستم بینایی انسان» به وسیله الگوریتم‌های کامپیوتری تمرکز دارد. بینایی کامپیوتر، فعالیت‌هایی نظیر به دست آوردن، پردازش و فهم تصاویر دیجیتال و استخراج داده‌های با ابعاد بالا^۷ از جهان واقعی را شامل می‌شود. هدف از چنین فعالیت‌هایی، تولید اطلاعات عددی یا نمادین برای تصمیم‌گیری در هنگام حل مسأله است. زیر حوزه‌هایی نظیر بازشناسی فعالیت‌ها^۸، بازشناسی تصویر^۹ و بینایی ماشین^{۱۰}، در این حوزه تحقیقاتی از فناوری‌های هوش مصنوعی طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰]، [۲۲].

¹ Generative networks

² Discriminative models

³ Back propagation

⁴ Deconvolutional neural network

⁵ Computer vision

⁶ Acquire

⁷ High-dimensional data

⁸ Activities recognition

⁹ Image recognition

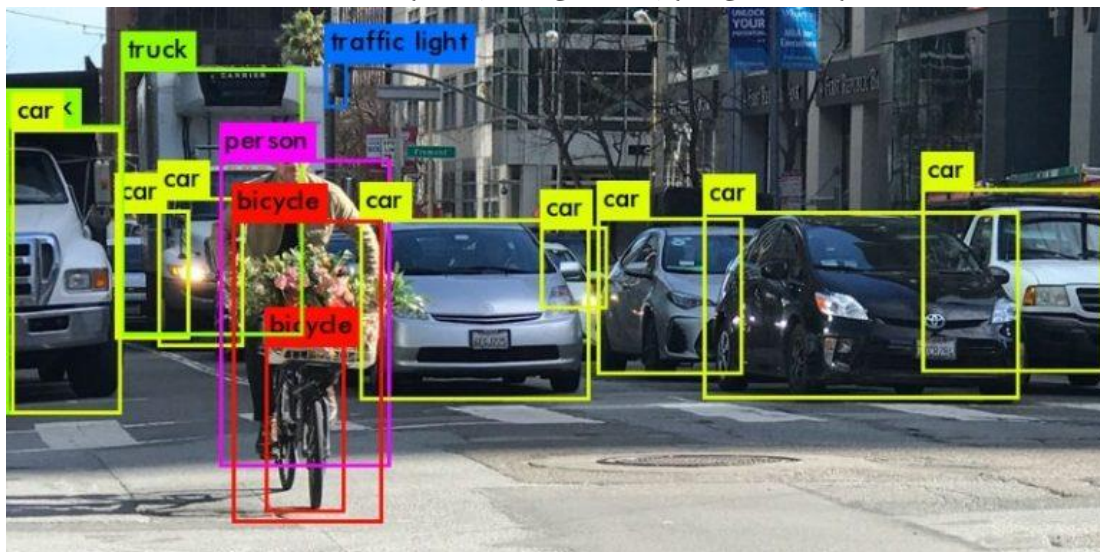
¹⁰ Machine vision



شکل ۸-۲: یک نوع از کاربرد بینایی کامپیوتر [۱۰], [۲۲]

✓ بازشناسی تصویر

بازشناسی تصویر، به فناوری‌های اطلاق می‌شود که برای شناسایی مکان‌ها، افراد، اشیاء، ساختمان‌ها و دیگر مشخصه‌های موجود در تصویر استفاده می‌شوند. بازشناسی تصویر، زیر مجموعه‌ای از بینایی کامپیوتر است و به فرآیند شناسایی یا تشخیص یک شیء یا ویژگی‌های مشخصه موجود در تصاویر دیجیتالی (از طریق روش‌های یادگیری ماشین) اطلاق می‌شود. یکی از مهم‌ترین فناوری‌های موجود در حوزه بازشناسی تصویر، بازشناسی کاراکترهای نوری^۱ است.



¹ Optical character recognition

شکل ۹-۲: کاربرد بازشناسی تصویر [۱۰]، [۲۲]

✓ بازشناسی فعالیت‌ها

یکی از زیر شاخه‌های حوزه بینایی کامپیوتر است و هدف آن بازشناسی فعالیت‌ها، کنش‌ها و اهداف یک یا چند عامل فعال در محیط، بر اساس مجموعه‌ای از مشاهدات به دست آمده از فعالیت آن‌ها و شرایط محیطی است. فعالیت‌های قابل بازشناسی، معمولاً در سه دسته فعالیت‌های فردی (تک کاربره)، چند کاربره و گروهی دسته‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین ویژگی چنین سیستم‌هایی، استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از واسط‌های سنسوری مختلف (نظیر تلفن‌های همراه هوشمند و دوربین‌های نظارتی و سایر موارد) برای شناسایی فعالیت‌ها است. به عنوان نمونه، تلفن‌های همراه، داده‌های سنسوری کافی را برای شناسایی برخی فعالیت‌های انسانی نظیر ورزش کردن، از پله بالا رفتن و یا راه رفتن در اختیار دارند.

✓ بینایی ماشین

طبق تعریف انجمن تصویربرداری خودکار^۱، بینایی ماشین کلیه کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی را شامل می‌شود که در آن‌ها، از ترکیب سخت‌افزار و نرم‌افزار، راهنمای عملیاتی لازم برای دستگاه‌ها فراهم می‌آید تا بتوانند فعالیت‌های از پیش تعیین شده خود را انجام دهند. این دستگاه‌ها، فعالیت‌های خود را بر اساس استخراج، پردازش و تحلیل تصاویر دیجیتالی انجام می‌دهند. از فناوری‌ها و روش‌های بینایی ماشین، برای بازرسی و تحلیل خودکار مبتنی بر تصویربرداری^۲ در کاربردهای صنعتی و غیر صنعتی استفاده می‌شود.



شکل ۱۰-۲: یک نوع کاربرد بینایی ماشین

¹ Automated imaging association

² Imaging-based automatic inspection and analysis

• پردازش زبان طبیعی

پردازش زبان طبیعی، زیرشاخه مهمی از فناوری‌های هوش مصنوعی است که به جمع‌آوری، پردازش و تحلیل تمامی واسطه‌های حاوی زبان طبیعی^۱ می‌پردازد. این حوزه، زیر شاخه‌ای از علوم کامپیوتر^۲، مهندسی اطلاعات^۳ و هوش مصنوعی است. پردازش زبان طبیعی، تعامل میان کامپیوترها و زبان‌های طبیعی انسانی را بررسی می‌کند؛ به ویژه، چگونگی پردازش و تحلیل حجم عظیمی از داده‌های زبان طبیعی توسط برنامه‌های کامپیوتری. به طور کلی، روش‌های پردازش زبان طبیعی برای پردازش و تحلیل ویژگی‌های لغوی^۴، معنایی^۵، نحوی^۶، ساختاری^۷ و گفتاری^۸ مورد استفاده قرار می‌گیرند. حوزه‌هایی نظیر فهم زبان طبیعی^۹، تولید زبان طبیعی^{۱۰} و ترجمه ماشینی^{۱۱}، از مهم‌ترین زیر شاخه‌های پردازش زبان طبیعی هستند [۱۰]، [۲۳]–[۲۵].

✓ فهم زبان طبیعی

به درک و فهم ساختارها و معانی موجود در زبان‌های طبیعی انسانی توسط کامپیوتر و ایجاد امکان تعامل مستقیم میان کامپیوتر و انسان (از طریق زبان طبیعی)، فهم زبان طبیعی گفته می‌شود. این حوزه، یکی از زیر شاخه‌های پردازش زبان طبیعی و فناوری‌های هوش مصنوعی محسوب می‌شود و با مفهوم درک مطلب ماشینی^{۱۲} سر و کار دارد. روش‌های موجود در این حوزه، به سیستم‌های کامپیوتری اجازه می‌دهند تا به طور خودکار، معنا و مفهوم واقعی موجود در داده‌های حاوی زبان طبیعی (متن، صوت و سایر موارد) را استنتاج کنند و از این طریق، به تعامل و محاوره با کاربرهای انسانی بپردازند. فهم زبان طبیعی، همان هوش مصنوعی است که توسط نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده می‌شود تا بتوانند متون و هر نوع داده غیر ساختاریافته را تفسیر کنند. در فهم زبان طبیعی، زبان طبیعی به زبان کامپیوتر ترجمه شده و در نهایت به خروجی قابل فهم توسط ماشین تبدیل می‌شود. مسائل فهم زبان طبیعی، از لحاظ محاسباتی بسیار پیچیده هستند.

✓ تولید زبان طبیعی

تولید زبان طبیعی، فرآیندی نرم‌افزاری است که داده‌های ساختاریافته را به محتوای زبان طبیعی تبدیل می‌کند. به عنوان نمونه، در شرکت‌های تجاری و سازمان‌ها از چنین روش‌هایی جهت تولید محتوای زبان طبیعی برای به کارگیری در گزارش‌های سازمانی تولیدشده به صورت خودکار استفاده می‌شود. تولید زبان طبیعی، نقطه مقابل فهم زبان طبیعی محسوب می‌شود. در فهم زبان طبیعی، سیستم باید متن ورودی را ابهام‌زدایی^{۱۳} و به زبان قابل فهم توسط ماشین تبدیل کند. در حالی که در تولید زبان طبیعی، محتوای داده‌های ماشینی باید توسط کامپیوتر به محتوای زبان طبیعی تبدیل شوند. سیستم‌های داده به متن^{۱۴}، از جمله مهم‌ترین نمونه سیستم‌های تولید زبان طبیعی هستند.

¹ Natural language

² Computer science

³ Information engineering

⁴ Lexical

⁵ Semantic

⁶ Syntactical

⁷ Structural

⁸ Speech

⁹ Natural language understanding

¹⁰ Natural language generation

¹¹ Machine translation

¹² Machine reading comprehension

¹³ Disambiguate

¹⁴ Data-to-text

✓ ترجمه ماشینی

ترجمه ماشینی، زیر شاخه‌ای از زبان‌شناسی محاسباتی^۱، هوش مصنوعی و پردازش زبان طبیعی است. این حوزه، استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری و فناوری‌های هوش مصنوعی را برای ترجمه داده‌های متنی از یک زبان به زبان دیگر، مطالعه و بررسی می‌کند. ترجمه ماشینی در ساده‌ترین حالت از جابجایی کلمات یک زبان با کلمات زبان دیگر برای ترجمه متون استفاده می‌کند (در این حالت، ترجمه خوبی حاصل نمی‌شود). در حال حاضر، سیستم‌های مبتنی بر دانش، آماری و مبتنی بر شبکه عصبی، جزء بهترین روش‌های ترجمه ماشینی هستند. این روش‌ها در شناسایی اختلافات موجود در توپولوژی زبان‌ها، ترجمه اصطلاحات میان زبان‌ها و شناسایی ناهنجاری‌های^۲ ترجمه به موفقیت‌های بسیار خوبی دست یافته‌اند. مهم‌ترین نمونه یک سیستم ترجمه ماشین، سرویس ترجمه ماشینی ارائه شده توسط گوگل است.

• محاسبات حسی

محاسبات حسی^۳ که زیر شاخه‌ای از حوزه فناوری‌های هوش مصنوعی است، بازشناسی، تفسیر و شبیه‌سازی احساسات انسانی توسط دستگاه‌ها و سیستم‌های کامپیوتری را مطالعه و بررسی می‌کند. سیستم‌های محاسبات حسی قادر خواهند بود تا وضعیت احساسی یک کاربر را (از طریق سنسورها، میکروفون، دوربین‌ها و سایر موارد) شناسایی کنند و از طریق انجام یک سری فعالیت‌ها و یا ارائه سرویس‌ها و ویژگی‌های خاص، به کاربر پاسخ دهند. سیستم محاسبات حسی، از طریق تفسیر وضعیت احساسی کاربران، باید بتواند رفتار خود را با شرایط کاربر تطابق دهد. سیستم‌های محاسبات حسی می‌توانند به عنوان سیستم‌های تعامل انسان-کامپیوتر^۴ نیز عمل کنند؛ یعنی، قابلیت تشخیص شرایط احساسی کاربران انسانی و دیگر محرک‌ها را داشته و از این طریق، به تعامل با کاربران مشغول شوند. تفاوت محاسبات حسی با تحلیل احساسات^۵ این است که مورد اول، انواع مختلف احساسات را شناسایی می‌کند، در حالی که مورد دوم، فقط قطبیت^۶ داده‌های متنی حاوی زبان طبیعی را می‌سنجد [۱۰]، [۲۶].

• محاسبات تکاملی

محاسبات تکاملی^۷، زیرشاخه‌ای از فناوری‌های هوش مصنوعی و محاسبات نرم^۸ است. الگوریتم‌های این حوزه، برای بهینه‌سازی سراسری^۹ مورد استفاده قرار می‌گیرند و از فرآیند تکامل زیستی^{۱۰} الهام گرفته شده‌اند. از دیدگاه فنی، الگوریتم‌های محاسبات تکاملی، خانواده‌ای از الگوریتم‌های حل مسأله به شیوه آزمون و خطا، مبتنی بر جمعیت و با ویژگی بهینه‌سازی فرا اکتشافی^{۱۱} یا تصادفی^{۱۲} هستند. در محاسبات تکاملی، یک مجموعه از جواب‌های کاندید اولیه برای مسأله تولید و در یک فرآیند تکراری به روز رسانی می‌شوند. در هر نسل، به طور تصادفی، جواب‌های نامطلوب حذف می‌شوند و تغییرات کوچکی در

¹ Computational linguistics

² Anomalies

³ Affective computing

⁴ Human-computer interactions

⁵ Sentiment analysis

⁶ Polarity

⁷ Evolutionary computation

⁸ Soft computing

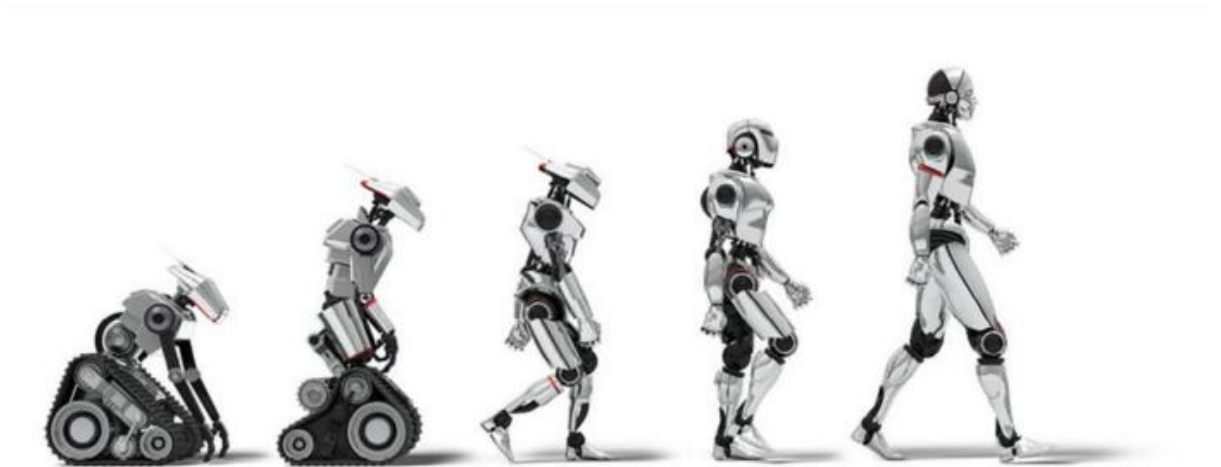
⁹ Global optimization

¹⁰ Biological evolution

¹¹ Metaheuristics

¹² Stochastic

جواب‌های دیگر ایجاد می‌شود. جمعیت جواب‌های کاندید، تحت تأثیر فرآیندهای انتخاب طبیعی^۱ و جهش^۲، به سمت جواب‌های بهینه تکامل پیدا می‌کنند [۱۰]، [۲۷]–[۳۰].



شکل ۱۱-۲: فرآیند تکامل یک ربات انسان‌نما

✓ الگوریتم‌های تکاملی

الگوریتم‌های تکاملی^۳ زیر شاخه‌ای از محاسبات تکاملی هستند. الگوریتم‌هایی برای حل مسائل بهینه‌سازی هستند و شامل تکنیک‌هایی می‌شوند که از مکانیزم‌های الهام گرفته شده از تکامل زیستی نظیر جهش، ترکیب^۴، تولید مثل^۵، انتخاب طبیعی^۶ و بقای بهترین‌ها^۷ برای تولید جواب‌های کاندید حل مسئله استفاده می‌کنند. به این مکانیزم‌ها، عملگرهای تکاملی نیز گفته می‌شود. جواب‌های کاندید، نقش نمونه‌ها در جمعیت را ایفا می‌کنند و تابع هزینه^۸، برازندگی محیطی که جواب کاندید در آن قرار دارد را مشخص می‌کند. پس از تعدادی نسل، جمعیت جواب‌های کاندید از طریق عملگرهای تکاملی، به سمت جواب‌های بهینه تکامل پیدا می‌کنند. الگوریتم‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی مورچگان^۹، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^{۱۰}، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته^{۱۱} و سایر موارد از جمله الگوریتم‌های تکاملی هستند.

در این جا لازم است تفاوت میان دو اصطلاح اکتشافی (Heuristics) و فرا اکتشافی (Metaheuristics) شرح داده شود. این دو اصطلاح، برای نام‌گذاری الگوریتم تکاملی جستجو و بهینه‌سازی استفاده می‌شوند. با این حال، تفاوت‌های اساسی با یکدیگر دارند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

¹ Natural selection

² Mutation

³ Evolutionary algorithms

⁴ Recombination

⁵ Reproduction

⁶ Natural selection

⁷ Survival of fittest

⁸ Cost function

⁹ Ant colony optimization

¹⁰ Simulated annealing

¹¹ Cuckoo optimization algorithm

- الگوریتم‌های اکتشافی: این دسته از الگوریتم‌ها، روش‌های وابسته به مسأله^۱ هستند. مشخصات این الگوریتم‌ها، بسته به مسأله‌ای که قرار است بهینه‌سازی کنند، متفاوت خواهد شد. از آنجایی که این الگوریتم‌ها، بسیار حریصانه^۲ هستند، در دام بهینه محلی^۳ قرار می‌گیرند و نمی‌توانند به خوبی به جواب بهینه سراسری همگرا شوند.
- الگوریتم‌های فرا اکتشافی: در نقطه مقابل الگوریتم‌های اکتشافی، الگوریتم‌های فرا اکتشافی قرار دارند. این دسته از روش‌ها، مستقل از مسأله هستند و مشخصات آن‌ها برای حل مسائل بهینه‌سازی مختلف، یکسان خواهد بود. از آنجایی که حریصانه نیستند، تقریب نزدیک از جواب بهینه سراسری را نیز به عنوان جواب بهینه به دست می‌آورند. در نتیجه، می‌توانند فضای جواب‌های مسأله را با دقت بیشتری بسنجند و در بسیاری از موارد، جواب بهینه بسیار خوب و حتی بهینه سراسری را تولید کنند.

• سیستم‌های مستقل یا خودگردان^۴

این دسته از سیستم‌ها، زیر شاخه‌ای از فناوری‌های هوش مصنوعی محسوب می‌شوند و در تلاقی حوزه‌های رباتیک و سیستم‌های هوشمند قرار می‌گیرند. این دسته از سیستم‌ها، بخشی از سیستم‌های نوینی هستند که پا را فراتر از خودکار کردن ساده فرایندها می‌گذارند. این سیستم‌ها، به جای اینکه چندین فعالیت را بدون کوچک‌ترین تغییر و به طور خودکار انجام دهند، قادر به حس کردن محیط عملیاتی خود هستند و به شکل پویا، به تغییرات محیطی پاسخ داده و اهداف خود را تحقق می‌بخشند [۱۰]، [۱۳].

• هوش مصنوعی توزیع شده

هوش مصنوعی توزیع شده^۵ دسته‌ای از فناوری‌های هوش مصنوعی است که از طریق توزیع یک مسأله به عامل‌های مستقل (خودگردان)^۶ اقدام به حل مسأله می‌کنند. عامل‌های خودگردان در محیط عملیاتی، همیشه در حال تعامل با یکدیگر هستند [۱۰]، [۱۳]، [۳۱]–[۳۴].

✓ سیستم‌های چند عامله^۷

یک سیستم خود سازمانده کامپیوتری است که از مجموعه‌ای از عامل‌های هوشمند که در حال تعامل با یکدیگر هستند، تشکیل شده است. این سیستم‌ها قادرند مسائلی که حل آن‌ها برای یک عامل، بسیار سخت یا غیر ممکن است را حل کنند. عامل‌ها می‌توانند نرم‌افزار یا روبات باشند. عامل‌ها به سه دسته عامل‌های غیرفعال (بدون هدف)، فعال (با هدف ساده) و یا شناختی (انجام محاسبات پیچیده) تقسیم‌بندی می‌شوند.

✓ مدل‌سازی چند عامله

¹ Problem-dependent

² Greedy

³ Local optimum

⁴ Autonomous systems

⁵ Distributed artificial intelligence

⁶ Autonomous agents

⁷ Multi-agent systems

مدل‌سازی چند عامله^۱، تکنیک‌های مدل‌سازی بسیار قدرتمندی هستند. در این مدل‌سازی، سیستم در قالب مجموعه‌ای از موجودیت‌های تصمیم‌گیرنده خودگردان تعریف می‌شود. به این موجودیت‌ها، عامل گفته می‌شود. هر عامل، وضعیت و محیط اطراف خود را ارزیابی می‌کند. سپس، بر اساس اطلاعات حاصل شده و مجموعه‌ای از قوانین تعریف شده تصمیم‌گیری و در نهایت در محیط عملیاتی فعالیت می‌کند.

✓ هوش ازدحامی

هوش ازدحامی، به رفتار تجمعی (گروهی) سیستم‌های خودسازمانده، غیرمتمرکز و مصنوعی (طبیعی) گفته می‌شود. این مفهوم، در هوش مصنوعی بسیار استفاده می‌شود. چنین سیستم‌هایی از یک جمعیت متشکل از عامل‌های ساده تشکیل شده‌اند که به صورت محلی و در محیط عملیاتی خود با یکدیگر در حال تعامل هستند. الهام‌بخش سیستم‌های هوش ازدحامی، طبیعت و به ویژه سیستم‌های زیستی هستند. عامل‌ها قوانین ساده‌ای را دنبال می‌کنند و اگرچه سیستم کنترلی متمرکز برای مشخص کردن رفتار عامل‌ها وجود ندارد اما تعامل محیطی و محلی آن‌ها منجر به ظهور رفتار هوشمند سراسری می‌شود. عامل‌ها از وجود چنین ساختار هوشمندی در محیط بی‌خبر هستند.

• محاسبات محیطی

محاسبات محیطی^۲ که به آن هوش محیطی نیز گفته می‌شود، اصطلاحی است که مفاهیم متنوع زیادی را شامل می‌شود. این اصطلاح، به ترکیبی از نرم‌افزار، سخت‌افزار، تعاملات کاربری، تعاملات انسان-ماشین و یادگیری اطلاق می‌شود. در چارچوب محاسبات محیطی، تمامی دستگاه‌های فیزیکی موجود در محیط دیجیتال باید قابلیت حس کردن، درک و پاسخ به محرک‌های خارجی محیطی (که معمولاً توسط عامل انسانی فعال می‌شوند) را داشته باشند. محاسبات محیطی، اکوسیستمی از دستگاه‌ها یا کامپیوترهای متصل به اینترنت تعریف می‌کند که در آن تمامی عناصر این اکوسیستم، به طور مداوم در حال پردازش و به اشتراک‌گذاری اطلاعات هستند. سیستم‌های الکترونیکی تشکیل‌دهنده این اکوسیستم به حضور افراد در محیط حساس بوده و به آن‌ها پاسخ می‌دهند. اینترنت اشیاء^۳، مهم‌ترین نمونه چنین سیستم‌هایی است [۱۰]، [۱۳]، [۳۵].

با توجه به مطالب مطرح شده در خصوص انواع الگوریتم‌های هوش مصنوعی نتیجه گرفته می‌شود که برای حل مسائل هوش مصنوعی در بسیاری از موارد ممکن است لازم باشد تا از ترکیبی از الگوهای مختلف هوش مصنوعی استفاده شود. به عبارت دیگر، از بیش از یک فناوری موجود در حوزه هوش مصنوعی برای حل مسائل در دامنه‌های مختلف استفاده می‌شود. آموزش انجام خودکار فعالیت‌ها (خاص یا عمومی) به کامپیوتر، بدون اینکه دستورالعمل‌های صریحی برای انجام آن‌ها داده شود، کار بسیار سختی است. چنین کاری نیازمند استفاده از فناوری‌های مختلف و طراحی هوشمندانه راه‌حل با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در دسترس است.

۷-۲- جایگاه ایران در نظام رتبه‌بندی SCImago در زمینه هوش مصنوعی

سایمگو^۴ یک پایگاه اطلاعاتی است که در سال ۲۰۰۸ با همکاری چندین موسسه اروپایی و دانشگاه گرانادا در اسپانیا شکل گرفت و در حوزه علم سنجی یک مرجع به شمار می‌رود. این پایگاه، هر ساله ۵ هزار مؤسسه آموزشی و تحقیقاتی جهان را بر اساس عملکرد پژوهشی و میزان انتشار مقالات در مجلات معتبر جهانی ارزیابی می‌کند و به این ترتیب امکان بررسی سطح

¹ Multi-agent modelling

² Ambient computing

³ Internet of thing

⁴ SCImago

علمی کشورها و نشریات را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. سایمگو داده‌های مربوط به سال‌های ۱۹۹۶ به بعد را پوشش می‌دهد. همچنین این پایگاه اطلاعاتی علمی به طور روزانه به‌روزرسانی می‌شود. از این رو این نظام رتبه‌بندی امکان مقایسه تولیدات علمی کشورها به همراه ارائه نمودارهای با کیفیت، جستجوی پیشرفته مجلات در حوزه‌های مختلف، رتبه‌بندی کشورها از نظر تولیدات علمی و رتبه‌بندی مجلات بر اساس چندین فاکتور را ارائه می‌دهد. هدف از این رتبه‌بندی کسب شناخت از مؤسسات پژوهشی و تحقیقاتی و تخصیص استنادهای علمی به هر مؤسسه است.

در جدول ۳-۲ شاخص‌های آماری ۵۰ کشور نخست در حوزه دانش هوش مصنوعی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ میلادی در نظام رتبه‌بندی سایمگو نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است کشور چین با انتشار ۱۶۰۱۲۹ سند در رتبه اول قرار داد و کشورهای آمریکا و ژاپن و هند و بریتانیا رتبه‌های دوم تا پنجم را به خود اختصاص داده‌اند. کشور ایران در طی این ۲۳ سال با انتشار ۱۱۵۴۷ سند که تعداد ۱۱۳۷۳ از آن‌ها قابل استناد بوده، رتبه ۱۵ در جهان را کسب کرده است که جایگاه بسیار شایسته‌ای است.

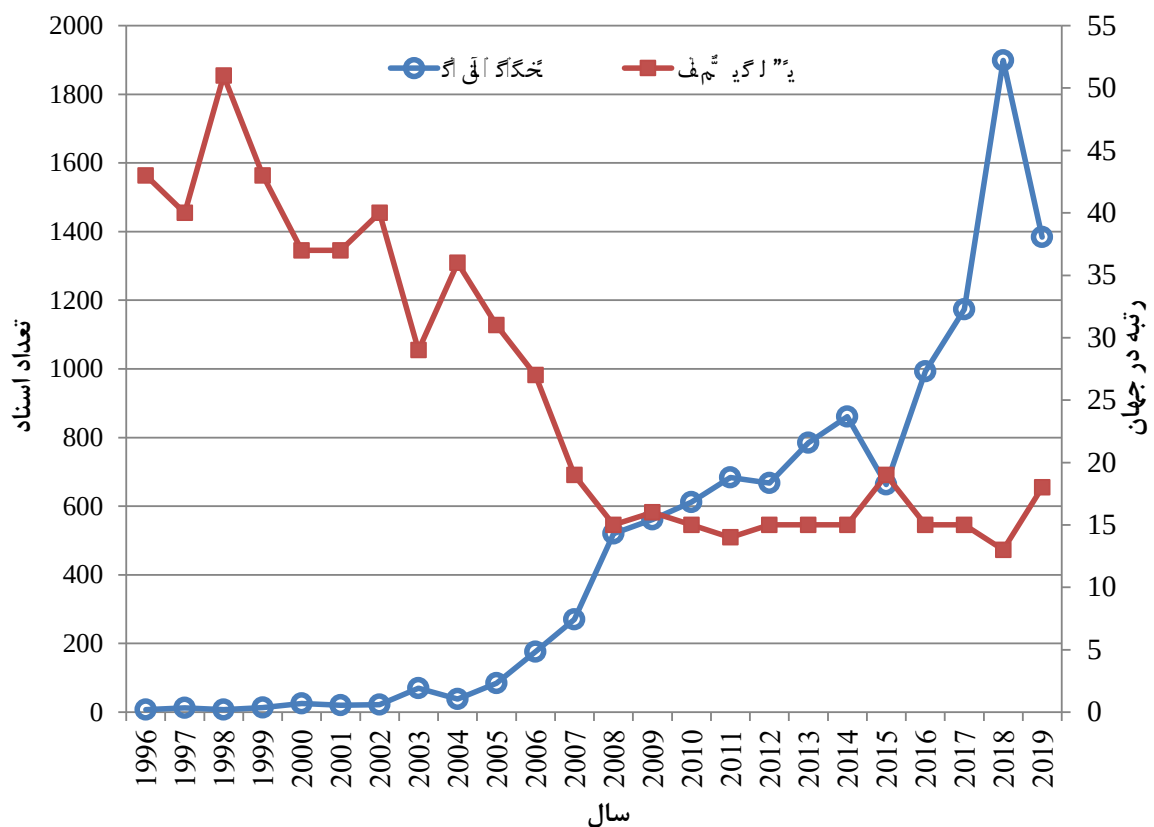
جدول ۳-۲: ۵۰ کشور نخست در حوزه دانش هوش مصنوعی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ در نظام رتبه‌بندی سایمگو

ردیف	کشور	تعداد مقالات	تعداد مقالاتی که به آن‌ها ارجاع داده شده	تعداد کل ارجاعات	شاخص تعداد ارجاع به ازای هر مقاله	شاخص Hindex
1	چین	160129	158540	1111957	6.94	261
2	آمریکا	139990	135627	2635801	18.83	501
3	ژاپن	48538	47436	332800	6.86	164
4	هند	45840	44665	209279	4.57	137
5	بریتانیا	42705	40600	696566	16.31	266
6	آلمان	35133	33829	438298	12.48	213
7	فرانسه	28544	27511	364084	12.76	188
8	ایتالیا	25548	24076	283007	11.08	164
9	اسپانیا	25020	23789	318954	12.75	173
10	کانادا	23161	22433	446445	19.28	216
11	کره جنوبی	22368	21995	186691	8.35	133
12	استرالیا	21420	20586	270031	12.61	168
13	تایوان	19697	19298	295379	15	173
14	برزیل	13990	13705	85720	6.13	98
15	ایران	11547	11373	96475	8.35	101
16	هلند	11433	10951	192080	16.8	158
17	ترکیه	10058	9915	117102	11.64	127
18	لهستان	9605	9118	84252	8.77	95
19	سنگاپور	9599	9295	174653	18.19	157
20	هنگ کنگ	9332	9090	204497	21.91	168
21	مالزی	8367	8218	52037	6.22	77
22	سوئیس	7328	6993	147988	20.19	152
23	پرتغال	7288	6908	58893	8.08	87
24	یونان	7223	7022	79973	11.07	107
25	روسیه	6834	6590	19856	2.91	47
26	مکزیک	6611	6291	43305	6.55	78

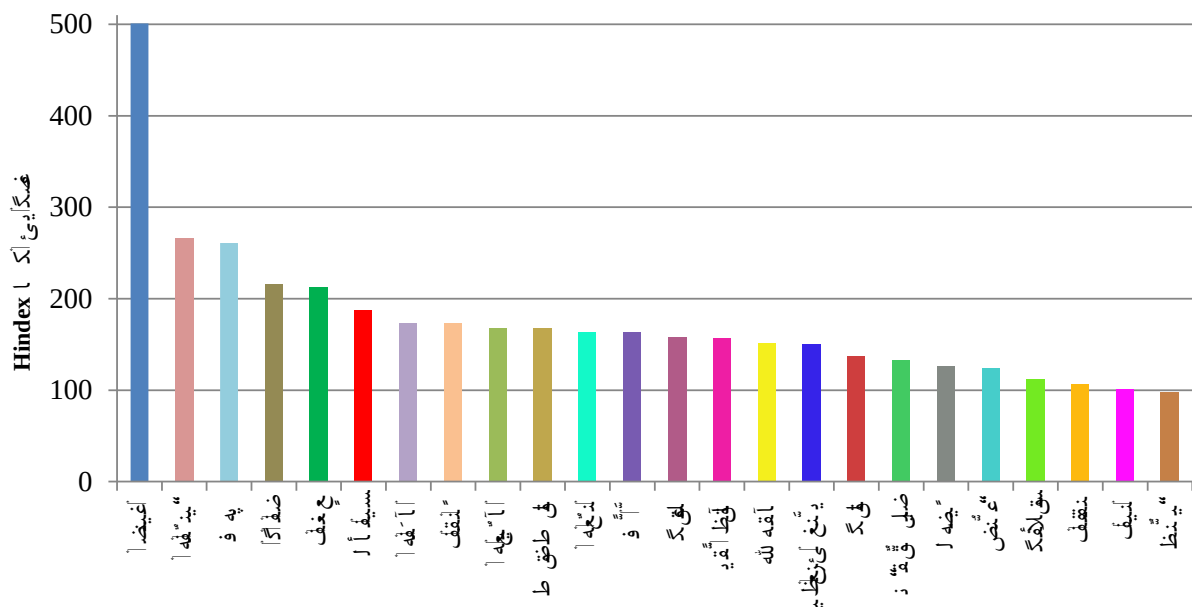
ردیف	کشور	تعداد مقالات	تعداد مقالاتی که به آن‌ها ارجاع داده شده	تعداد کل ارجاعات	شاخص تعداد ارجاع به ازای هر مقاله	شاخص Hindex
27	سوئد	6511	6297	64568	9.92	89
28	جمهوری چک	6388	6224	45398	7.11	77
29	بلژیک	6376	6118	120397	18.88	124
30	رومانی	6137	6046	22559	3.68	53
31	اندونزی	6108	6050	8946	1.46	28
32	استرالیا	6023	5705	61394	10.19	87
33	فنلاند	5452	5318	102237	18.75	112
34	رژیم اشغالگر	5240	5067	139092	26.54	150
35	تایلند	4501	4315	15001	3.33	45
36	عربستان	4168	4073	36975	8.87	79
37	دانمارک	3862	3652	33888	8.77	70
38	پاکستان	3766	3710	18627	4.95	52
39	آفریقای جنوبی	3563	3432	16080	4.51	47
40	ایرلند	3392	3258	27672	8.16	68
41	مجارستان	3344	3273	21579	6.45	60
42	نروژ	3338	3237	27920	8.36	67
43	مصر	3242	3097	22296	6.88	61
44	نیوزلند	3204	3065	33594	10.49	74
45	اسلواکی	2556	2506	15599	6.1	51
46	الجزایر	2506	2473	12529	5	47
47	تونس	2484	2419	10914	4.39	40
48	ویتنام	2361	2256	10339	4.38	40
49	مراکش	2329	2281	5729	2.46	27
50	امارات	2169	2101	9734	4.49	38

شکل ۱۲-۲ آمار تعداد مقالات و رتبه ایران بر اساس نظام رتبه‌بندی سایمگو در حوزه دانش هوش مصنوعی در طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ میلادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است رتبه ایران در طی این سالیان از حوالی رتبه ۴۰ به رتبه زیر ۲۰ ارتقا یافته است و این بیانگر رشد چشم‌گیر این دانش در کشور است.

در شکل ۱۳-۲ مقدار متوسط شاخص H index برای بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ میلادی نشان داده شده است. شاخص H index، یک شاخص مناسب برای سنجش کیفیت اسناد منتشر شده است. مقدار این شاخص بیانگر حداقل تعداد اسنادی است که به همان میزان به آن‌ها استناد شده است. به عنوان مثال اگر مقدار این شاخص برابر ۲۰ باشد بدین معنی است که حداقل ۲۰ سند وجود دارد که به هر کدام حداقل ۲۰ بار استناد شده است. از دیدگاه این شاخص، ایران در رتبه ۲۴ دنیا قرار گرفته است، در صورتی که به لحاظ تعداد اسناد منتشرشده در رتبه ۱۵ دنیا قرار دارد. آمریکا، بریتانیا و چین در صدر این رتبه‌بندی از دیدگاه شاخص H index قرار دارند. ترکیه، هنگ کنگ، سنگاپور، رژیم اشغال‌گر، فنلاند، یونان، سوئیس و بلژیک که به لحاظ تعداد اسناد در رتبه‌های بعدی نسبت به ایران قرار گرفته‌اند، اما از دیدگاه شاخص H index دارای وضعیت بهتری نسبت به کشور ایران هستند.



شکل ۱۲-۲: تعداد مقالات و رتبه ایران در جهان بر اساس نظام رتبه‌بندی سایمگو در حوزه دانش هوش مصنوعی در طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ میلادی



در جهان بر اساس نظام رتبه‌بندی سایمگو در حوزه دانش هوش مصنوعی در طی Hindex شکل ۱۳-۲: مقدار شاخص سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ میلادی

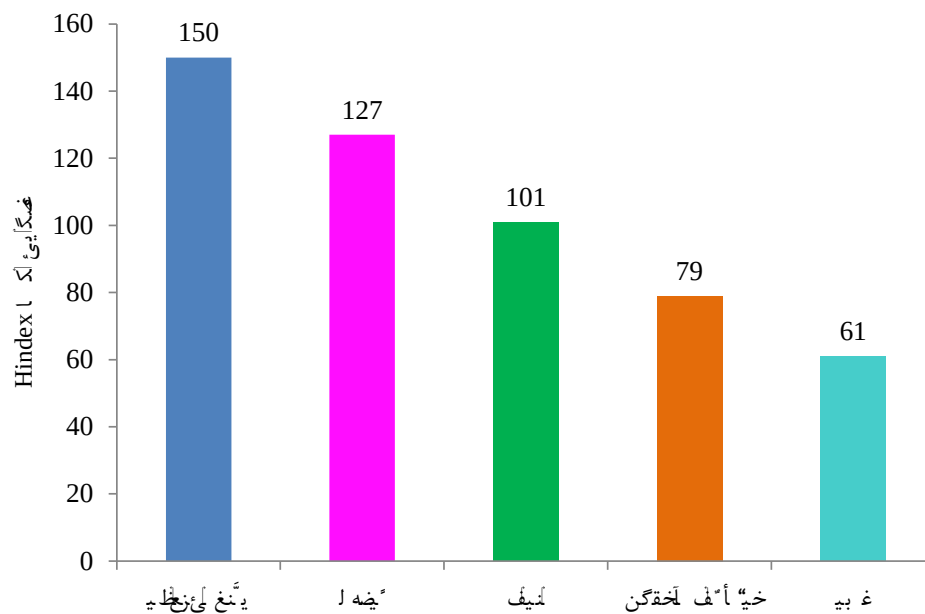
در جدول ۴-۲ شاخص‌های آماری کشورهای منطقه خاورمیانه در حوزه دانش هوش مصنوعی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ میلادی در نظام رتبه‌بندی سایمگو نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است کشور ایران در رتبه اول قرار داد.

این رده‌بندی نشان می‌دهد کشورهای ترکیه، رژیم اشغال‌گر، عربستان سعودی، مصر، امارات، اردن، قطر، عراق و لبنان رتبه‌های دوم تا دهم را به خود اختصاص داده‌اند. سوریه که در این رده بندی آخرین کشور در سطح خاورمیانه است، تنها ۵۱ مقاله در زمینه علم هوش مصنوعی در طول این سالیان منتشر کرده است.

در شکل ۲-۱۴ پنج کشور نخست در خاورمیانه از دیدگاه این شاخص نشان داده شده است. اگرچه طبق جدول ۴-۲، ایران به لحاظ تعداد اسناد در رتبه اول قرار دارد اما همان‌طور که شکل ۲-۱۴ مشخص است از لحاظ شاخص H index در رتبه سوم قرار دارد. این در حالی است که رژیم اشغال‌گر به لحاظ شاخص H index در خاورمیانه در رتبه اول قرار دارد ولی به لحاظ تعداد اسناد در رتبه سوم است.

جدول ۴-۲: رتبه‌بندی کشورهای منطقه خاورمیانه در حوزه دانش هوش مصنوعی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۸ در نظام رتبه‌بندی سایمگو

ردیف	کشور	تعداد مقالات	تعداد مقالاتی که به آن‌ها ارجاع داده شده	تعداد کل ارجاعات	شاخص تعداد ارجاع به ازای هر مقاله	شاخص Hindex
1	ایران	11547	11373	96475	8.35	101
2	ترکیه	10058	9915	117102	11.64	127
3	رژیم اشغالگر	5240	5067	139092	26.54	150
4	عربستان سعودی	4168	4073	36975	8.87	79
5	مصر	3242	3097	22296	6.88	61
6	امارات	2169	2101	9734	4.49	38
7	اردن	1160	1132	7711	6.65	38
8	قطر	884	857	8750	9.9	47
9	عراق	806	798	2081	2.58	19
10	لبنان	777	760	4446	5.72	30
11	کویت	604	579	4823	7.99	30
12	عمان	387	371	2358	6.09	21
13	بحرین	221	219	443	2	11
14	فلسطین	183	181	1367	7.47	19
15	یمن	83	81	509	6.13	11
16	سوریه	51	51	522	10.24	11



شکل ۱۴-۲: پنج کشور نخست منطقه خاورمیانه در حوزه دانش هوش مصنوعی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ در نظام H index رتبه‌بندی نظام سایمگو بر اساس شاخص

با توجه به این آمار، نتیجه گرفته می‌شود که ایران به لحاظ انتشار اسناد معتبر علمی در جایگاه مناسبی قرار دارد و باید با همین روند رو به جلو حرکت کند و همچنین متخصصین این حوزه در بالابردن کیفیت اسناد تلاشی دوچندان نمایند.

فصل ۳- یادگیری ماشین

۱-۳- مقدمه

به عنوان یکی از شاخه‌های وسیع و پرکاربرد هوش مصنوعی، یادگیری ماشین به تنظیم و اکتشاف شیوه‌ها و الگوریتم‌هایی می‌پردازد که بر اساس آن‌ها رایانه‌ها و سامانه‌ها توانایی تعلّم و یادگیری پیدا می‌کنند. لذا در این فصل، مفهوم یادگیری ماشین و تاریخچه آن ارائه می‌شود. سپس دسته‌بندی انواع تکنیک‌های یادگیری ماشین ارائه شده و به صورت اجمالی توضیح داده می‌شوند تا در فصل‌های توضیحات تکمیلی هریک از آن‌ها ارائه شود.

۲-۳- تعریف یادگیری ماشین

در سال ۱۹۵۰، آلن تورینگ^۱ در مقاله‌ای سوالی را مطرح کرد " که آیا ماشین فکر می‌کند؟ در این مقاله به توصیف بازی تقلید^۲ پرداخته که شامل ۳ شرکت‌کننده می‌باشد. یک انسان که کار قضاوت را به عهده دارد و یک انسان که شرکت‌کننده است و یک کامپیوتر که تلاش می‌کند خود را جای انسان جا بزند. قاضی با تایپ سؤالاتی در پایانه برنامه با شرکت‌کننده‌ها صحبت می‌کند و در جواب آن‌ها باید تشخیص دهد کدام کامپیوتر است. حال اگر قاضی نتواند همواره تفاوت مابین جواب کامپیوتر و انسان شرکت‌کننده را تشخیص دهد، کامپیوتر برنده می‌شود.

در سال ۱۹۵۹، آرتور ساموئل^۳ امریکایی یکی از پیشروهای حوزه بازی‌های کامپیوتری و هوش مصنوعی، عبارت "یادگیری ماشین" را زمانی که در IBM کار می‌کرد به ثبت رساند. وی یادگیری ماشین را این‌چنین تعریف کرد: روش‌هایی که رایانه‌ها را قادر می‌سازند، یاد بگیرند، بدون آن‌که به طور صریح برنامه‌نویسی شده باشند. منظور آقای ساموئل از برنامه صریح همان دستورات شرطی اگر-آن‌گاه (if-then) است. در دستورات شرطی، برنامه‌نویس خودش یک سری شرط‌ها را تعیین می‌کند و طبق آن سیستم یک کاری را انجام می‌دهد و اگر داده جدید یک مقدار تغییرات داشته باشد کامپیوتر نمی‌تواند مسئله را حل کند. ولی در یادگیری ماشین کاربر به مدل داده‌های مختلف ارائه می‌دهد و طبق آن داده‌ها مدل ساختار خودش را تنظیم می‌کند و در نهایت کامپیوتر می‌تواند روی داده جدیدی که تغییراتی هم کرده باز هم درست کار کند [۳۶]، [۳۷].

در واقع یادگیری ماشین شبیه یک بچه تازه متولد شده عمل می‌کند. بچه، به مرور زمان و با قرار گرفتن در معرض تجارب گوناگون، توانا می‌شود. الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز با قرار گرفتن در معرض داده‌ها، یاد می‌گیرند آرتور ساموئل، سعی داشت به یک رایانه یاد دهد تا چکرز، بازی کند. هدف او این بود که برنامه‌ای بنویسد تا بتواند خودش را در بازی چکرز، شکست دهد. او نهایتاً موفق به این کار شد و در سال ۱۹۶۲، برنامه او، یکی از قهرمانان چکرز را شکست داد.

هدف در یادگیری ماشین معرفی تکنیک‌هایی برای یافتن یک الگو در اطلاعات و استفاده از آن الگو برای پیشگویی است. با استفاده از یادگیری ماشین و تجزیه و تحلیل حجم عظیمی از اطلاعات و فرآیند یادگیری، رایانه‌ها می‌توانند پیش‌بینی و قضاوت نمایند تا از این طریق انسان‌ها بتوانند تصمیمات بهتری بگیرند. بنابراین بنیان یادگیری ماشین مبتنی است بر یافتن یک تابع هدف f که بهترین نگاشت^۴ بین متغیر ورودی X و متغیر خروجی Y می‌باشد به گونه‌ای که $Y=f(X)$ است. هدف یادگیری ماشین یافتن نگاشت بهینه است که بتواند تخمین و قضاوت دقیق‌تری از خروجی را ارائه دهد. با توجه به این توضیحات، می‌توان فهمید دستیابی به هوش مصنوعی بدون یادگیری ماشین امکان‌پذیر است ولی نیازمند میلیون‌ها خط کد به همراه قوانین و درخت‌های تصمیم‌گیری پیچیده است. بنابراین به جای برنامه‌نویسی تمام جزئیات با استفاده از دستورهای مشخص جهت انجام عملیات،

¹ Alan Turing

² Imitation game

³ Arthur Samuel

⁴ Mapping

یادگیری ماشین استفاده می‌شود تا با استفاده از یک الگوریتم یادگیری عملیات را فرا بگیرد. فرآیند یادگیری شامل تزریق حجم عظیمی از داده‌ها به الگوریتم است تا به آن اجازه دهیم به مرور خود را بهبود و تنظیم کند. به عنوان مثال استفاده از یادگیری ماشین طی سال‌های گذشته باعث شده تا بهبود چشم‌گیری را در بینایی کامپیوتر شاهد باشیم (قابلیت تشخیص اشیا در تصاویر و ویدیوها) [۳۶]–[۴۲].

اگرچه جامعه آکادمیک هنوز یک تعریف منسجم و شناخته‌شده از یادگیری ماشین را تهیه نکرده‌اند، اما دو تعریف که امروزه بیشتر از همه مورد استقبال است توسط سیمون^۱ و تام میشل^۲ ارائه شده‌اند که عبارتند از:

- تعریف سیمون: یادگیری ماشین عبارت است از هرگونه پیشرفت در سیستم است که سیستم را قادر می‌سازد هنگام انجام یک کار یا مشابه آن کار، بهتر عمل کند.
- تعریف تام میشل: (یک برنامه یادگیرنده) برنامه رایانه‌ای است که به آن گفته شده تا از تجربه E مطابق با برخی وظایف T و کارایی عملکرد P برای وظیفه T که توسط P سنجیده می‌شود، یاد بگیرد که تجربه E را بهبود ببخشد [۴۳].

امروزه خیلی از مواقع عبارت «یادگیری ماشین» به اشتباه به جای عبارت «هوش مصنوعی» به کار برده می‌شود. زیرا آن قدر کاربرد تکنیک‌های یادگیری ماشین گسترده شده است که تمام فضای هوش مصنوعی را تحت تاثیر خود قرار داده است. هدف هوش مصنوعی این است که به کامپیوترها آموزش دهد وظایف انسان را بهتر از او انجام دهد؛ و مسلماً یادگیری مهم‌ترین بخش این فرآیند است. اما به هر حال باید به این نکته توجه کرد که یادگیری ماشین زیرمجموعه هوش مصنوعی است و لذا هوش مصنوعی الزاماً یادگیری ماشین نیست. بدین معنی که همه الگوریتم‌های یادگیری ماشین، هوش مصنوعی محسوب می‌شوند ولی تمام الگوریتم‌های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین نیستند. برای مثال، گراف دانش^۳ و منطق نمادین^۴ شاخه‌هایی از هوش مصنوعی هستند اما هیچ‌کدام یادگیری ماشین محسوب نمی‌شوند. علت این که شاخه‌هایی از هوش مصنوعی مانند گراف دانش، یادگیری ماشین محسوب نمی‌شوند آن است که روش‌های یادگیری ماشین قادرند خود را بهبود ببخشند و تغییر کنند اما شاخه‌های ذکرشده چنین نیستند. تکنیک‌های یادگیری ماشین تکنیک‌هایی پویایی هستند که با قرار گرفتن در معرض داده‌ها، مدام تغییر می‌کنند و خیلی نیاز به دخالت انسان ندارند [۴۰]، [۴۲]، [۴۴].

با توجه به توضیحات فوق نتیجه گرفته می‌شود که یادگیری ماشین، مطالعه علمی الگوریتم‌ها و مدل‌های احتمالی است که کامپیوترها برای انجام وظایف محول شده، از آن‌ها استفاده می‌کنند. کامپیوترها برای انجام وظایف محوله دستورالعمل‌های صریح در اختیار ندارند و به جای آن بر الگوهای داده‌ای و استنتاجات قابل انجام روی آن‌ها برای حل مسأله و انجام وظایف تکیه می‌کنند.

۳-۳- تکنیک‌های یادگیری ماشین

تکنیک‌های یادگیری ماشین برای اینکه قادر باشند بدون داشتن دستورالعمل خاصی از جانب خبره انسانی، وظایف محوله را انجام دهند، یک مدل ریاضی مبتنی بر داده‌های نمونه (داده‌های آموزشی^۵) تولید می‌کنند. یادگیری ماشین، ارتباط بسیار نزدیک و تنگاتنگی با حوزه آمار محاسباتی^۶ دارد و مانند این حوزه، سعی در پیش‌بینی آماری با استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری دارد. در

¹ H. Simon

² Tom M. Mitchell

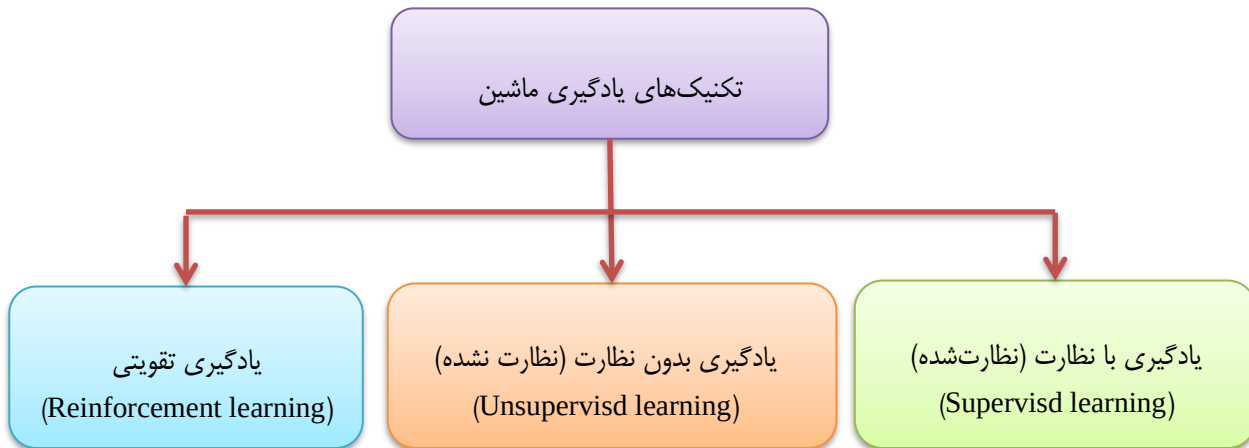
³ Knowledge graphs

⁴ Symbolic logic

⁵ Training data

⁶ Computational statistics

یک دسته‌بندی کلی، تکنیک‌های یادگیری ماشین بر اساس تفاوت اطلاعات ورودی مطابق با شکل ۱-۳ به سه دسته یادگیری نظارت شده^۱، یادگیری نظارت نشده^۲ و یادگیری تقویتی^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. البته نوع‌های دیگری از یادگیری مانند یادگیری انتقال^۴، یادگیری موازی^۵، یادگیری نیمه‌نظارتی^۶ و ... وجود دارد که به عنوان یک دسته مستقل در یادگیری ماشین به حساب نمی‌آیند. غالب این الگوریتم‌ها یا هم‌پوشانی زیادی با دیگر الگوریتم‌های موجود در سه دسته کلی یادگیری نظارت شده (بانظارت)، یادگیری نظارت نشده (بدون نظارت) و یادگیری تقویتی دارند دارند و یا از تکنیک‌های شناخته شده در این دسته‌ها برای حل مسأله استفاده می‌کنند [۳۶]–[۴۲].



شکل ۱-۳: انواع الگوریتم‌های یادگیری ماشین [۳۶]–[۴۲]

- در یادگیری با نظارت، داده I ام دارای دو بعد است که عبارتند از بردار داده ورودی I ام (X_i) و خروجی متناظر با آن (Y_i). تکنیک یادگیری نظارت شده، برای تصمیم‌گیری و انجام وظایف، یک مدل ریاضی از مجموعه داده‌ها تولید می‌کنند. این مجموعه داده، از داده‌های ورودی به سیستم و خروجی‌های مورد انتظار و مطلوب تشکیل شده‌اند. به این داده‌ها، داده‌های آموزشی نیز گفته می‌شود و از مجموعه‌ای از نمونه‌های آموزشی تشکیل شده‌اند. هر نمونه آموزشی، از یک یا چند داده ورودی و یک خروجی مطلوب تشکیل شده است. به خروجی مطلوب، سیگنال نظارتی^۷ نیز گفته می‌شود. یک الگوریتم یادگیری نظارت شده، داده‌های آموزشی را تحلیل و یک تابع استنباطی^۸ تولید می‌کند. از این تابع استنباطی، برای نگاشت نمونه‌های (داده‌های) جدید به خروجی استفاده می‌شود. در یک سناریوی ایده‌آل، الگوریتم یادگیری نظارت شده قادر خواهد بود تا برچسب‌های کلاسی^۹ یا خروجی داده‌های دیده‌نشده^{۱۰} را به درستی پیش‌بینی کند. در چنین حالتی، الگوریتم قادر است تا

¹ Supervised learning

² Unsupervised learning

³ Reinforcement learning

⁴ Transfer learning

⁵ Parallel learning

⁶ Semi-supervised learning

⁷ Supervisory signal

⁸ Inferred function

⁹ Class labels

¹⁰ Unseen data

آموزش انجام‌شده را از داده‌های آموزشی به داده‌های دیده‌نشده تعمیم^۱ دهد. مهم‌ترین نمونه الگوریتم‌های نظارت‌شده الگوریتم‌های کلاس‌بندی^۲ و رگرسیون^۳ هستند.

- در یادگیری بدون نظارت، داده i ام فقط حاوی اطلاعات بردار داده ورودی (X_i) است و خروجی متناظر با آن (Y_i) وجود ندارد. به عبارت دیگر، هر یک از داده‌ها، خروجی‌های مورد انتظار و مطلوب را در کنار خود ندارند. هدف پیدا کردن ساختارهایی نظیر گروه‌ها یا خوشه‌های^۴ داده‌ای در مجموعه داده‌های ورودی است. در یادگیری نظارت‌نشده، به جای اینکه به بازخورد حاصل از خروجی‌های مطلوب داده‌های ورودی واکنش نشان داده شود، سعی می‌شود تا شباهت‌های موجود میان داده‌های ورودی شناسایی شود. در مرحله بعد، به هر کدام از داده‌های ورودی جدید براساس وجود یا عدم وجود چنین شباهت‌هایی واکنش نشان داده می‌شود. به عبارت دیگر، یادگیری نظارت‌نشده، بدون اینکه خروجی مطلوب داده‌های ورودی را در اختیار داشته باشد، اقدام به شناسایی الگوهای از پیش شناخته‌نشده در داده‌های ورودی می‌کند. یکی از ویژگی‌های مهم این دسته، مدل‌سازی چگالی‌های احتمال در داده‌های ورودی است. روش‌هایی نظیر تحلیل خوشه‌ها و تحلیل مؤلفه اساسی^۵، از جمله مهم‌ترین تکنیک‌های یادگیری نظارت‌نشده هستند.
- در یادگیری تقویتی، یادگیرنده یک اقدام خاص در یک محیط پویا و تعاملی^۶ به‌گونه‌ای انجام می‌دهد که بیش‌ترین جایزه (سود/پاداش) تجمعی^۷ را در درازمدت کسب نماید. محیط عملیاتی در این دسته، معمولاً در قالب یک فرآیند تصمیم مارکوف^۸ نمایش داده می‌شود. تکنیک‌های یادگیری تقویتی، برای تعامل با محیط عملیاتی، نه تنها فرضیاتی مبنی بر وجود دانش قابل تحصیل از یک مدل ریاضی دقیق مارکوف انجام نمی‌دهند، بلکه معمولاً زمانی استفاده می‌شوند که به کارگیری یک مدل دقیق مارکوف نشدنی است. بیشتر تکنیک‌های یادگیری تقویتی، از روش‌های برنامه‌نویسی پویا^۹ استفاده می‌کنند. به دلیل عمومیت بالای حوزه یادگیری تقویتی، در شاخه‌های دیگری نظیر نظریه بازی^{۱۰}، نظریه کنترل^{۱۱}، تحقیق در عملیات^{۱۲}، نظریه اطلاعات^{۱۳}، بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی^{۱۴}، سیستم‌های چند عامله^{۱۵}، هوش ازدحامی^{۱۶}، آمار^{۱۷} و الگوریتم ژنتیک^{۱۸} نیز مورد مطالعه و استفاده قرار می‌گیرد.

¹ Generalization

² Classification

³ Regression

⁴ Cluster

⁵ Principal component analysis (PCA)

⁶ Interactive

⁷ Cumulative reward

⁸ Markov decision process

⁹ Dynamic programming

¹⁰ Game theory

¹¹ Control theory

¹² Operations research

¹³ Information theory

¹⁴ Simulation-based optimization

¹⁵ Multi-agent systems

¹⁶ Swarm intelligence

¹⁷ Statistics

¹⁸ Genetic algorithm

۴-۳- سیر تکاملی یادگیری ماشین

تکنیک‌های یادگیری ماشین در دهه ۱۹۸۰ میلادی توسعه عظیمی داشتند. الگوریتم‌های مانند درخت تصمیم‌گیری^۱، برنامه‌ریزی منطق استنتاجی^۲ و شبکه‌های عصبی انتشار رو به عقب^۳ در این دوره معرفی شدند. به عنوان مثال عملکرد روش شبکه‌های عصبی انتشار رو به عقب (BPNN) و روش ماشین یادگیری افراطی^۴ (ELM) توسط ساهین^۵ و همکاران [۴۵] برای تخمین میزان تابش خورشید در کشور ترکیه با یکدیگر مقایسه شدند. مطالعه مقایسه‌ای از نظر توانایی تخمین و سرعت یادگیری انجام شد که نشان داد مدل ELM عملکرد تخمین بهتری نسبت به مدل معمولی BPNN دارد.

در اواسط دهه ۱۹۹۰، الگوریتم ماشین‌های برداری پشتیبان^۶ (SVM)، به طور گسترده‌ای توسط جامعه دانشگاهی پذیرفته شد و در یادگیری آماری به تدریج به جریان اصلی تبدیل شد. به عنوان مثال سوسا^۷ و دیگر همکاران [۴۶] با استفاده از مدل ماشین‌های برداری پشتیبان (SVM) یک روش آماری برای تخمین کوتاه‌مدت میزان بار مصرف‌کنندگان در شبکه‌های قدرت ارائه دادند.

در ابتدای قرن ۲۱ میلادی، مدل‌های یادگیری عمیق (DL) با شبکه‌های عصبی چندلایه تحت عنوان شبکه‌های عصبی عمیق^۸ (DNN) مطرح شد و نشان داده شد که عملکرد بسیار خوبی در در مسائل پیچیده خاص مانند گفتار و پردازش تصویر دارند. با گسترش عظیم نظریه یادگیری محاسباتی^۹ و یادگیری آماری^{۱۰} (شامل یادگیری تقویتی (RL))، تکنیک‌های یادگیری ماشین در یک جریان بی‌پایان و به طور وسیع معرفی شده‌اند. سیر کلی تکاملی یادگیری ماشین از سال ۱۹۵۷ میلادی تا به امروز در شکل ۲-۳ نشان داده شده است [۱].

طبق نظر موریسون^{۱۱} و راتو^{۱۲} و ژو^{۱۳}، زیربنای تکنیک‌های یادگیری ماشینی عمدتاً از پنج دسته تشکیل شده است [۱]:

- ✓ نمادپردازها^{۱۴}
- ✓ بیزین‌ها^{۱۵}
- ✓ متصل‌کنندگان (پیونددهنده‌ها)^{۱۶}
- ✓ تکاملی‌ها^{۱۷}
- ✓ تجزیه و تحلیل‌کنندگان^{۱۸}

مقایسه این ۵ دسته که اساس همه تکنیک‌های موجود در یادگیری ماشین هستند، از جنبه‌های مختلف در جدول ۱-۳ نشان داده شده است.

1 Decision tree (DT)
 2 Inductive logic programming
 3 Backpropagation neural network (BPNN)
 4 Extreme learning machine (ELM)
 5 Şahin
 6 Support vector machine (SVM)
 7 Sousa
 8 Deep neural network (DNN)
 9 Computational learning theory
 10 Statistical learning
 11 Morrison
 12 Rao
 13 Zhou
 14 Symbolists
 15 Bayesians
 16 Connectionist
 17 Evolutionaries
 18 Analogizers

۵-۳- جریان کار معمول یادگیری ماشین

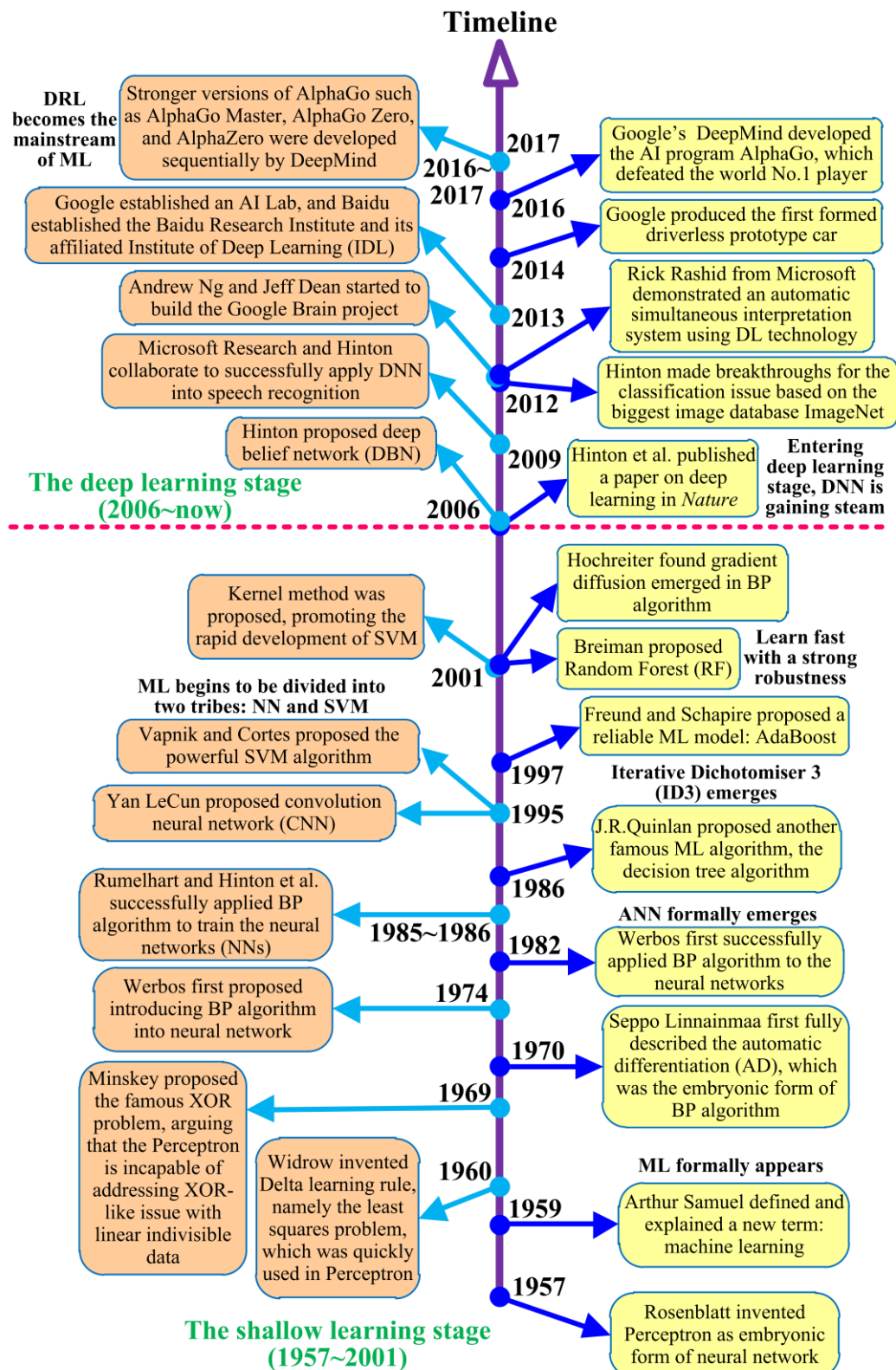
به کارگیری یادگیری ماشین معمولاً شامل چندین گام، از ورودی، پردازش داده‌ها تا خروجی نتایج است و می‌توان آن را توسط جریان کاری نشان داده شده در شکل ۳-۳ توصیف کرد. در کاربردهای معمول یادگیری ماشین گام‌های زیر طی می‌شود [۴۷]:

- ❖ داده نمونه بارگذاری می‌شود.
- ❖ داده‌ها به قالب ورودی مناسب برای الگوریتم تجزیه می‌شود.
- ❖ داده‌ها پیش‌پردازش می‌شود و عملیات متناسبی (حذف، جایگذاری با داده پیش‌فرض) بر روی رکوردهای داده‌ای ناقص اجرا می‌شود.
- ❖ داده‌ها به دو مجموعه تقسیم می‌شود، یکی برای ایجاد مدل (مجموعه داده آموزشی) و یکی برای سنجش مدل (مجموعه داده تست^۱ و مجموعه داده اعتبارسنجی^۲)
- ❖ الگوریتم اجرا می‌شود تا مدل یادگیری ماشین ساخته شده و یا آموزش داده شود.
- ❖ با استفاده از داده‌های آموزشی پیش‌بینی صورت می‌گیرد و نتایج مشاهده می‌شود.
- ❖ مدل با استفاده از داده‌های تست مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرد یا می‌توان از روش دیگری مدل را با استفاده از یک مجموعه داده سوم با تکنیک اعتبار سنجی متقابل^۳ که به آن مجموعه داده‌های اعتبارسنجی می‌گویند، ارزیابی کرد.

^۱ Test dataset

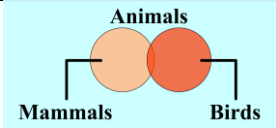
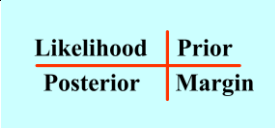
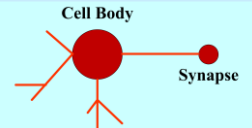
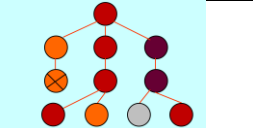
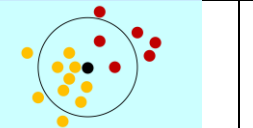
^۲ Validation dataset

^۳ Cross-validation



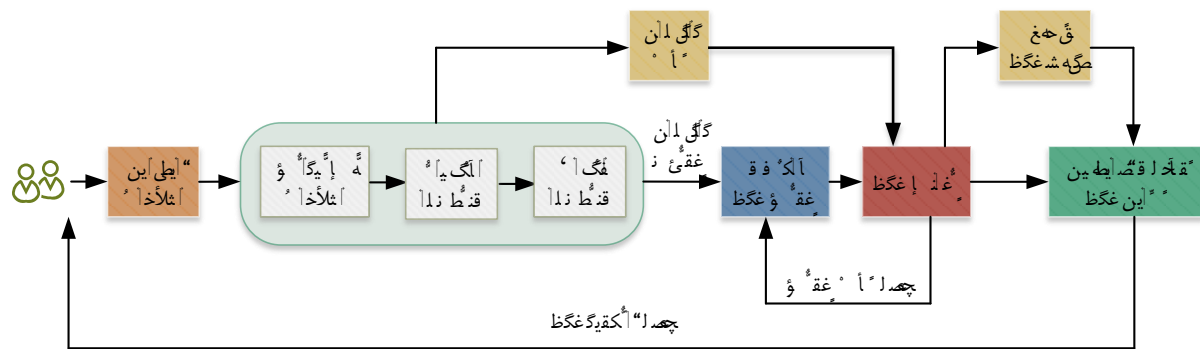
[۱] SVM و DNN، DL، BP شکل ۲-۳: سیر تکاملی تکنیک‌های یادگیری ماشین. تکنیک‌های

جدول ۱-۳: پنج دسته اصلی تکنیک‌های یادگیری ماشین و اطلاعات تاریخی توسعه آن‌ها [۱]

آیتم	دسته				
	نمادپردازها	بیزین‌ها	متصل‌کنندگان	تکاملی‌ها	تحلیل و تجزیه‌کنندگان
خاستگاه	فلسفه، تئوری منطق	علم آمار	علوم اعصاب	زیست‌شناسی تکاملی ^۱	علم روانشناسی
بیان گرافیکی					
ایده اصلی	شناخت (ادراک) عبارت است از محاسبه نمادها، قوانین و منطق برای نشان‌دادن دانش و ترسیم استنتاج منطقی (پیش‌بینی نتایج)	ارزیابی احتمال وقوع استنباط محتمل، اصلاح احتمال وقوع و تصمیم‌گیری بهینه	شناسایی و تعمیم پویای الگوها با ماتریس احتمالی سلول‌های عصبی وزن‌دهی‌شده (شبیه‌سازی مغز)	ایجاد تغییرات ایجاد و سپس ارزیابی سازگاری هر یک از آن‌ها برای یک هدف خاص با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)	بهینه‌سازی یک تابع با توجه به قیود و محدودیت‌ها (شباهت بین دانش قدیمی و جدید)
موضوع تحقیقات	ساختار دانش ^۲	عدم قطعیت	اختصاص اعتبار ^۳	کشف ساختاری ^۴	تشابه ^۵
الگوریتم‌های موردعلاقه	درخت تصمیم‌گیری	بیز ساده ^۶ و یا مارکوف	شبکه‌های عصبی	الگوریتم ژنتیک	ماشین‌های برداری پشتیبان
کاربرد	نقشه دانش ^۷	ضد هرزنامه، پیش‌بینی احتمالی	بینایی ماشین و تشخیص گفتار	ربات ستاره دریایی	سیستم توصیه‌گر شرکت Netflix
افراد ارائه دهنده	Tom Mitchell, Steve Muggleton, and Ross Quinlan	David Heckerman, Judea Pearl, and Michael Jordan	Yann LeCun, Geoff Hinton, and Yoshua Bengio	John Koda, John Holland, and Hod Lipson	Peter Hart, Vladimir Vapnik, and Douglas Hofstadter

¹ Evolutionary biology² Knowledge structure³ Credit assign⁴ Structural discovery⁵ Similarity⁶ Naive bayes⁷ Knowledge map

۱. مدل برای کارایی و دقت بهتر تنظیم می‌شود.
۲. مقیاس اجرای ساخت مدل افزایش داده می‌شود تا در آینده بتواند برای مجموعه‌های کلان داده مورد استفاده قرار گیرد.
۳. مدل یادگیری ماشین برای فرآیند تجاری به کار گرفته می‌شود.



شکل ۳-۳: جریان کار معمول یادگیری ماشین [۴۷]

معمولاً در الگوریتم‌های یادگیری ماشین روش‌هایی برای برخورد با میزان عدم تقارن توزیع احتمالی مجموعه داده‌ها دارد، که در علم آمار به آن چولگی^۱ می‌گویند. چولگی می‌تواند گاهی به‌طور وسیعی پراکنده باشد. در گام چهارم، مجموعه داده‌ها معمولاً به‌طور تصادفی به دو مجموعه داده‌های آموزشی و داده‌های تست تقسیم می‌شوند، که این فرآیند انتخاب نمونه نامیده می‌شود. مجموعه داده‌های آموزشی برای آموزش مدل استفاده می‌شود، در حالی که داده‌های تست برای ارزیابی کارایی بهتر مدل استفاده می‌شود. بهتر است که از مجموعه داده‌های آموزشی تا حد امکان برای آموزش استفاده شود تا کارایی عمومی مدل را افزایش داد. از سوی دیگر، از داده‌های تست یک بار استفاده شود تا در حین محاسبه خطای پیش‌بینی و مقادیر معیارهای مرتبط دیگر از چالش‌های بیش‌برازش^۲ یا کم‌برازش^۳ جلوگیری شود. بیش‌برازش پارامتری آماری است و معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که تعداد ویژگی‌های داده‌های آموزشی زیاد باشد و باعث وابستگی مدل به داده‌های آموزشی شده و برای داده‌های جدید با خطای زیاد پیش‌بینی کند. از سوی دیگر، کم‌برازش به مدلی اشاره دارد که نه می‌تواند داده‌های آموزشی را مدل کند و نه برای داده‌های جدید تعمیم‌پذیر است.

۶-۳- زبان‌های مناسب برنامه‌نویسی تکنیک‌های یادگیری ماشین

مهم‌ترین عاملی که باعث شده است یادگیری ماشین به یکی از داغ‌ترین موضوعات دنیای فناوری تبدیل شود به سرعت بالای رشد این فناوری و تصمیمات درستی باز می‌گردد که این تکنیک‌ها بر پایه داده‌ها اتخاذ می‌کنند. در حالی که یادگیری ماشین مزایای متعددی را به همراه دارد اما در مقابل، پیاده‌سازی الگوریتم‌های آن کار پیچیده و طاقت‌فرسایی است. به هر حال به لطف جامعه متن‌باز می‌توان از کتابخانه‌های از پیش ساخته‌شده در زبان‌های برنامه‌نویسی استفاده کرد. برای آن که ورود موفق به حوزه یادگیری ماشینی داشته باشیم باید زبان‌هایی را انتخاب کرد که در این زمینه بهترین هستند [۴۸].

¹ Skewness

² Overfitting

³ Underfitting

۱-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی پایتون

محققان اغلب از پایتون به نام چاقوی سویسی در حوزه یادگیری ماشین یاد می‌کنند. در حالی که این زبان اسکریپت‌نویسی سرعت بالایی ندارند، اما در مقابل ماژول‌های تحلیل داده‌ای قدرتمندی همچون `pandas` و `Numpy` در اختیار دارد که عملکرد این زبان در حوزه تحلیل داده‌ها را بسیار قوی کرده‌اند. مهم‌ترین عاملی که باعث شده است این زبان برای توسعه‌دهندگان و متخصصان علم داده‌ها محبوب شود به توانایی بالای آن در حل مشکلات پیچیده در کوتاه‌ترین زمان و ساده‌ترین شکل ممکن باز می‌گردد. زبان برنامه‌نویسی پایتون در زمینه یادگیری ماشین نیز چارچوب‌ها و کتابخانه‌هایی همچون `Paytorch`, `Keras`, `Theano`, `TensorFlow`, `Pyleam` و `Scikit-learn` در اختیار کاربر قرار می‌دهد [۴۸]–[۵۰].

ویژگی‌های کلیدی این زبان برنامه‌نویسی عبارتند از:

- ❖ سرعت توسعه نسبتاً سریع
- ❖ وجود مجموعه کتابخانه‌ها و ابزار متنوع در این زبان
- ❖ فراهم آوردن تعادل بین برنامه‌نویسی سطح پایین و سطح بالا
- ❖ امکان اجرای الگوریتم‌ها بدون نیاز به پیاده‌سازی آن‌ها
- ❖ به طور فعالانه در حال توسعه

۲-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی اسکالا

این زبان برنامه‌نویسی شیء‌گرا و تابعی، گزینه ایده‌آلی برای پیاده‌سازی یادگیری ماشینی است. این زبان به شکل ساده‌ای به کاربر اجازه می‌دهد فرآیند اشکال‌زدایی و تنظیم پارامترها را انجام دهد. این زبان به خوبی با سکوی آپاچی اسپارک یکپارچه می‌شود. در حالی که `Pyspark` که یک سکوی اسپارک مبتنی بر اسکالا است، اما از این موضوع نباید غافل شد که این زبان در مقایسه با پایتون محدودیت‌های متعددی داشته و همچنین در زمان کار با کتابخانه‌های اسپارک نیز کنترل کمتری در اختیار کاربر قرار می‌دهد. اسکالا همچنین ماژول‌های یادگیری عمیق `DeepLearning4j` و `H2o.ai` را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. همچنین کتابخانه‌های ویژه‌ای همچون `Saddle` که شبیه به ماژول `Pandas` زبان برنامه‌نویسی پایتون است را در زمینه کار با داده‌ها در اختیار کاربر قرار می‌دهد [۴۸]، [۵۱].

۳-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی R

زمانی که صحبت از یادگیری ماشین و داده‌های حجیم به میان می‌آید امکان ندارد از زبان برنامه‌نویسی `R` غافل شد. زبان برنامه‌نویسی که در زمینه محاسبات آماری و مجازی‌سازی تبحر خاصی دارد. این زبان به شکل گسترده‌ای در حوزه‌های داده‌کاری و علم داده‌ها استفاده می‌شود. زبان برنامه‌نویسی `R` این قابلیت را دارد تا داده‌های چند بعدی را به ساده‌ترین و موثرترین شکل مدیریت کند. صرفنظر از این که زبان برنامه‌نویسی `R` در زمینه کار با داده‌های حجیم کاملاً حرفه‌ای عمل می‌کند، اما در کنار آن مجموعه بزرگی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. البته به این نکته باید توجه داشت که در زمینه الگوریتم‌های یادگیری عمیق نباید روی زبان برنامه‌نویسی `R` حساب باز کرد. این زبان برنامه‌نویسی از `OS X`, `windows` و `Linux` پشتیبانی می‌کند. همچنین چارچوب‌های معروفی در حوزه یادگیری ماشین مانند `TensoFlow` و `Keras` در زبان برنامه‌نویسی `R` قابل استفاده هستند [۴۸]، [۵۲]، [۵۳].

۴-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی جولیا

زبان برنامه‌نویسی جولیا چند سال قبل به دلیل نیاز مبرم به زبانی که بتواند تحلیل‌های آماری (محاسبات عددی) را با بالاترین کارایی انجام دهد و همچنین در زمینه علم محاسبات نیز قدرتمند ظاهر شود ساخته شد. زبان برنامه‌نویسی جولیا پس از زبان برنامه‌نویسی پایتون و زبان برنامه‌نویسی R یکی از ایده‌آل‌ترین زبان‌هایی است که در زمینه محاسبات پیچیده مربوط به یادگیری ماشینی می‌توان از آن استفاده کرد. ترکیب نحوی و عملکرد این زبان به زبان برنامه‌نویسی پایتون شباهت زیادی دارد. از جمله قابلیت‌هایی که زبان برنامه‌نویسی جولیا در اختیار توسعه‌دهندگان قرار می‌دهد به کتابخانه‌های گسترده ریاضی، اجرای موازی توزیع‌شده و دقت عددی بالای آن می‌توان اشاره کرد. این زبان برنامه‌نویسی در مقایسه با زبان‌های برنامه‌نویسی R و پایتون در زمینه محاسبات موازی گزینه ایده‌آلی است [۴۸]، [۵۴].

۵-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی C++

این زبان نیز یکی از ابزارهای مناسب برای استفاده در حوزه یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی در زمینه‌هایی مانند ساخت بازی و ربات است. توسعه‌دهندگان سخت‌افزار سیستم‌های تعبیه‌شده^۱ و مهندسان الکترونیک هم به دلیل کارایی زبان‌هایی مانند C و یا C++، بیشتر به استفاده از این زبان‌ها در یادگیری ماشینی علاقمندند چرا که این دو زبان به زبان ماشین (صفر و یک) نزدیک‌تر بوده و می‌توانند ارتباط بهتری با سخت‌افزار ایجاد کنند. برخی از کتابخانه‌های مورد استفاده در هوش مصنوعی مناسب برای زبان C++ عبارتند از mlpack، Dlib، CNTK، و Caffe [۵۵]–[۵۷].

ویژگی‌های کلیدی:

- ✓ سرعت و عملکرد خوب
- ✓ ترکیبی از ابزارهای سطح بالا و سطح پایین
- ✓ مقیاس پذیری
- ✓ بسیاری از کتابخانه‌ها و ابزارها در دسترس هستند

۶-۶-۳- زبان برنامه‌نویسی جاوا

جاوا یکی از محبوب‌ترین زبان‌های موجود است. جامعه بزرگی دارد اما شهرت آن تنها دلیل انطباق رایج آن در AI نیست. استفاده از آن آسان بوده و در عین سادگی اجازه توسعه در مقیاس بزرگ را می‌دهد. اشکال‌زدایی آن نیز آسان است و این امر مهمی است زیرا زمان لازم برای پیدا کردن اشکالات را بسیار کاهش می‌دهد. زبان برنامه‌نویسی جاوا دارای انباری از کیت‌ها است که گرافیک و رابط‌ها را بسیار جذاب می‌سازد. زبان برنامه‌نویسی جاوا یک بخش عالی با ماشین مجازی خود ارائه می‌دهد که اجازه می‌دهد کد آن به طور یکپارچه بر روی چندین سکو اجرا شود. زبان برنامه‌نویسی جاوا دارای کتابخانه‌ها و چارچوب‌های بسیاری برای برنامه‌های یادگیری ماشین است. به عنوان مثال چارچوب‌های Mahout، Tensoflow و... در زبان برنامه‌نویسی جاوا قابل اجرا است [۵۸]–[۶۱].

ویژگی‌های کلیدی:

- ✓ اشکال‌زدایی آسان

¹ Embeded system

- ✓ یادگیری ساده
- ✓ مستقل از پلتفرم
- ✓ کتابخانه غنی
- ✓ مقیاس‌پذیری

۳-۷- چارچوب‌ها و کتابخانه‌های پیشرفته برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین

چارچوب^۱ در واقع اسکلت استاندارد برای ساخت و توسعه نرم‌افزارهاست که اسکلت کلی یک نرم‌افزار را فراهم می‌کند و سپس کاربر می‌توانی جاهای خالی آن را با کدهای مدنظر خود پر کند. با استفاده از یک چارچوب، برای نوشتن برنامه‌های مشابه، صرفه‌جویی زیادی در زمان می‌شود و کدها منظم‌تر نوشته می‌شوند. برای مثال، چارچوب Java Swing ساختار کلی کد نویسی برای رابط کاربری گرافیکی جاوا را در اختیار برنامه‌نویس قرار می‌دهد.

سکو^۲، سخت‌افزار یا نرم‌افزاری است که قرار است برنامه نوشته شده توسط کاربر در آن اجرا شود. برای مثال، برنامه ممکن است برای ویندوز، اندروید، iOS، ایکس‌باکس، PS4 یا ... ساخته شده باشد. این محیط‌ها، همگی، سکو محسوب می‌شوند. هر سکو، شرایط خاص خود را دارد و ملزومات ویژه‌ای را می‌طلبد. سکوها، حتی از نظر ظاهری نیز با همدیگر متفاوتند؛ به همین دلیل، هنگام ساخت یک برنامه، باید دقت شود که سکوی اجرای آن برنامه ویژگی‌هایی باید داشته باشد.

کتابخانه، مجموعه‌ای از کدهای مختلف است که توابع پرستفاده را در اختیار کاربر قرار می‌دهد تا در وقت او صرفه‌جویی شود. برای مثال، یک کتابخانه ریاضی، توابع مهم ریاضی مانند تابع نمایی، لگاریتمی، مثلثاتی و ... را در برمی‌گیرد. زبان‌های برنامه‌نویسی، معمولاً کتابخانه‌های متعددی برای انجام امور مختلف دارند.

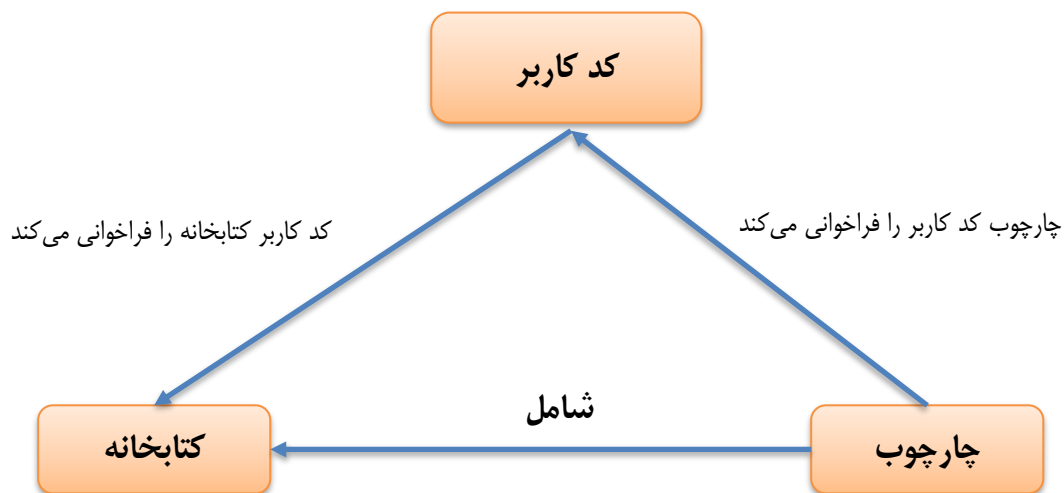
API، سرواژه عبارت Application Programming Interface (رابط برنامه‌نویسی نرم‌افزار) است. API آن قسمتی از یک کتابخانه است که برنامه‌نویس به آن دسترسی دارد. API، در واقع نماینده کتابخانه و شامل اطلاعاتی است که کارکرد کتابخانه را توضیح می‌دهد.

رابطه چارچوب، کتابخانه و API بدین گونه است که کتابخانه، مجموعه‌ای از توابع به هم مرتبط است و چارچوب اسکلت کلی برنامه را فراهم می‌کند. API، در واقع متصل‌کننده چارچوب و کتابخانه به یکدیگر است. توسعه یک نرم‌افزار، معمولاً با استفاده از یک چارچوب آغاز می‌شود و با به‌کارگیری کتابخانه‌ها از طریق API پیش می‌رود. تفاوت اصلی کتابخانه با چارچوب نحوه کنترل کدهاست. در کتابخانه کدهای موجود در آن فراخوانی شده و از آن‌ها استفاده می‌شود؛ اما چارچوب به اصطلاح Inversion of Control (کنترل‌پذیر معکوس) است. به این معنی که برخلاف کتابخانه، کاربر، چارچوب را فراخوانی نمی‌کند، بلکه چارچوب، کدهای اضافه شده توسط کاربر را فراخوانی می‌کند. شکل ۳-۴ این رابطه را نشان می‌دهد.

در ادامه، چارچوب‌ها، سکوها و کتابخانه‌های معروف در حوزه یادگیری ماشینی معرفی می‌شود.

¹ Framework

² Platform



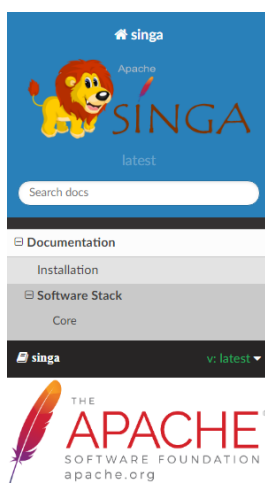
شکل ۴-۳: رابطه بین کتابخانه و چارچوب

۱-۷-۳- Apache Singa چارچوب

چارچوب‌های مربوط به یادگیری عمیق، عملکردهای مربوط به یادگیری ماشین مانند پردازش زبان طبیعی و تشخیص عکس را قدرت می‌بخشند. Singa که به تازگی وارد پروژه‌های آپاچی شده است، یک چارچوب متن‌باز با هدف آسان‌تر نمودن آموزش مدل‌های یادگیری عمیق بر روی حجم زیادی از داده‌ها است. Singa یک مدل برنامه‌نویسی آسان برای آموزش شبکه‌های یادگیری عمیق از طریق یک مجموعه از ماشین‌ها را فراهم می‌کند و از روش‌های مشترک بسیاری مانند شبکه‌های عصبی پیچشی، ماشین‌های بالترمن محدود و شبکه‌های عصبی بازگشتی پشتیبانی می‌کند. مدل‌ها می‌توانند به صورت همزمان و یا ناهمزمان آموزش داده شوند که بستگی به نوع کار دارد. همچنین Singa نیز با استفاده از Apache Zookeeper، تنظیمات خوشه‌بندی را آسان می‌کند [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

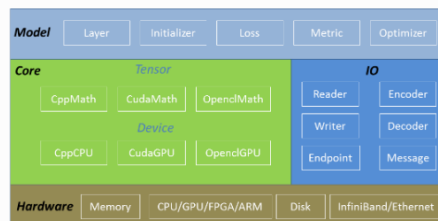
<https://singa.apache.org>



Docs » Documentation » Software Stack

Software Stack

SINGA's software stack includes three major components, namely, core, IO and model. Figure 1 illustrates these components together with the hardware. The core component provides memory management and tensor operations; IO has classes for reading (and writing) data from (to) disk and network; The model component provides data structures and algorithms for machine learning models, e.g., layers for neural network models, optimizers/initializer/metric/loss for general machine learning models.



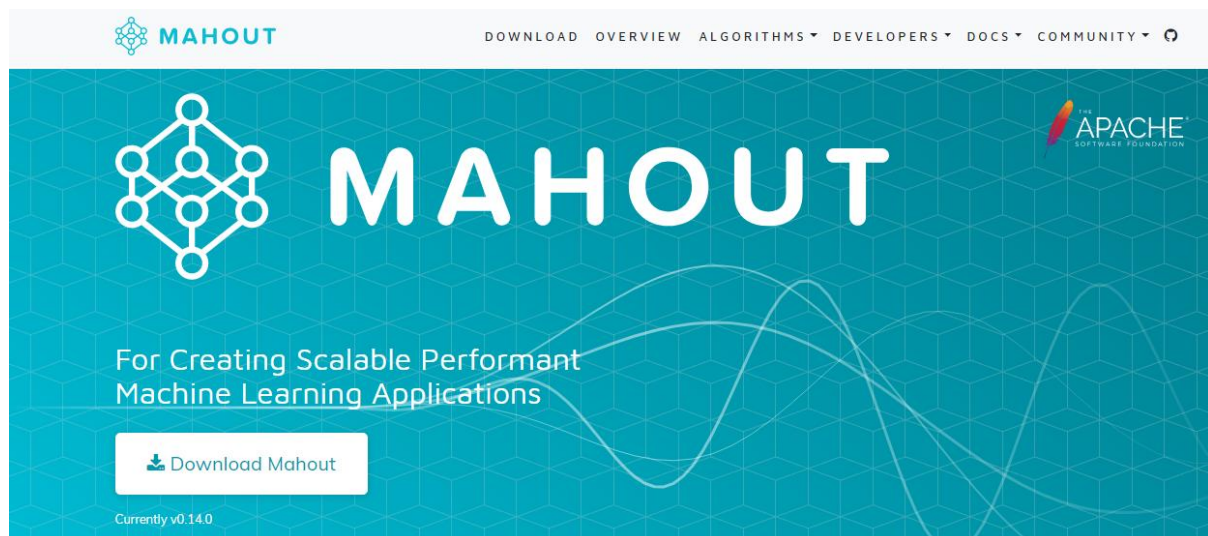
۲-۷-۳- Apache Mahout چارچوب

Mahout یک چارچوب طراحی شده برای ساخت برنامه‌های مقیاس‌پذیر و کاربردی یادگیری ماشین می‌باشد. چهار تا از قابلیت‌های برجسته این چارچوب در زیر لیست شده‌اند:

- محل کار برنامه‌نویسی ساده‌ای فراهم می‌کند و همچنین قابل توسعه است.
- ارائه انواع الگوریتم‌های پیش‌ساخته برای Scala + Apache Spark، H2O و همچنین Apache Flink.
- شامل یک محیط جدید ریاضیات به نام Samsara برای کارکردن با سینتکس R-like. این محیط این امکان را فراهم می‌آورد تا الگوریتم‌ها در یک خوشه Spark توزیع شده اجرا شوند.
- می‌تواند بر روی CPU یا GPU پردازش شود.
- چارچوب Mahout مدت‌هاست که در مجموعه Hadoop قرار گرفته است، اما بسیاری از الگوریتم‌های تحت پوشش آن نیز می‌توانند خارج از Hadoop اجرا شوند. این‌ها برای برنامه‌های مستقل مفید است که در نهایت می‌توانند به Hadoop یا برای پروژه‌های Hadoop منتقل شوند [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://mahout.apache.org>



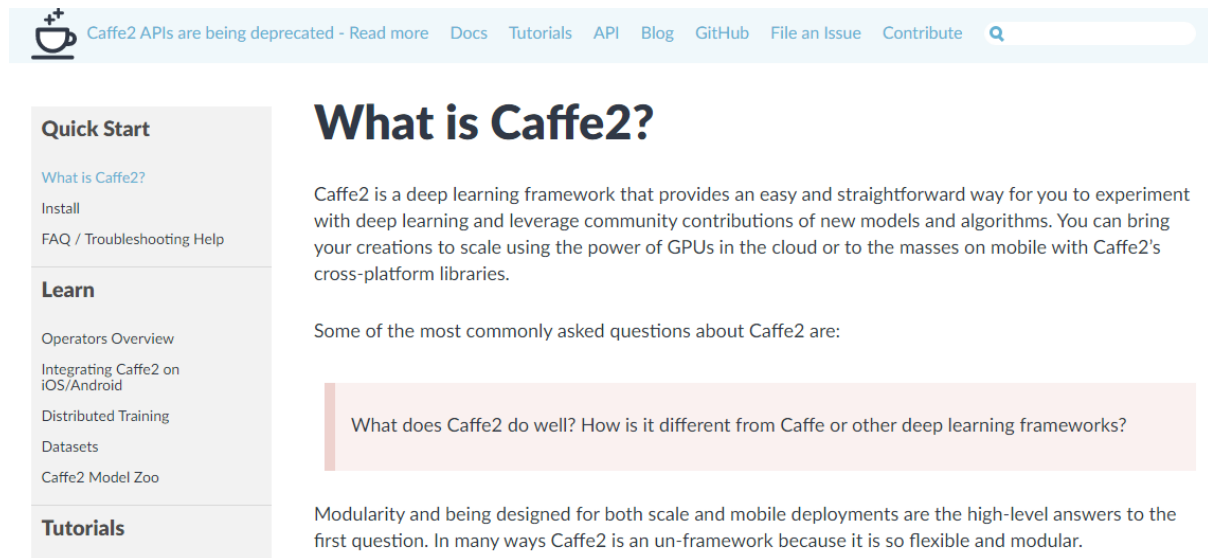
۳-۷-۳- caffe چارچوب

چارچوب یادگیری عمیق caffe، به صورت ماژولار ساخته شده است. این چارچوب در سال ۲۰۱۳ برای پروژه‌های بینایی ماشین ایجاد شده، و تا بحال برای کاربردهای دیگر مانند چنדרسانه ای نیز توسعه داده شده است. در این کاربردها، سرعت، عامل بسیار مهمی است بنابراین به صورت کامل با زبان برنامه‌نویسی ++C پیاده‌سازی شده و به طور کامل از زبان CUDA پشتیبانی می‌کند و در زمان‌های لازم نیز می‌تواند بین پردازش‌های CPU و GPU سوئیچ کند. این چارچوب در حال حاضر به عنوان

بخشی از چارچوب Paytorch تبدیل شده است؛ هرچند طبق اطلاعات موجود در وبسایت چارچوب caffe، هنوز API های آن به درستی کار می‌کنند [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://caffe2.ai>



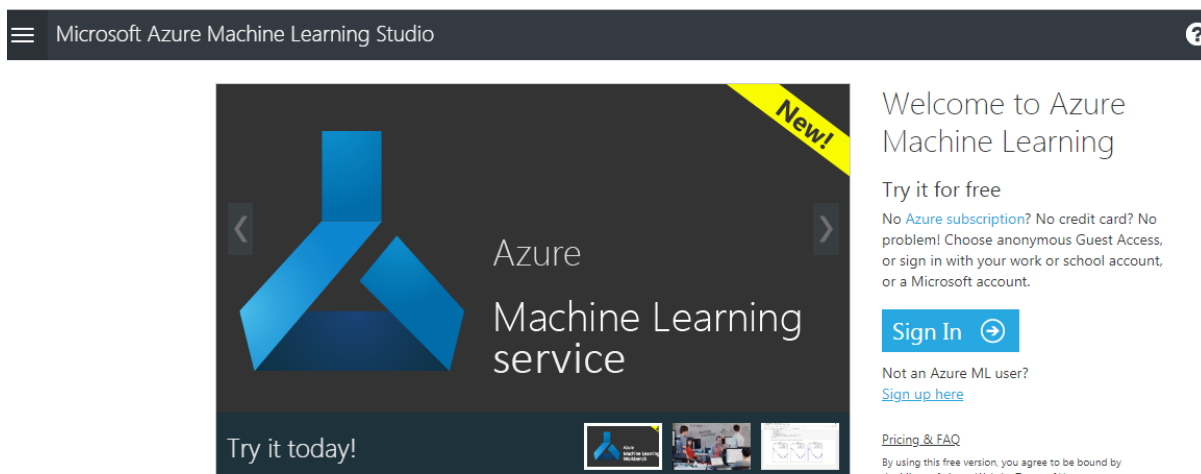
The screenshot shows the Caffe2 website. At the top, there is a navigation bar with links: Docs, Tutorials, API, Blog, GitHub, File an Issue, and Contribute. Below the navigation bar, the main heading is "What is Caffe2?". The text below the heading states: "Caffe2 is a deep learning framework that provides an easy and straightforward way for you to experiment with deep learning and leverage community contributions of new models and algorithms. You can bring your creations to scale using the power of GPUs in the cloud or to the masses on mobile with Caffe2's cross-platform libraries." Below this, it says "Some of the most commonly asked questions about Caffe2 are:" followed by a question: "What does Caffe2 do well? How is it different from Caffe or other deep learning frameworks?". At the bottom, it mentions "Modularity and being designed for both scale and mobile deployments are the high-level answers to the first question. In many ways Caffe2 is an un-framework because it is so flexible and modular."

۴-۷-۳- چارچوب مایکروسافت Microsoft Azure ML Studio

به منظور کار بر روی حجم وسیعی از داده‌ها و توان محاسباتی با استفاده از یادگیری ماشین، محیط ابری، محیطی ایده‌آل برای اپلیکیشن‌های یادگیری ماشین است. مایکروسافت سرویس یادگیری ماشین Azure نیز ایجاد کرده است که ML Azure Studio نام دارد و دارای نسخه‌های ماهانه، ساعتی و آزاد است. ML Studio Azure به کاربران اجازه می‌دهد تا مدل‌هایی را ایجاد و آموزش دهند و سپس آن‌ها را در API قرار دهند تا توسط سرویس‌های دیگر استفاده شود. کاربران برای مدل کردن داده، ۱۰ گیگابایت فضا در اختیار دارند و برای استفاده از فضای ذخیره‌سازی بیشتر، می‌توان به Azure وصل شد و از فضای ذخیره‌سازی آن برای مدل‌های بزرگ‌تر استفاده کرد. برای آزمایش این سرویس می‌توان بدون داشتن حساب کاربری، تا هشت ساعت از آن بهره برد [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://studio.azureml.net/>



۵-۷-۳- ابزار Distributed Machine Learning Toolkit (DMTK)

بسیاری از کامپیوترهایی که در حال حاضر از استفاده می‌شود، در اجرای برنامه‌های یادگیری ماشین به مشکل برخورد می‌کنند و باید از تعدادی از آن‌ها به صورت گروهی استفاده کرد تا بتوانند اپلیکیشن‌های یادگیری ماشین را به خوبی اجرا کنند. این ابزار می‌تواند بر روی تعدادی از کامپیوترهای خوشه‌بندی‌شده به صورت توزیع‌شده نصب گردد و برنامه‌ها را اجرا کند. این ابزار دارای اجزای زیر است [۶۲]–[۶۵]:

- چارچوب DMTK: یک چارچوب انعطاف‌پذیر است که از رابط یکپارچه برای موازی‌سازی داده‌ها، ساختار داده ترکیبی برای ذخیره‌سازی مدل‌های بزرگ، برنامه‌ریزی مدل برای آموزش مدل‌های بزرگ برای بازده آموزش بالا پشتیبانی می‌کند.
- LightLDA: یک الگوریتم بسیار سریع و مقیاس‌پذیر است.
- Distributed (Multisense) Word Embedding: یک الگوریتم توزیع‌شده برای تعبیه‌سازی کلمات^۱ است.
- LightGBM: یک چارچوب درختی با تکنیک گرادینت تقویتی^۲ در یادگیری ماشین است که از تکنیک‌های^۳ GBDT،^۴ GBRT،^۵ GBM و^۶ MART پشتیبانی می‌کند.

این ابزار به عنوان یک چارچوب ساخته‌شده، تعداد الگوریتم‌های واقعی که در اختیار دارد بسیار کم است، ولی طراحی آن به گونه‌ای است که می‌توان آن را در آینده گسترش داد. این چارچوب برای کاربرانی مناسب است که از مجموعه‌ای از کامپیوترها به عنوان خوشه استفاده می‌کنند که منابع محدودی دارند. محققان و متخصصان یادگیری ماشین نیز می‌توانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین توزیع‌شده خود را در این چارچوب با تغییراتی کوچکی در الگوریتم‌های موجود در دستگاه‌های خود ایجاد کنند. آدرس اینترنتی دسترسی:

<http://www.dmtk.io>

¹ Word embedding

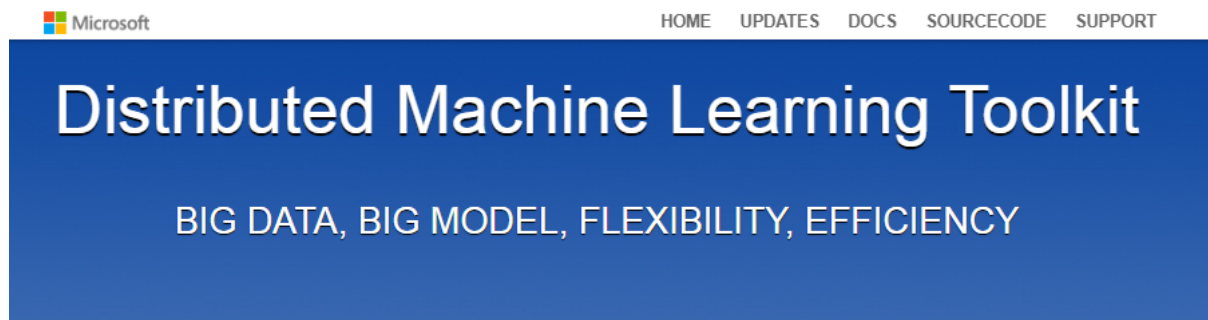
² Gradient boosting

³ Gradient boosted decision trees

⁴ Gradient boosted regression trees

⁵ Gradient boosting machine

⁶ multiple additive regression tree



Distributed Machine Learning Toolkit

Distributed machine learning has become more important than ever in this big data era. Especially in recent years, practices have demonstrated the trend that more training data and bigger models tend to generate better accuracies in various applications. However, it remains a challenge for common machine learning researchers and practitioners to learn big models from huge amount of data, because the task usually requires a large number of computation resources. In order to tackle this challenge, we release the Microsoft Distributed Machine Learning Toolkit (DMTK), which contains both algorithmic and system innovations. These innovations make machine learning tasks on big data highly scalable, efficient, and flexible. We will continue to add new algorithms to DMTK in a regular basis.

The current version of DMTK includes the following components (more components will be added to the future versions):

- DMTK Framework: a flexible framework that supports unified interface for data parallelization, hybrid data structure for big model storage, model scheduling for big model training, and automatic pipelining for high training efficiency.

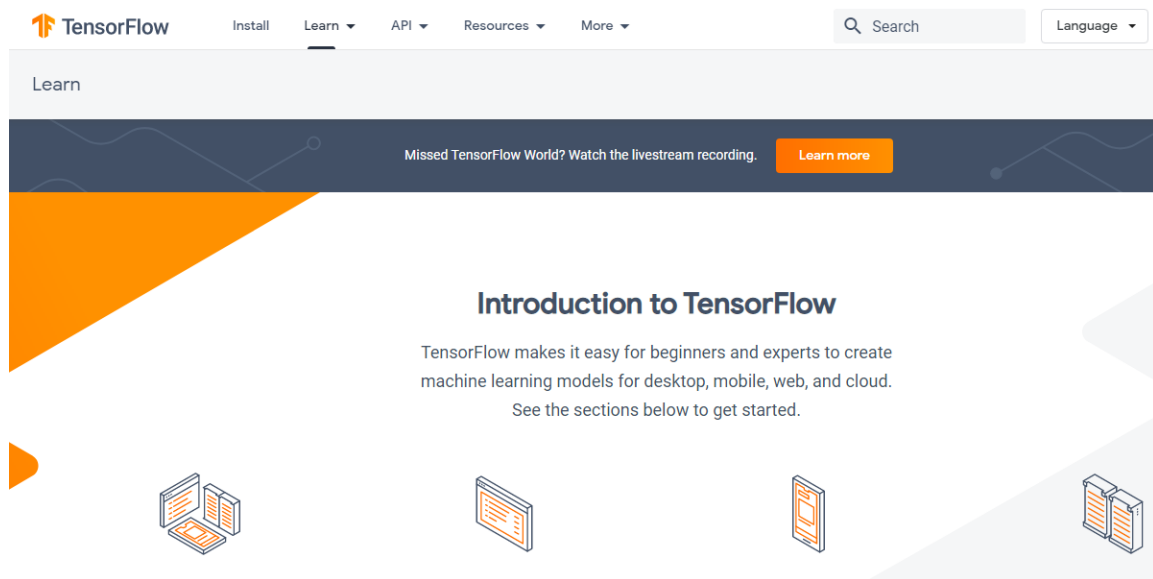


۶-۷-۳- کتابخانه Google TensorFlow

این کتابخانه مانند DMTK، ابزاری برای یادگیری ماشین است که برای سیستم‌های توزیع‌شده طراحی شده است. این چارچوب در ابتدا تنها برای حل مشکلات داخلی گوگل ایجاد شد ولی بعدها گوگل تصمیم گرفت که آن را به عنوان یک محصول متن‌باز منتشر کند. چارچوب TensorFlow، گراف‌های کنترل جریان را پیاده‌سازی می‌کند که دسته‌ای از داده‌ها می‌توانند توسط مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها که توسط یک گراف شرح داده می‌شوند پردازش شوند. این گراف‌ها می‌توانند با زبان‌های C++ یا پایتون بر روی CPU یا GPU پردازش شوند. محبوب‌ترین کتابخانه یادگیری ماشین دنیا در حال حاضر کتابخانه TensorFlow گوگل است. TensorFlow به صورت متن‌باز و پایانه به پایانه (end-to-end) است. TensorFlow از یک سیستم چند لایه استفاده می‌کند. این سیستم کاربر را قادر می‌سازد به سرعت شبکه‌های عصبی را با حجم زیادی از داده نصب کرده و آموزش دهد. گوگل با استفاده از آن، سوالات موجود در تصاویر را تشخیص می‌دهد. همچنین از آن در نرم‌افزارهای تطبیق صوت استفاده می‌کند. این چارچوب با زبان‌های برنامه‌نویسی پایتون، C++ و CUDA تهیه شده است و در Linux, macOS, Windows, Android, Java قابل اجرا است [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://www.tensorflow.org>



۷-۳-۷- چارچوب Microsoft Cognitive Network Toolkit

علاوه بر انتشار ابزار DMTK، مایکروسافت یک چارچوب یادگیری ماشین با نام Microsoft Cognitive Network Toolkit یا CNTK دارد. CNTK شبیه به TensorFlow است با این تفاوت که به کاربران اجازه می‌دهد تا شبکه‌های عصبی را با استفاده از گراف‌های مستقیم ایجاد کنند. این چارچوب نیز با چارچوب‌هایی مانند Caffe، Theano و Torch نیز قابل مقایسه است. مزیت اصلی CNTK، نسبت به دیگر چارچوب‌ها سرعت بالای آن و به ویژه توانایی آن در بهره‌برداری از چندین CPU و چندین GPU به صورت همزمان است. مایکروسافت ادعا کرده است که با استفاده از CNTK همراه خوشه‌های GPU بر روی Azure، سرعت تشخیص صدا در کاربرد یادگیری ماشین افزایش داده است. CNTK که اساساً به عنوان بخشی از پروژه تحقیقاتی مایکروسافت در تشخیص صدا ایجاد شده، در سال ۲۰۱۵ به عنوان یک پروژه متن‌باز، ارائه گردیده است. این چارچوب در حال حاضر به‌روزرسانی شده و نام آن به Microsoft Cognitive Toolkit تغییر یافته است [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://microsoft.com>

Microsoft Azure

Contact Sales: 1-800-867-1389
Search
Portal

Overview
Solutions
Products
Documentation
Pricing
Training
Marketplace
Partners
Support
Blog
More

Free account

Docs / Cognitive Toolkit
Bookmark
Edit
Share
Theme
Sign in

Filter by title

Overview
What's new
Getting Started
Tutorials & Examples
Train/Develop
Evaluate/Deploy
API Reference
How To
CNTK Source Code & Development
Resources
FAQ
Feedback

The Microsoft Cognitive Toolkit

01/22/2017 • 2 minutes to read • +10

The Microsoft Cognitive Toolkit (CNTK) is an open-source toolkit for commercial-grade distributed deep learning. It describes neural networks as a series of computational steps via a directed graph. CNTK allows the user to easily realize and combine popular model types such as feed-forward DNNs, convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs/LSTMs). CNTK implements stochastic gradient descent (SGD, error backpropagation) learning with automatic differentiation and parallelization across multiple GPUs and servers.

[This video](#) provides a high-level overview of the toolkit. In addition, Microsoft offers an introductory course to deep learning with CNTK, [Deep Learning Explained](#).

The latest release of CNTK is [2.7](#).

CNTK can be included as a library in your Python, C#, or C++ programs, or used as a standalone machine-learning tool through its own model description language (BrainScript). In addition you can use the CNTK model evaluation functionality from your Java programs.

Is this page helpful?
Yes
No

۸-۷-۳- سکوی توزیع شده Veles

Veles یک سکوی توزیع شده برای برنامه‌های یادگیری عمیق است و مانند چارچوب‌های TensorFlow و DMTK، به زبان C++ و پایتون نوشته شده است. Veles از پایتون به عنوان ابزار و کدی جهت همساز کردن دیگر قسمت‌های برنامه استفاده می‌کند. Veles ابزارهای برنامه‌نویسی را در قالب API در اختیار توسعه‌دهندگان قرار می‌دهد. مجموعه داده‌ها می‌توانند به صورت خودکار قبل از اینکه در خوشه قرار گیرند تحلیل شوند و یک‌سازی گردند. واسط REST نیز وجود دارد که به آموزش مدل برای استفاده می‌پردازد. IPython، ابزار نمایش داده و تحلیل می‌تواند نتایج یک خوشه Veles را به تصویر درآورد. این ابزار بخشی از سکوی یادگیری توزیع یافته شرکت سامسونگ است. سامسونگ امیدوار است که متن باز کردن آن باعث تحریک توسعه آن در درگاه‌های Windows و MacOS شود [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://velesnet.ml>

Veles is usable from IPython or IPython Notebook.

```

In [1]: import veles

In [2]: launcher=veles("veles/znicz/samples/MnistSimple/mnist.py", stealth=True, backend="ocl", matplotlib_backend="WebAgg")

```

Version 0.8.9 Tue, 12 May 2015 11:51:57 +0300
Copyright © 2013 Samsung Electronics Co., Ltd.
Released under Apache 2.0 license.
<https://velesnet.ml>
<https://github.com/samsung/veles/issues>

INFO:Main:Loading workflow ".../znicz/samples/MnistSimple/mnist.py"...

INFO:Main:Applying the configuration from ".../znicz/samples/MnistSimple/mnist_config.py..."

INFO:Launcher:My Python is CPython 3.4.1

INFO:Launcher:My PID is 32514

INFO:Launcher:My time is 2015-05-14 09:52:16.789127

INFO:Launcher:My ID is 7bc792aa-e93e-4819-88f9-53c64a970ec5

INFO:Launcher:My log ID is 7bc792aa-e93e-4819-88f9-53c64a970ec5

INFO:Main:Created <MnistSimple.mnist.MnistWorkflow object at 0x7f8fc4f18f60> with 21 units

INFO:GraphicsServer:Publishing to inproc://veles-plots; ipc:///tmp/veles-ipc-plots-ws257i8s; epgm://eth2;239.192.1.1:160880; epgm://vmnet1;23

INFO:OpenCLDevice:Selected the following OpenCL configuration:

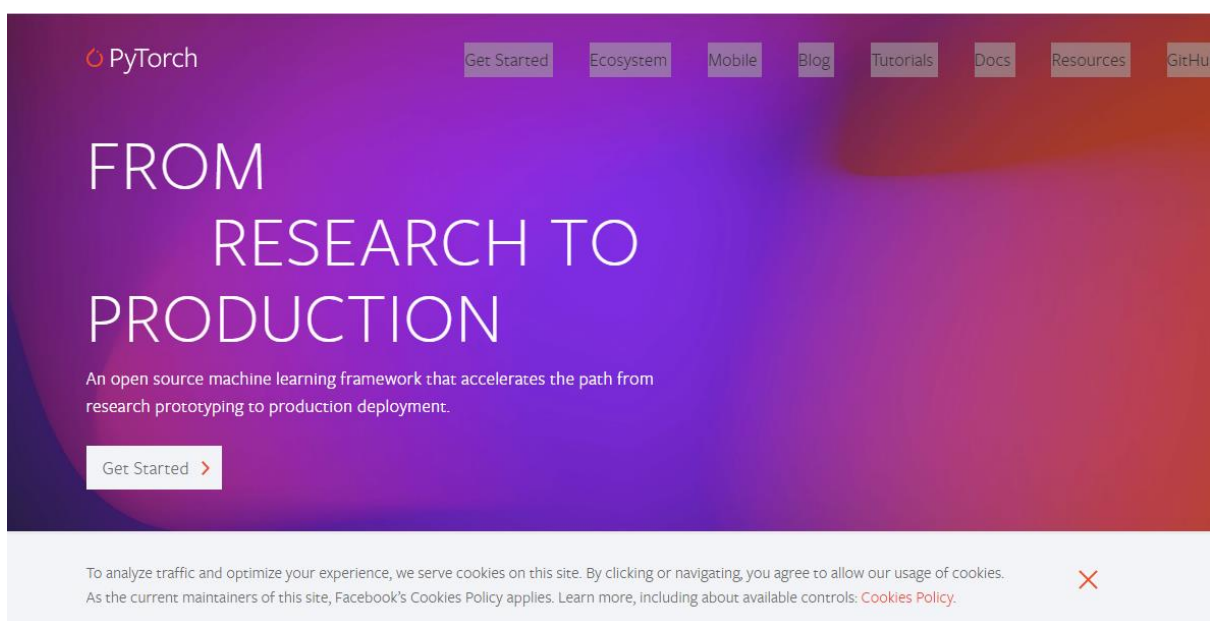
device	dtype	rating	BLOCK_SIZE	version
NVIDIA Corporation/GeForce GTX TITAN/4318	double	1.000	27	1.1
NVIDIA Corporation/GeForce GTX TITAN/4318	float	1.000	30	1.1

۹-۷-۳- Pytorch چارچوب

چارچوب PyTorch متن‌باز و برای یادگیری عمیق می‌باشد که یک جایگزین محبوب برای TensorFlow و Apache MXNet است. PyTorch APIs یک چارچوب مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی پایتون است که همراه با اجرای گرافیک پویا برای کار با توسعه‌دهندگان پایتون و دانشمندان داده بسیار کارآمد است. شرکت فیسبوک با متن‌باز کردن این چارچوب، سعی بر ساده‌تر کردن توسعه هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی برای علاقه‌مندان دارد. این چارچوب از سال ۲۰۱۷، توجه بسیار زیادی را به سوی خود جلب کرده‌است و با نرخ رشد بسیار سریعی در حال توسعه است [۶۶].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://pytorch.org>



۱۰-۷-۳- Apache MxNet چارچوب

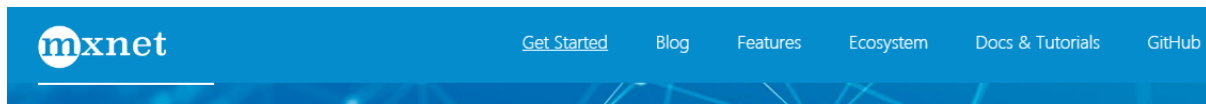
این چارچوب، برای ساخت شبکه‌های عصبی مقیاس‌پذیر (scalable) استفاده می‌شود و برای زبان‌های برنامه‌نویسی متعددی از جمله پایتون، R، اسکالا^۱، جاوا، کلوژور^۲، جولیا^۳، پرل^۴ و سی پی پی^۵، توسعه داده شده‌است. این چارچوب بر روی سکوهاى مختلف مانند ویندوز، لینوکس، فضای ابری و Mac OS قابل اجرا است [۶۶].

- قابلیت مقیاس‌پذیری (به راحتی می‌توان از این کتابخانه برای آموزش‌های چند ماشینی یا با چند GPU استفاده کرد).
- دارای قابلیت‌های متعددی مانند نوشتن لایه‌های سفارشی در زبان‌های سطح بالا

¹ Scala
² Clojure
³ Julia
⁴ Perl
⁵ CPP

➤ متن باز است.

آدرس اینترنتی دسترسی:
<https://mxnet.apache.org>



Installing MXNet

Indicate your preferred configuration. Then, follow the customized commands to install MXNet.

MXNet Version	v1.5.1							
OS / Platform	Linux	MacOS	Windows	Cloud	Devices			
Language	Python	Scala	Java	Clojure	R	Julia	Perl	Cpp
GPU / CPU	GPU				CPU			

۱۱-۷-۳- کتابخانه Apache Spark MLlib

Apache Spark در خانواده هادوپ^۱ بسیار شناخته شده است ولی چارچوب پردازش داده، خارج از هادوپ ایجاد شد و نامی جدا از نام هادوپ به خود اختصاص داد. Apache Spark یک چارچوب یادگیری ماشین است و بخاطر رشد کتابخانه مربوط به الگوریتم‌ها، سرعت بالایی در پردازش داده‌های موجود در حافظه اصلی دارد. Apache Spark، از نوع داده‌های بردارهای محلی و ماتریس‌های محلی^۲ که بر روی یک ماشین ذخیره شده باشد و همچنین از ماتریس‌های توزیع‌شده توسط یک یا چند RDD پشتیبانی می‌کند. MLlib کتابخانه مقیاس‌پذیر یادگیری ماشین اسپارک، که توسعه‌ای از API هسته اسپارک است، کتابخانه‌ای ارائه می‌دهد که به سادگی برای الگوریتم‌های یادگیری ماشین قابل استفاده است. این مجموعه تمامی الگوریتم‌های رایج یادگیری ماشین برای تحلیل رگرسیون، دسته‌بندی، خوشه‌بندی، سیستم‌های توصیه‌گر، تحلیل متن، کاوش الگوهای تکرارشونده را پوشش می‌دهد و مشخصاً تمامی گام‌های مورد نیاز برای ساخت یک نرم‌افزار یادگیری ماشین مقیاس‌پذیر را در خود دارد و همچنین از قابلیت‌های مثل ارزیابی مدل و ورود داده‌ها پشتیبانی می‌کند. MLlib همچنین ساختارهای سطح پایین یادگیری ماشین مثل الگوریتم بهینه‌سازی گرادیان نزولی را فراهم می‌آورد. تمام این روش‌ها با منظور اجرا کردن این برنامه‌ها در سطح خوشه اسپارک طراحی شده‌اند. به طور کلی قابلیت‌های کتابخانه MLlib در Spark بسیار زیاد است. برای مثال، الگوریتم‌های پیاده‌سازی‌شده مقیاس‌پذیری بالایی دارند و از توانایی Spark برای مواجهه با حجم عظیمی از داده بهره گرفته می‌شود. این الگوریتم‌ها با به کارگیری از API های Dataset، DataFrame، و RDD مبتنی بر گراف جهت‌دار غیرمدور^۳ برای پردازش‌های موازی و مبتنی

^۱ Hadoop: یک مجموعه‌ای از نرم‌افزارهای متن‌باز است که استفاده از شبکه بسیاری از رایانه‌ها را برای حل مشکلات مربوط به حجم

عظیم داده و محاسبات تسهیل می‌کند

^۲ local vectors and matrix

^۳ Directed Acyclic Graph

بر حافظه اصلی طراحی شده‌اند که می‌تواند تا ۱۰۰ برابر نسبت به پردازش نگاشت-کاهش^۱ سریع‌تر باشد (همچنین از عملکرد مبتنی بر دیسک نیز پشتیبانی می‌کند که در این شرایط نیز می‌تواند تا ۱۰ برابر از پردازش‌های معمول نگاشت-کاهش سریع‌تر باشد). MLlib در زبان‌های برنامه‌نویسی Python، Java، Scala و R قابل استفاده است و می‌تواند توسط کتابخانه‌های زبان برنامه‌نویسی R و NumPy استفاده شود [۶۷].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://spark.apache.org/mllib/>

The screenshot shows the Apache Spark MLlib website. The header includes the Apache Spark logo and 'MLlib' text. A navigation bar at the top contains links for Download, Libraries, Documentation, Examples, Community, and Developers. A dropdown menu under 'Libraries' lists various components: SQL and DataFrames, Spark Streaming, MLlib (machine learning), GraphX (graph), and Third-Party Projects. The main content area features the heading 'Spark's scalable machine learning library.' and a code snippet for using MLlib in Python. Below the code, a bar chart titled 'Logistic regression in Hadoop and Spark' compares the running time of Hadoop (110s) and Spark (0.9s). The right sidebar contains 'Latest News' with recent releases and a 'Download Spark' button.

۱۲-۷-۳- کتابخانه Open Neural Networks Library (OpenNN)

OpenNN یک کتابخانه متن‌باز می‌باشد که با C++ و پایتون برای یادگیری عمیق نوشته شده است و برای ایجاد شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. هر چند برای برنامه‌نویسان حرفه‌ای C++ و پایتون و کسانی که مهارت‌های بالایی در یادگیری ماشین دارند ساخته شده است. اما این کتابخانه یک معماری عمیق با کارایی بالا است. این کتابخانه دارای کدهای آماده برای حل مسائل واقعی در حوزه انرژی، بازاریابی، سلامت و ... است و از الگوریتم‌هایی یادگیری ماشین برای حل مسائلی مانند رگرسیون، طبقه‌بندی اطلاعات و پیش‌بینی و ... استفاده می‌کند [۶۸].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<http://www.opennn.net>

¹ MapReduce



Build the most powerful models with C++ and Python

OpenNN is a free neural networks library for advanced analytics.
It solves many real-world applications in energy, marketing, health and more.

Learning Tasks

OpenNN contains sophisticated algorithms and utilities to deal with the following machine learning solutions:

Regression	Classification	Forecasting	Association
			
Model outputs as a function of inputs.	Assign patterns to given categories.	Make predictions about the future.	Discover relations between variables.

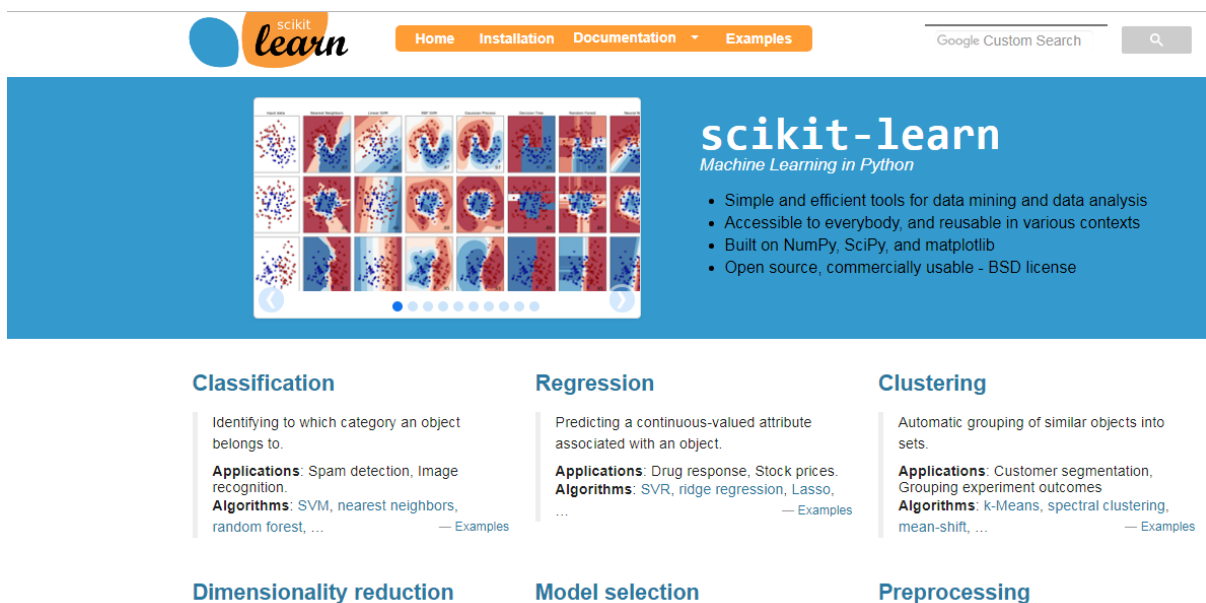
www.opennn.net

۱۳-۷-۳- کتابخانه Scikit Learn

این ابزار، یکی از معروف‌ترین کتابخانه‌های یادگیری ماشین و به صورت متن‌باز است. کتابخانه Scikit Learn، در روش‌های یادگیری ماشینی بدون ناظر کاربرد فراوانی دارد.

کتابخانه Scikit Learn، دو کتابخانه اصلی و مهم پایتون یعنی NumPy و SciPy را توسعه داده است. این کتابخانه، الگوریتم‌های محاسباتی مختلفی برای کاربردهای متفاوت هوش مصنوعی و به خصوص داده‌کاوی دارد. برخی از آن‌ها عبارتند از بانچینگ (bunching)، برگشت (relapse) و ترتیب (order). به وسیله این کتابخانه، تکنیک‌هایی شبیه اطلاعات پویا (changing information)، تعیین ویژگی‌ها (feature determination) و تکنیک‌های گروهی (ensemble techniques)، به راحتی و تنها با چند خط کد، قابل پیاده‌سازی هستند. فنون یادگیری همچون: Classification، Clustering و رگرسیون به راحتی با استفاده از این کتابخانه در زبان برنامه‌نویسی Python قابل پیاده‌سازی هستند. برای شروع کار در حوزه یادگیری ماشینی، Scikit-learn، تا زمانی که نیاز به انجام محاسبات بسیار پیچیده ندارید، ابزار بی‌نظیر و کاملاً مناسبی است [۶۶].

آدرس اینترنتی دسترسی:
<https://scikit-learn.org>



The image shows the Scikit-learn website. At the top, there is a navigation bar with links: Home, Installation, Documentation, and Examples. A Google Custom Search bar is also present. The main header features the Scikit-learn logo and the text "Machine Learning in Python". Below this, a grid of 12 small plots illustrates various machine learning concepts. To the right of the grid, the text "scikit-learn" is displayed in a large font, followed by "Machine Learning in Python". Below this, a list of features is provided: Simple and efficient tools for data mining and data analysis, Accessible to everybody, and reusable in various contexts, Built on NumPy, SciPy, and matplotlib, and Open source, commercially usable - BSD license.

Classification
Identifying to which category an object belongs to.
Applications: Spam detection, Image recognition.
Algorithms: SVM, nearest neighbors, random forest, ... — Examples

Regression
Predicting a continuous-valued attribute associated with an object.
Applications: Drug response, Stock prices.
Algorithms: SVR, ridge regression, Lasso, ... — Examples

Clustering
Automatic grouping of similar objects into sets.
Applications: Customer segmentation, Grouping experiment outcomes
Algorithms: k-Means, spectral clustering, mean-shift, ... — Examples

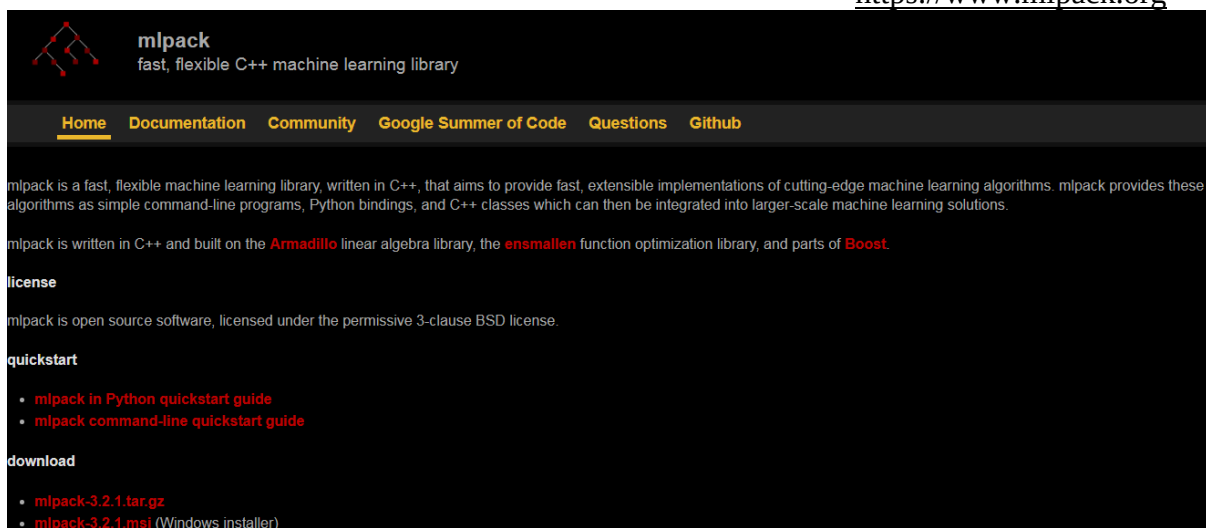
Dimensionality reduction **Model selection** **Preprocessing**

۱۴-۷-۳- کتابخانه mlpack2

این کتابخانه در سال ۲۰۱۱، بر پایه زبان C++ عرضه شد و هدف از طراحی آن، قابلیت مقیاس‌پذیری، سرعت و راحتی استفاده از آن بود. پیاده‌سازی با mlpack می‌تواند از طریق دستورات اجرایی خط فرمان و یا با یک واسطه C++ برای کارهای پیچیده‌تر انجام شود. در نسخه ۲ این کتابخانه، اصلاحات بسیاری انجام شده و ویژگی‌های بسیاری افزوده شده است که شامل انواع الگوریتم‌ها، و تغییراتی برای افزایش سرعت می‌شود. در ابتدا یکی از کمبودهای این کتابخانه، نبود هماهنگی با هیچ زبان دیگری به جز C++ بود، اما امروزه کاربران زبان‌هایی برنامه‌نویسی مانند R و پایتون می‌توانند از این کتابخانه استفاده کنند [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://www.mlpack.org>



The image shows the mlpack website. At the top, there is a navigation bar with links: Home, Documentation, Community, Google Summer of Code, Questions, and Github. The main header features the mlpack logo and the text "fast, flexible C++ machine learning library". Below this, a paragraph describes mlpack as a fast, flexible machine learning library written in C++ that aims to provide fast, extensible implementations of cutting-edge machine learning algorithms. It provides these algorithms as simple command-line programs, Python bindings, and C++ classes which can then be integrated into larger-scale machine learning solutions. Another paragraph mentions that mlpack is written in C++ and built on the Armadillo linear algebra library, the ensmallen function optimization library, and parts of Boost.

license
mlpack is open source software, licensed under the permissive 3-clause BSD license.

quickstart
• [mlpack in Python quickstart guide](#)
• [mlpack command-line quickstart guide](#)

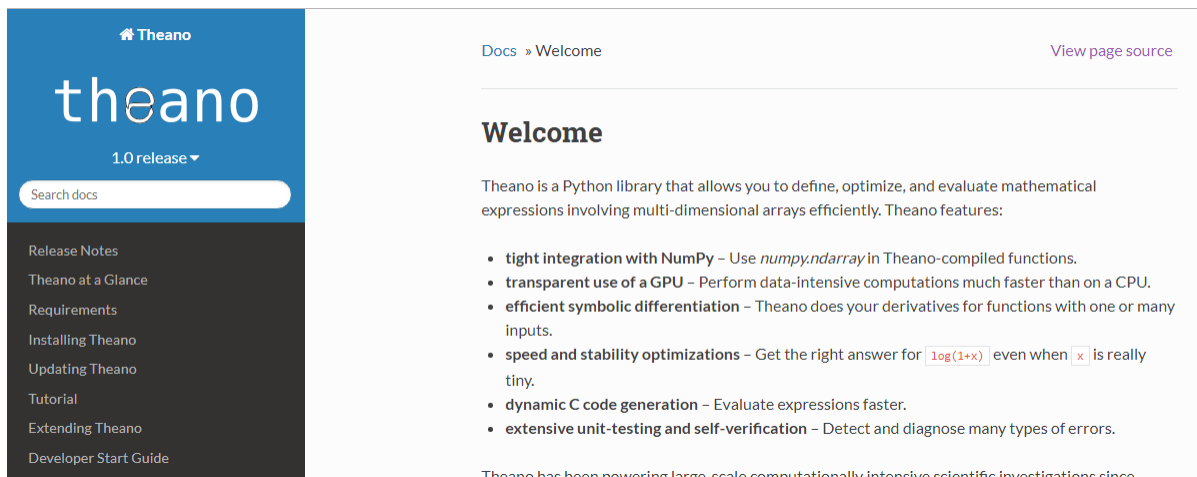
download
• [mlpack-3.2.1.tar.gz](#)
• [mlpack-3.2.1.msi](#) (Windows installer)

۱۵-۷-۳- کتابخانه Theano

Theano یک کتابخانه یادگیری ماشین و علی‌الخصوص تکنیک‌های یادگیری عمیق در زبان برنامه‌نویسی پایتون است. Theano به کاربر اجازه می‌دهد تا عبارات ریاضی را به صورت نمادین تعریف کند و آن‌ها را به روشی کاملاً بهینه شده یا بر روی CPU یا GPU اجرا کند. این کتابخانه به صورت متن‌باز در اختیار کاربران قرار گرفته شده است [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<http://deeplearning.net/software/theano/>

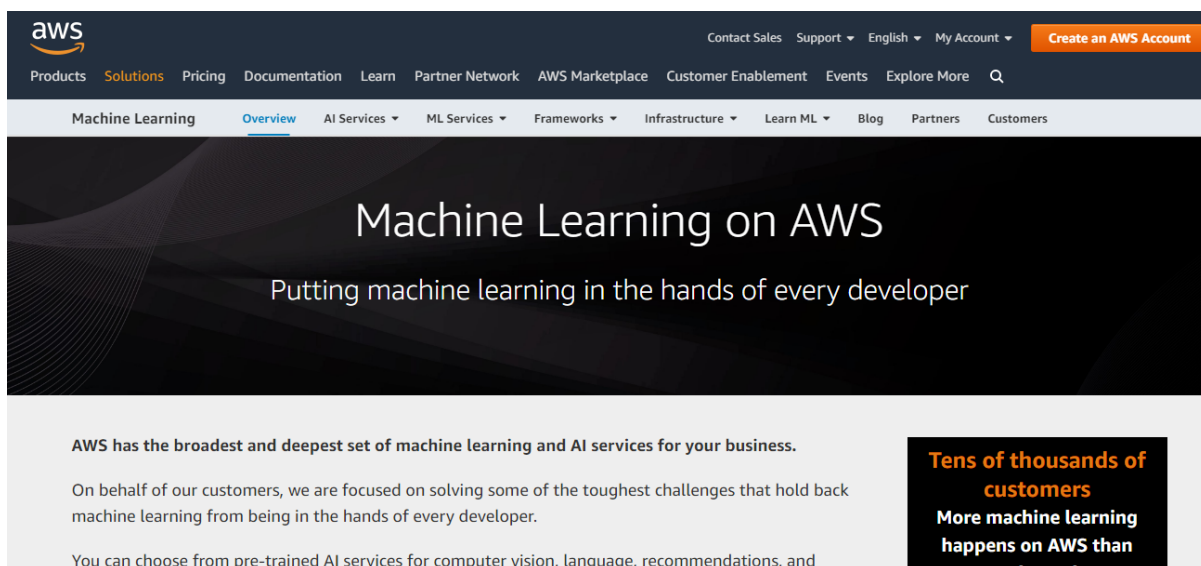


۱۶-۷-۳- سکوی Amazon machine learning

روش همه جانبه آمازون برای سرویس‌های فضای ابری از یک الگوی مشخص پیروی می‌کند. این الگو عبارت است از فراهم کردن ملزومات، جمع کردن عده‌ای از مخاطبان، اجازه به آن‌ها برای استفاده از اپلیکیشن و سپس پیدا کردن نیازهای واقعی مخاطبان و ایجاد آن‌هاست. این الگو نیز برای سرویس یادگیری ماشین آمازون به کار رفته است. سکوی Amazon Machine Learning به داده‌های ذخیره‌شده در آمازون وصل می‌شود و می‌تواند دسته‌بندی‌های دودویی، دسته‌بندی‌های چند کلاسه یا رگرسیون را بر روی داده‌ها اعمال کرده و یک مدل تولید کند. باید توجه داشت که این سرویس کاملاً بر پایه آمازون است. از آنجایی که این سرویس به شدت برپایه آمازون است و مدل به دست آمده از داده‌های آمازون حاصل می‌شود به همین دلیل مدل نتیجه نمی‌تواند استخراج شود و مجموعه داده‌های مورد استفاده برای آموزش مدل نیز نباید بزرگ‌تر از ۱۰۰ گیگابایت باشد [۶۲]–[۶۵].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://aws.amazon.com/machine-learning/#>

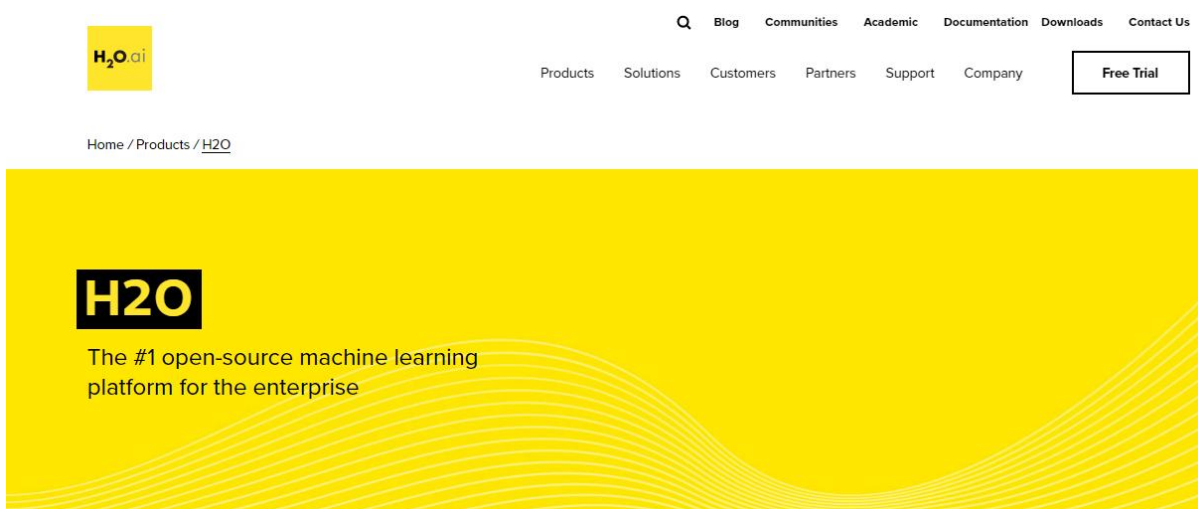


۱۷-۷-۳- سکوی H2O.ai

H2O.ai یک سکوی یادگیری عمیق متن‌باز است. این سکو، در واقع یک بازوی هوش مصنوعی برای کسب‌وکارهاست که آنان را قادر می‌سازد از داده‌های خام و بدون ساختار، اطلاعات ارزشمندی استخراج کنند. این سکو، دو نسخه رایگان و پولی دارد. سکوی H2O.ai کاربردهای متعددی دارد؛ مانند: مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده، تحلیل ریسک و کلاهبرداری، تحلیل بیمه، فناوری تبلیغات، مراقبت‌های پزشکی، هوش مشتری و غیره. این سکو از تکنیک‌های مختلفی مانند یادگیری عمیق، gradient boosting، جنگل تصادفی، مدل‌سازی خطی، تعمیم یافته (رگرسیون لجستیک، شبکه الاستیسیته) و بسیاری از موارد دیگر استفاده می‌کند [۶۶].

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://www.h2o.ai>



۱۸-۷-۳- سکوی Google AutoML Cloud

سیستم AutoML گوگل که در سال ۲۰۱۷ معرفی شد، با بازده و کارایی بیشتری نسبت به محققینی که این سیستم را ساخته‌اند، کدهای یادگیری ماشینی تولید کرده است! گوگل سکوی AutoML را توسعه داده تا به منزله مدلی از هوش مصنوعی باشد که به انسان‌ها کمک می‌کند تا دیگر سیستم‌هایی که خودشان کارهای مختلف را یاد گرفته و در واقع خودآموز هستند را ایجاد کنند. AutoML اساساً به این دلیل توسعه یافته است. در حال حاضر کارشناسان و متخصصین اندکی هستند که دانش و مهارت کافی در زمینه ساخت سیستم‌های به شدت پیچیده هوش مصنوعی دارند. له همین دلیل برای برطرف کردن نیاز به متخصصین بیشتر، AutoML خلق شده تا به واسطه خودآموزی کدنویسی کند [۶۹].

گوگل اعلام کرده که می‌توان AutoML را برای یک سری وظایف خاص آموزش داده و از نحوه انجام آن‌ها بازخورد گرفت. AutoML همچنین می‌تواند هزاران شبیه‌سازی را به منظور ایجاد تغییرات مناسب، ایجاد معماری‌های جدید و دادن بازخوردهای تکراری انجام دهد. نکته جالب این است که کارایی AutoML در زمینه تشخیص یک سری عکس بر اساس محتوای آن‌ها، ۸۲٪ برآورد شده است. به این سیستم همچنین وظیفه شناسایی مکان یک سری شیء در تصویر داده شد که پس از آن کدی که AutoML نوشت، در این زمینه میزان موفقیتی ۴۳ درصدی داشت در حالی که بهترین برنامه‌ای که توسعه‌دهندگان برای این کار کدنویسی کرده‌اند، شاخص موفقیتی ۳۹ درصدی داشته است!

AutoML Cloud در نسخه اولیه‌اش صرفاً محدود به تشخیص عکس می‌باشد. این سرویس جدید که AutoML Vision نام دارد، می‌تواند مدل‌های تشخیص عکس سفارشی درست کند. همچنین رابط کاربری ساده آن به کاربر اجازه می‌دهد که به آسانی تصاویر را آپلود کرده، آموزش داده و مدیریت‌شان کند و در نهایت مدل‌ها را بر روی Google Cloud اعمال نماید. منطق این سرویس بر مبنای استفاده از تکنیک‌های یادگیری تقویتی و شبکه‌های عصبی بازگشتی^۱ است. این پروژه یک کار تحقیقاتی مشارکتی میان Google Brain و دیگر تیم‌های هوش مصنوعی است.

آدرس اینترنتی دسترسی:

<https://cloud.google.com/automl/>

۱۹-۷-۳- مقایسه چارچوب‌ها

در این بخش، چارچوب‌های معرفی شده برای پیاده‌سازی یادگیری ماشین، از جنبه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده و در جدول ۳-۲ نشان داده شده است.

¹ Recurrent Neural Network (RNN)

جدول ۲-۳: مقایسه چارچوب‌ها و کتابخانه‌های مختلف یادگیری ماشین

پشتیبانی از CUDA ²	رابط (Interface)	زبانی برنامه‌نویسی که چارچوب/کتابخانه در آن نوشته شده	سکو	متن‌باز	اجازه‌نامه (License)	سازنده (Developer)	چارچوب/کتابخانه
بلی	Python, C++	Python, C, C++	Linux, macOS, Windows	بلی	BSD	Adam Paszke, Sam Gross, Soumith Chintala, Gregory Chanan (Facebook)	Pytorch
بلی	Python (Keras), C++, Command line, BrainScript	C++	Linux, macOS, Windows, در سکوی macOS در حال ساخت است	بلی	MIT license	Microsoft Research	Microsoft Cognitive Toolkit (CNTK)
بلی	Python, C++, Java	C++	Linux, macOS, Windows	بلی	Apache 2.0	Apache Software Foundation	Apache SINGA
بلی	Python (Keras), C/C++, Java, Go, JavaScript, R, Julia, Swift	C++, Python, CUDA	Linux, macOS, Windows, Android	بلی	Apache 2.0	Google Brain	TensorFlow
بلی	C++, Python, Julia, Matlab, JavaScript, Go, R, Scala, Perl, Clojure	Small C++ core library	Linux, macOS, Windows, AWS, Android, iOS, JavaScript	بلی	Apache 2.0	Apache Software Foundation	Apache MXNet
بلی	Python, MATLAB, C++	C++	Linux, macOS, Windows	بلی	BSD	Berkeley Vision and Learning Center	Caffe

^۱ Interface را نمی‌توان کلاس (Class) نامید. هر چند در سلسله مباحث کلاس‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما می‌توان آن را قانونی در نظر گرفت که بر روی کلاس‌ها، اعمال می‌شود. در واقع Interface قراردادی است که به موجب این قرارداد، برخی زیرکلاس‌های برنامه‌موظفند از بندهای این قرارداد استفاده کنند. با این تفاوت که در Interface فقط کلیات قرارداد ذکر می‌شود و جزئیات به عهده زیرکلاس‌ها گذاشته می‌شود.

^۲ CUDA یک پلتفرم پردازش موازی و مدل رابط برنامه‌نویسی کاربردی است که توسط شرکت Nvidia تهیه شده است.

پشتیبانی از CUDA ²	رابط (Interface) ^۱	زبانی برنامه‌نویسی که چارچوب/کتابخانه در آن نوشته شده	سکو	متن‌باز	اجازه‌نامه (License)	سازنده (Developer)	چارچوب/کتابخانه
بلی	Python	Python	Linux, macOS, Windows	بلی	BSD	Université de Montréal	Theano
بلی	Lua, LuaJIT, C, utility library for C++/OpenCL	C, Lua	Linux, macOS, Windows, Android, iOS	بلی	BSD	Ronan Collobert, Koray Kavukcuoglu, Clement Farabet	Torch
	Scala, Java, Python, R	Scala, Java, Python, R	Apache Spark	بلی	Apache License 2.0	Apache Spark	Apache Spark MLlib
بلی	Java, Scala,	Java, Scala	Cross-platform	بلی	Apache License 2.0	Apache Software Foundation	Apache Mahout
	نامعلوم	نامعلوم	Linux, Microsoft Windows	خیر	Microsoft	Microsoft	Microsoft Azure ML Studio
	-	C++	Windows, Linux	بلی	Microsoft	Microsoft	DMTK
بلی	Python, C++, IPython	Python, C++	نامعلوم	بلی	نامعلوم	Velesnet.ml	Veles
نامعلوم	C++ R, Python	C++	Cross-platform	بلی	BSD	نامعلوم	mlpack2
نامعلوم	Python, Cython, C and C++	Python, Cython, C and C++	Linux, macOS, Windows	بلی	New BSD License	French Institute for Research in Computer Science and Automation	Scikit Learn
نامعلوم	C++, Python	C++, Python	Cross-platform	بلی	LGPL	Artelnics	Open Neural Networks Library (OpenNN)

۸-۳- کاربردهای یادگیری ماشین

امروزه با توجه به رشد روزافزون قدرت پردازنده‌های رایانه‌ای، انواع تکنیک‌های یادگیری ماشین در کاربردهای مختلف صنعتی و تحقیقاتی عمومی و تخصصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از کاربردهای عمومی یادگیری ماشین در شکل ۵-۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۳: کاربردهای عمومی یادگیری ماشین

شناسایی تصویر: یکی از مهم‌ترین کاربردهای یادگیری ماشین است. اساساً این یک رویکرد برای شناسایی و کشف یک ویژگی یا یک شی در تصویر دیجیتال است. علاوه بر این می‌توان از این تکنیک برای تجزیه و تحلیل بیشتر مانند شناخت الگو، شناسایی چهره، تشخیص چهره، تشخیص بصری حروف و بسیاری موارد دیگر نیز استفاده کرد.

- **شناسایی زبان:** شناسایی و یا حدس زبان، فرآیند تشخیص نوع زبان مورد استفاده است. نرم‌افزار تشخیص زبان طبیعی آپاچی (Apache OpenNLP) به نام آپاچی تیکا (Apache Tika) یک نرم‌افزار شناسایی زبان است. تعداد زیادی رویکرد برای تشخیص زبان وجود دارد و در بین آن‌ها رویکرد یادگیری ماشین کارآمدتر است.

- **طبقه‌بندی ایمیل‌ها و جداسازی فایل‌های زائد:** در طبقه‌بندی ایمیل‌ها و جداسازی فایل‌های زائد به روش خودکار از الگوریتم یادگیری ماشین استفاده می‌شود. برای جداسازی فایل‌های زائد تکنیک‌های بسیاری وجود دارد مانند پرسپترون چند لایه^۱.

¹ Multi-Layer Perception

درخت القای تصمیم^۱ وجود دارد.

- **سرویس‌های مالی:** یادگیری ماشین ظرفیت‌های زیادی برای به کارگیری در حوزه مالی و بانکی دارد. با استفاده از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی می‌توان خدمات مالی محبوبی را ارائه داد. یادگیری ماشین می‌تواند به بانک‌ها و موسسات مالی کمک کند تا تصمیمات دقیق‌تری بگیرند، به ارائه خدمات مالی کمک کند تا بسته شدن یک حساب را قبل از وقوع تشخیص دهند، الگوی هزینه مشتریان را پیگیری کنند، تجزیه و تحلیل بازار را انجام دهند، ردیابی الگوهای هزینه را به ماشین‌های هوشمند آموزش دهند و در نهایت الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند گرایش‌ها و روندهای پیش‌رو را به راحتی شناسایی کنند و در زمان واقعی واکنش نشان دهند.
- **امنیت داده‌ها:** بدافزارها یکی از مشکلات کاربران و موسسات در فضای مجازی است که قدمت آن به روزهای ابتدایی شکل‌گیری اینترنت باز می‌گردد. در سال ۲۰۱۴، موسسه کسپراسکی اعلام کرد که روزانه بیش از ۳۲۵۰۰۰ بدافزار کشف می‌کند. براساس اطلاعات ارائه شده توسط موسسه تحقیقاتی Deep Instinct، اغلب بدافزارهای جدید از کد مشابهی که در بدافزارهای پیشین مورد استفاده قرار گرفته بهره می‌برند، حال آن‌که دامنه تغییرات اعمال‌شده بین ۲ تا ۱۰ درصد است. تحقیقات انجام‌شده نشان از این دارد که مدل یادگیری مورد استفاده در هوش مصنوعی قادر است تغییرات ۲ تا ۱۰ درصدی در کد پیاده‌سازی‌شده را شناسایی کرده و تشخیص دهد که کدام فایل‌ها بدافزار هستند. همچنین باید به این نکته اشاره کرد که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند الگوهای مربوط به رد و بدل شدن اطلاعات در فضای ابری را تحت نظر گرفته و موارد مشکوک را که احتمالاً منجر به سوءاستفاده‌های امنیتی خواهند شد، شناسایی کنند.
- **سرویس‌های سلامتی و مراقبت‌های بهداشتی:** الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین می‌توانند اطلاعات بسیار زیادی را پردازش کرده و الگوهای بسیاری را در مقایسه با انسان‌ها از میان داده‌های بسیار استخراج کنند. در یک مطالعه، محققان از یک سیستم تشخیص رایانه‌ای برای بازبینی نتایج ماموگرافی زنانی استفاده کرده‌اند که بعدها به بیماری سرطان سینه مبتلا شده‌اند. براساس اطلاعات ارائه شده این سیستم رایانه‌ای موفق شده تا با بررسی نتایج ماموگرافی‌های یک سال پیش در ۵۲ درصد موارد، سرطان سینه را در بیماران پیش از تشخیص پزشکان، پیش‌بینی کند. علاوه بر تشخیص بیماری به صورت موردی برای هر فرد براساس نتایج آزمایش، یادگیری ماشین می‌تواند با بررسی عوامل خطرناک برای بیماری جمعی آن را پیش از همه‌گیر شدن شناسایی کند. موسسه Medecision الگوریتمی را توسعه داده که با استفاده از می‌توان با شناسایی هشت فاکتور در بیماران دیابتی نیاز به بستری شدن در بیمارستان را تشخیص داد.
- **جستجوی آنلاین:** به جرأت می‌توان جستجوی اینترنتی را شناخته‌شده‌ترین نمونه از کاربرد یادگیری ماشین خواند. گوگل و رقبای این موسسه همواره در حال بهبود نتایج جستجو هستند. هر زمانی که کاربر جستجویی را در گوگل انجام می‌دهد، الگوریتم گوگل نحوه واکنش شما با نتایج نمایش داده شده را تحت نظر می‌گیرد. در صورتی که کاربر روی نتایج اولیه جستجو کلیک کند و به صفحه وب مورد نظر مراجعه کند، الگوریتم گوگل به این نتیجه می‌رسد که کاربر نتیجه مدنظر خود را یافته است. در صورتی که کاربر بدون کلیک روی هیچ یک از نتایج به صفحه دوم مراجعه کند یا عبارت دیگری را برای جستجو وارد کند، گوگل به این نتیجه می‌رسد که کاربر به مواردی که در نظر داشته، دست نیافته است. الگوریتم هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین قادر است با دریافت اطلاعات این چنینی، نتایج جستجو را در مقایسه با گذشته بهبود دهد.
- **خودروهای هوشمند:** شرکت IBM اخیراً تحقیقی انجام داده که براساس آن بیش از ۷۴ درصد متخصصان در حوزه خودرو از

¹ Decision Tree Induction

پیش‌بینی خود برای عرضه تجاری خودروهای هوشمند تا سال ۲۰۲۵ سخن گفته‌اند. یک خودروی هوشمند نه تنها با استفاده از مفهوم اینترنت اشیاء قادر است با خودروهای دیگر و تابلوهای کنار جاده ارتباط برقرار کند، بلکه قادر است تا با یادگیری ماشین عادات‌های راننده را نیز بشناسد. این عادات شامل دمای داخلی خودرو، تنظیمات سیستم صوتی و وضعیت صندلی است. خودرو قادر است با تکیه بر قابلیت‌های هوشمند تنظیمات را تغییر داده و در صورت بروز مشکل، خود مسأله را حل کند. همچنین باید به ارائه پیشنهاد در مورد مسیر رسیدن به مقصد براساس داده‌های ترافیکی و وضعیت جاده نیز اشاره کرد.

- **سیستم ارائه پیشنهاد: سرویس‌هایی نظیر آمازون و نتفلیکس** با استفاده از فعالیت‌های کاربران در سرویس‌هایشان، پیشنهاداتی را در اختیار افراد قرار می‌دهند. الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین با تحلیل و بررسی فعالیت یک کاربر مشخص و مقایسه آن با میلیون‌ها کاربر دیگر، لیستی از پیشنهادات را تهیه می‌کنند که احتمالاً کاربر در نوبت بعدی به خرید کالا یا برنامه پیشنهادی علاقه نشان دهد. این پیشنهادات که برگرفته از سیستم‌های هوشمند هستند، رفته رفته باهوش‌تر شده و می‌توانند درک کنند که شما چه کالاهایی را برای هدیه دادن و چه کالاهایی را برای استفاده شخصی خریداری می‌کنید. در مورد سرویس‌هایی نظیر نتفلیکس، این سیستم‌ها با افزایش هوش می‌توانند تمایلات اعضای مختلف یک خانواده را از هم تفکیک کنند.
- **سرویس‌های مسیریابی:** تا قبل از سال ۲۰۱۷ پروژه Google Map صرفاً یک نقشه برخط از تمام جهان بود اما بعد از این سال، گوگل قابلیت‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق را به این سرویس خود افزوده است. این الگوریتم یادگیری ماشین به نرم‌افزارها کمک می‌کند تا نام خیابان‌ها و شماره خانه‌ها را از روی عکس‌هایی که از آن خیابان‌ها گرفته شده، استخراج کند تا نتایج جستجو دقیق‌تر شوند. با مجموع ۸۰ میلیارد تصویری که از خیابان‌ها در دیتابیس گوگل موجود می‌باشد، این استخراج نام‌ها با دقت ۸۴/۲ درصد در حال انجام است.

فصل ۴- یادگیری با نظارت

۱-۴- مقدمه

در این فصل به بررسی روش‌های یادگیری نظارت‌شده (بانظارت) پرداخته می‌شود. بدین منظور در ابتدا اصول یادگیری با نظارت شرح داده شده و سپس انواع روش‌های یادگیری ماشین که در این دسته قرار می‌گیرند معرفی می‌گردد. در این بین توجه به اینکه لازم است که روش‌های بسیار متعددی تاکنون ارائه شده و همواره روش‌های جدیدتری در حال ابداع هستند که عمدتاً از ترکیب و یا بهبود روش‌های اصلی نشأت می‌گیرند. به همین دلیل در این فصل، مبانی روش‌های اصلی یادگیری بانظارت بررسی می‌شود.

۲-۴- مبانی یادگیری بانظارت

در یادگیری بانظارت (نظارت‌شده) کار با وارد کردن مجموعه داده‌های شامل ویژگی‌های آموزش (خصیصه‌های آموزش^۱) و ویژگی‌های هدف (خصیصه‌های هدف^۲) آغاز می‌شود. الگوریتم یادگیری نظارت‌شده رابطه بین مثال‌های آموزش و متغیرهای هدف مختص آن‌ها را به دست می‌آورد و آن رابطه یادگرفته‌شده را برای دسته‌بندی ورودی‌های کاملاً جدید استفاده می‌کند. لذا یادگیری با نظارت نیازمند تعدادی داده آموزشی جفت‌های ورودی-خروجی به منظور آموزش سیستم است. برای نمایش اینکه یادگیری نظارت‌شده چگونه کار می‌کند، یک مثال از پیش‌بینی y برحسب تابعی از x در نظر گرفته می‌شود [۴۹]، [۷۰]–[۷۳]. از منظر ریاضی:

$$y = f(x) + c \quad (۴-۱)$$

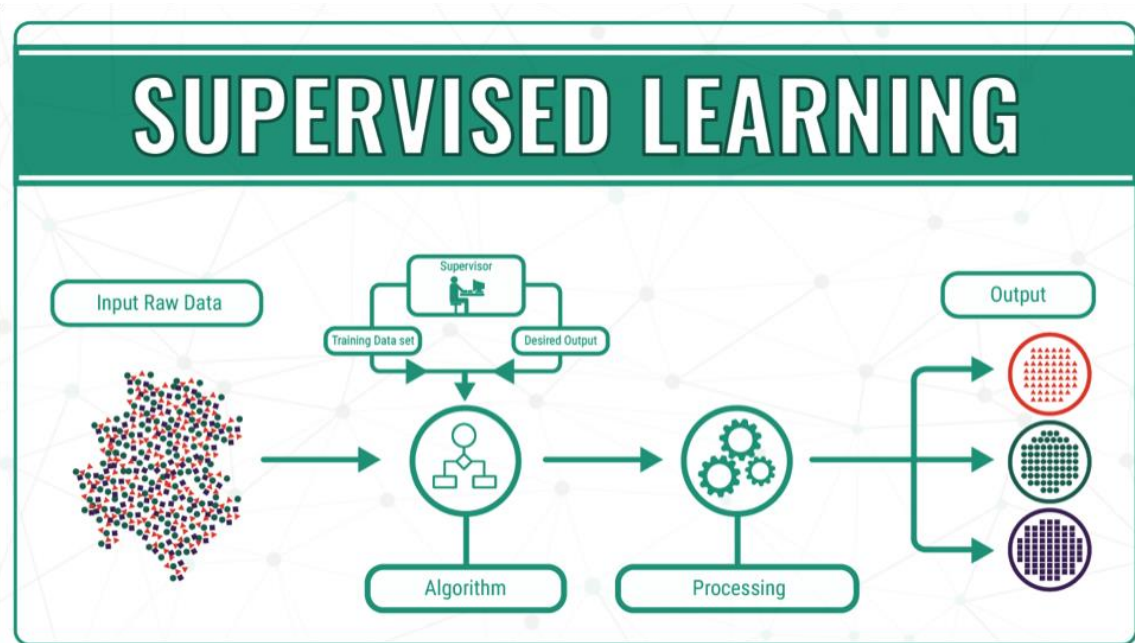
که در آن:

- ❖ f تابع y بر حسب x
- ❖ x ورودی
- ❖ y خروجی
- ❖ c یک خطای تصادفی

هدف نهایی یادگیری بانظارت پیش‌بینی y با حداکثر دقت برای ورودی جدید داده x است. این نوع یادگیری، داده‌های آموزشی را تحلیل می‌کند و یک تابع خروجی تولید می‌کند که از طریق آن می‌توان مثال‌های جدید را پیش‌بینی کرد. باتوجه به مطالب فوق، ساختار کلی الگوریتم یادگیری بانظارت در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در یادگیری با نظارت، ورودی و خروجی مطلوب مشخص است و سپس با استفاده از الگوریتم‌هایی، داده‌های خام در خروجی به داده‌های پردازش‌شده مطلوب با توجه به خروجی مطلوب تبدیل می‌شوند. در واقع، یک مجموعه از مثال‌های یادگیری وجود دارد که به ازای هر ورودی، مقدار خروجی یا تابع مربوطه نیز مشخص است. هدف سیستم یادگیر، به دست آوردن فرضیه‌ای است که تابع یا رابطه بین ورودی یا خروجی را حدس بزند و به همین دلیل، به این روش یادگیری با نظارت گفته می‌شود.

^۱ Training Attributes

^۲ Target Attributes



شکل ۱-۴: ساختار یادگیری با نظارت [۷۴]

چندین راه برای پیاده‌سازی یادگیری با نظارت وجود دارد که برخی از متداول‌ترین رویکردها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. برپایه مجموعه داده موجود، مسأله یادگیری ماشین با نظارت در دو نوع دسته «کلاس‌بندی»^۱ و «رگرسیون»^۲ قرار می‌گیرد. در مسئله کلاس‌بندی هدف مدل این است که بتواند دسته داده ورودی را تشخیص بدهد. در واقع در بحث کلاس‌بندی داده ورودی به یک سری خروجی‌های گسسته نگاشت می‌شود. به عبارت دیگر هدف کلاس‌بندی این است که تشخیص دهد داده ورودی x به کدام کلاس تعلق دارد. مانند پیش‌بینی اینکه یک ایمیل هرزنامه هست یا خیر یا پیش‌بینی نوع بیماری یک فرد از میان ۱۰ بیماری. اما در رگرسیون نیز هدف پیدا کردن رابطه بین ورودی و خروجی می‌باشد با این تفاوت که اینجا خروجی‌های یک مقدار گسسته نیستند و می‌تواند هر مقدار پیوسته‌ای باشد. به طور خلاصه، اگر داده‌های موجود دارای مقادیر ورودی (آموزش) و خروجی (هدف) باشند، مسأله از نوع کلاس‌بندی است و اگر مجموعه داده دارای «مقادیر عددی پیوسته»^۳ بدون هرگونه برچسب هدفی باشد، مسأله از نوع رگرسیون می‌باشد [۷۳].

۳-۴- تکنیک کلاس‌بندی (طبقه‌بندی)

همواره در زندگی ما، مواردی وجود دارند که دوست داریم بدانیم اگر یک کاری را انجام دهیم نتیجه خوب یا بدی دارد؟ این کار چگونه انجام می‌شود؟ اگر بخواهیم بر اساس تجارب خود عمل کنیم نیاز داریم بر اساس کارهایی که قبلاً انجام دادیم، و تجاربی که کسب کردیم (یک فرآیند یادگیری رخ داده است)، برای شرایط جدید تصمیم‌گیری نماییم. باتوجه به این مطالب تعریف دقیق و علمی کلاس‌بندی عبارت است از:

¹ Classification

² Regression

³ Continuous Numerical Values

- کلاس‌بندی، علمی است که بر اساس داده‌های گسسته قبلی که دارای برچسب هستند، مدلی برای پیش‌بینی برچسب داده‌های جدید می‌سازد.
- کلاس‌بندی، یکی از زیرشاخه‌های اساسی یادگیری ماشین و داده‌کاوی^۱ است. اساس آن داده‌های جمع‌آوری شده از اعمال گذشته هستند. اعمالی که بر اساس دانش فرد خبره برچسب‌گذاری شده‌اند. برای اینکه یک مدل کلاس‌بندی خوب داشته باشیم، باید با داده‌ها و ساختار آن‌ها و نیز تعداد دسته‌ها (برچسب-کلاس-طبقه) اطلاع داشته باشیم. هر چند آشنایی با ساختار و نوع داده‌ها گاهی عملی غیر ممکن است اما در صورت وجود یک آشنایی ساده نیز می‌توان مدل کلاس‌بندی درست را انتخاب کرد.
- با توجه به توضیحات صدرالذکر، به بیان دیگر؛ کلاس‌بندی فرآیند قراردادن نمونه‌های جدید در کلاس‌های مختلف بر اساس داده‌های قدیمی است و برای این کار به یک مدل کلاس‌بندی نیاز است.
- انتخاب یک مدل طبقه‌بندی می‌تواند به موارد زیر وابسته باشد [۷۱]، [۷۲]، [۷۵]:
 - ساختار و نحوه توزیع داده‌ها
 - تعداد طبقه‌ها
 - پیچیدگی زمانی ساخت مدل
- الگوریتم‌های مختلفی برای کلاس‌بندی ارائه شده است که مهم‌ترین و معروف‌ترین آن‌ها عبارتند از:
 - K-نزدیک‌ترین همسایگی^۲
 - درخت تصمیم^۳
 - ماشین بردار پشتیبان^۴
 - طبقه‌بند بیز ساده^۵
 - رگرسیون منطقی^۶
- در مرحله یادگیری، مدل کلاس‌بندی، طبقه‌بند را با تحلیل مجموعه داده‌های آموزش می‌سازد. در مرحله کلاس‌بندی، برچسب‌های کلاس برای داده‌های موجود پیش‌بینی می‌شوند. مجموعه داده و برچسب‌های کلاس در حال تحلیل به دو دسته «مجموعه آموزش^۷» و «مجموعه تست^۸» تقسیم می‌شوند. «تاپل‌های^۹» مجزایی که مجموعه داده تست را می‌سازند از مجموعه داده تحت تحلیل به طور تصادفی نمونه‌برداری می‌شوند. تاپل‌های باقیمانده مجموعه داده تست را شکل می‌دهند و از تاپل‌های آموزش مستقل هستند، بدین معنا که برای ساخت کلاس‌بند استفاده نمی‌شوند.
- مجموعه داده تست به منظور تخمین پیش‌بینی کلاس‌بند استفاده می‌شود. دقت کلاس‌بند درصدی از مجموعه داده تست است که توسط کلاس‌بند به درستی دسته‌بندی شده‌اند. به منظور کسب دقت بیشتر، بهترین راه، تست الگوریتم‌های گوناگون و آزمودن پارامترهای

¹ Data Mining² K-Nearest Neighbor (KNN)³ Decision Tree⁴ Support Vector Machines⁵ Naive Bayes⁶ Logistic Regression⁷ Training Set⁸ Test Set⁹ Tuples

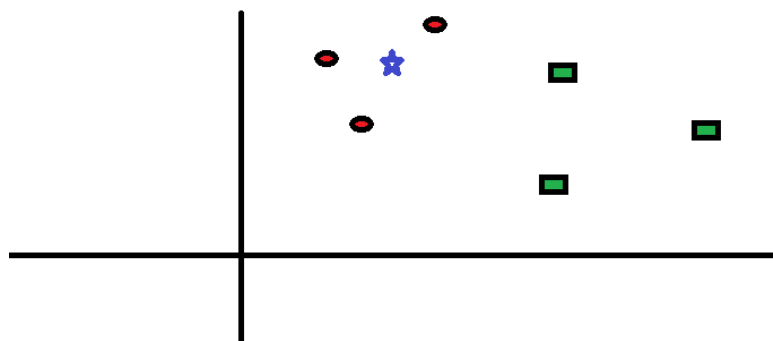
مختلف در هر الگوریتم است. برای انتخاب یک الگوریتم خوب برای مساله، پارامترهایی مانند دقت، زمان آموزش، خطی بودن، تعداد پارامترها و شرایط خاص باید برای الگوریتم‌های متفاوت در نظر گرفته شود [۷۳].

۱-۳-۴- K-نزدیک‌ترین همسایگی

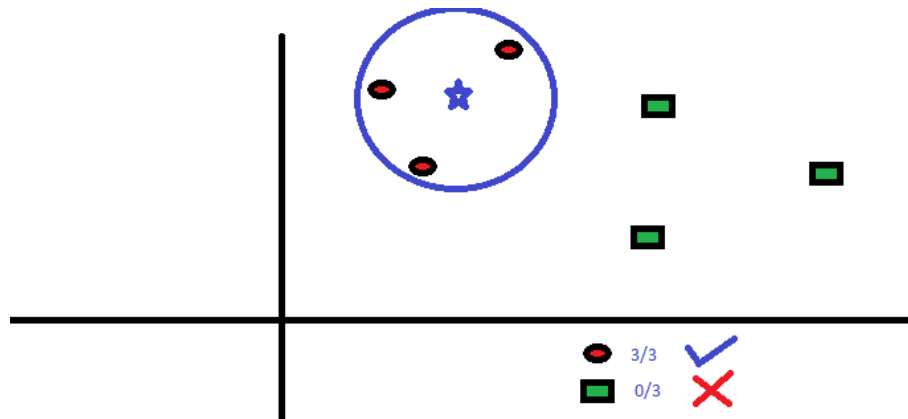
الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایه که با نام الگوریتم جستجوی مجاورت، جستجوی نزدیک‌ترین نقطه یا جستجوی همسانی نیز شناخته می‌شود، یکی از ساده‌ترین الگوریتم‌های کلاس‌بندی در حوزه یادگیری با نظارت است. این الگوریتم داده‌های آموزشی را دریافت می‌کند و از طریق بررسی عدد K، پاسخ نمونه‌های جدید را پیش‌بینی می‌کند. عدد K از نزدیک‌ترین همسایگی به دست می‌آید و نمونه‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی آراء، محاسبه مجموع وزن‌دار و ... هستند.

گاهی اوقات، از الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایه به عنوان روش یادگیری از طریق مثال نیز نام برده می‌شود زیرا برای پیش‌بینی داده‌های آموزشی و جدید به دنبال یک ویژگی برداری است که پاسخی شناخته‌شده به نزدیک‌ترین بردار داده شده را دارد. به زبان ساده‌تر می‌توان گفت که نمونه‌ها در الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایگی با استفاده از رأی اکثریت همسایه‌هایش ایجاد می‌شود. در این حالت K عموماً یک مقدار صحیح کوچک و مثبت است [۷۰]، [۷۱]، [۷۶].

برای درک بهتر این الگوریتم، عملکردش با یک مثال ساده در ادامه بررسی می‌شود. در شکل ۲-۴ نحوه توزیع دایره‌های قرمز و مربع‌های سبز نشان داده شده است. با فرض اینکه هدف پیدا کردن کلاسی است که ستاره آبی متعلق به آن می‌باشد (یعنی دایره‌های قرمز). در این مثال در کل دو کلاس دایره‌های قرمز و مربع‌های سبز وجود دارند و ستاره آبی بر اساس منطق کلاسیک می‌تواند تنها متعلق به یکی از این دو کلاس باشد. «K» در الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایگی، تعداد نزدیک‌ترین همسایه‌هایی است که بر اساس آن‌ها رأی‌گیری درباره وضعیت تعلق یک نمونه داده به کلاس‌های موجود انجام می‌شود. با فرض اینکه $K=3$ باشد، آن‌گاه یک دایره آبی دور سه عدد از نزدیک‌ترین همسایه‌های ستاره آبی ترسیم شده است. جزئیات بیشتر در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: توزیع نمونه‌ها



شکل ۳-۴: تعیین کلاس نمونه جدید

سه نقطه نزدیک‌تر به ستاره آبی، همه دایره‌های قرمز رنگ هستند. با میزان اطمینان خوبی می‌توان گفت که ستاره آبی به کلاس دایره‌های قرمز تعلق دارد. در این مثال، انتخاب بسیار آسان است چون هر سه نزدیک‌ترین همسایه ستاره آبی، دایره‌های قرمز هستند و در واقع هر سه رأی متعلق به دایره‌های قرمز است.

مراحل الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایگی شامل موارد زیر است:

- بارگیری داده‌های ورودی
- انتخاب K به عنوان تعداد نزدیک‌ترین همسایگان

برای هر یک از داده‌های آموزش:

محاسبه فاصله بین داده مورد سؤال و هر یک داده‌های آموزش

معیار فاصله برای متغیرهای پیوسته معمولاً فاصله اقلیدسی^۱، «فاصله منهتن»^۲ و «فاصله مینکوفسکی»^۳ و... است. برای متغیرهای گسسته، مانند دسته‌بندی متون، می‌توان از یک معیار دیگر مانند «فاصله همینگ»^۴ استفاده کرد. در بند ۱-۳-۴ روابط ریاضی این فاصله‌های معرفی می‌شود.

- اضافه‌نمودن فاصله و اندیس نمونه به یک مجموعه
- مرتب‌سازی مجموعه بر اساس فاصله از کوچک به بزرگ
- انتخاب نقاط K عضو اول مجموعه مرتب‌شده
- اعلام خروجی بسته به حالت طبقه‌بندی

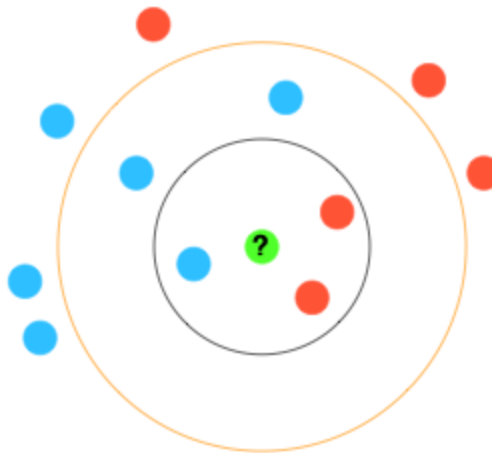
الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایگی دارای مزایا و معایب متعددی است که در جدول ۱-۴ مهم‌ترین آن‌ها ذکر شده‌اند [۷۷].

¹ Euclidean Distance
² Manhattan Distance
³ Minkowski Distance
⁴ Hamming Distance

جدول ۱-۴: مزایا و معایب الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایه [۷۷]

مزایا	معایب
هیچ پیش فرضی در مورد داده‌ها وجود ندارد	محاسبات زیاد
الگوریتم ساده	نیاز به حافظه بالا - چرا که الگوریتم، تمام داده‌های قبلی را ذخیره می‌کند.
دقت نسبتاً بالا	ذخیره تقریباً یا همه داده‌های اولیه
دائماً تکامل می‌یابد	مرحله پیش‌بینی ممکن است کند باشد (با N بزرگ)
چند منظوره (هم قابل استفاده برای طبقه‌بندی و هم قابل استفاده برای رگرسیون)	حساسیت زیاد به ویژگی‌های نامناسب و مقیاس داده‌ها

انتخاب پارامتر K در الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایگی، بسیار حائز اهمیت است. به عنوان مثال در شکل ۴-۴، نمونه آزمایش (نقطه سبز رنگ) باید به دسته اول (کره‌های آبی) یا دسته دوم (کره‌های قرمز) طبقه‌بندی شود. اگر $K=3$ باشد آن‌گاه دایره سیاه رنگ دور نمونه آزمایش (نقطه سبز رنگ) رسم می‌شود و در نتیجه نمونه آزمایش به دسته دوم (کره‌های قرمز) اختصاص می‌یابد؛ زیرا درون دایره سیاه درونی، ۲ کره قرمز و ۱ کره آبی وجود دارد. همچنین اگر $K=5$ انتخاب شود آن‌گاه دایره نارنجی رنگ دور نمونه آزمایش (نقطه سبز رنگ) رسم می‌شود و لذا نمونه آزمایش به دسته اول (کره‌های آبی) اختصاص داده می‌شود. زیرا در حلقه نارنجی رنگ، ۳ کره آبی و ۲ کره قرمز وجود دارد.



-نزدیک‌ترین همسایگی [۷۱]-[۷۳], K[۷۸] شکل ۴-۴: طبقه‌بندی نمونه سبزرنگ با استفاده از الگوریتم

بهترین انتخاب K بستگی به داده‌ها دارد؛ به‌طور کلی، مقادیر بزرگ K باعث کاهش خطا در طبقه‌بندی می‌شود، اما وضوح مرز بین کلاس‌ها را کمتر می‌کند. اگر $K=1$ باشد، الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایگی به سادگی مشخص‌کننده نمونه جدید است. برای انتخاب مقدار بهینه K می‌توان داده‌های آموزش و ارزیابی را از مجموعه داده اولیه جدا کرد. سپس با رسم نمودار مربوط به خطای ارزیابی مقدار بهینه K را انتخاب کرد. این مقدار از K باید برای همه پیش‌بینی‌ها مورد استفاده قرار بگیرد و در واقع برای همه مراحل پیش‌بینی باید از یک K مشخص استفاده شود. لازم به ذکر است که در هنگام مشخص کردن مقدار K، مقادیر فرد بسیار سودمندتر از K با مقادیر زوج است، زیرا مقدار فرد از ایجاد داده‌های مساوی جلوگیری کرده و به راحتی نتیجه محاسبه را تعیین می‌کند [۷۱]-[۷۳], [۷۸].

۴-۳-۱-۱- معرفی روابط انواع فاصله‌های مورد استفاده در الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایگی

توابع زیادی برای اندازه‌گیری فاصله بین اشیاء، با ویژگی‌های کمی وجود دارد. «توابع فاصله^۱» در تکنیک‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین به خصوص در خوشه‌بندی و K-نزدیک‌ترین همسایگی، کاربردهای زیادی دارند. در این بخش به معرفی خصوصیات تابع فاصله پرداخته شده و سپس شیوه محاسبه فاصله براساس چند روش از جمله فاصله اقلیدسی، فاصله منهتن، فاصله مینکوفسکی و فاصله همینگ بررسی می‌شود. این توابع فاصله عمدتاً برای اندازه‌گیری میزان عدم شباهت در مباحث داده‌کاوی به کار می‌روند [۷۹].

❖ تابع فاصله

هر تابعی $D: X \times X \rightarrow [0, \infty)$ یک تابع فاصله است، اگر به ازاء هر سه نقطه دلخواه X و Y و Z در شرایط زیر صدق کند:

- $D(x, y) \geq 0$: این رابطه بیانگر نامنفی بودن تابع فاصله است.
- $D(x, y) = 0 \leftrightarrow x = y$: بدین معنی است که اگر فاصله بین دو نقطه صفر باشد، دو نقطه یکی هستند و برعکس.
- $D(x, y) = D(y, x)$: این رابطه، بیانگر خاصیت تقارنی برای تابع فاصله است.
- $D(x, z) \leq D(x, y) + D(y, z)$: این رابطه بدین معنی است که تابع فاصله در نامساوی مثلثی صدق می‌کند. یعنی فاصله دو نقطه X و Z کمتر از مجموع فاصله X تا Y و فاصله Y تا Z است. این موضوع به خوبی در فاصله اقلیدسی دیده می‌شود.

❖ تابع فاصله اقلیدسی

با استفاده از فاصله اقلیدسی کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه برطبق رابطه فیثاغورث، محاسبه می‌شود. اگر X و Y دو نقطه با p مولفه باشند، فاصله اقلیدسی بین این دو به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$D_{euc} = \left(\sum_{i=1}^p (x_i - y_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۴-۲)$$

❖ تابع فاصله منهتن

اگر به جای مربع فاصله بین مولفه‌ها، از قدرمطلق فاصله بین مولفه‌های نقاط استفاده شود، تابع فاصله را منهتن می‌نامند. این نام به علت تقاطع منظم خیابان‌ها در محله منهتن نیویورک انتخاب شده است. البته این فاصله گاهی به نام فاصله تاکسی یا بلوک شهری نیز نامیده می‌شود. اگر X و Y دو نقطه با p مولفه (p بعدی) باشند، شیوه محاسبه فاصله منهتن به صورت زیر خواهد بود:

$$D_{man} = \sum_{i=1}^p |x_i - y_i| \quad (۴-۳)$$

¹ Distance Functions

❖ تابع فاصله مینکوفسکی

فاصله مینکوفسکی براساس تحقیقات دانشمند ریاضی «هرمان مینکوفسکی»^۱ معرفی شده است. او با تعریف فاصله جدیدش، حالت کلی‌تری از فاصله اقلیدسی و منهتن را برای اشکال محدب یا کوژ ایجاد کرد. اگر A و B دو نقطه در فضای p بعدی باشند، فاصله مینکوفسکی آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود. پارامتر فاصله مینکوفسکی در اینجا d در نظر گرفته شده است. فاصله مینکوفسکی با پارامتر d را به صورت $D_{\text{mink}}(A, B; d)$ نشان می‌دهند.

$$D_{\text{mink}}(A, B; d) = \left(\sum_{i=1}^p |x_i - y_i|^d \right)^{\frac{1}{d}} \quad (۴-۴)$$

اگر مقدار d برابر با ۲ باشد، فاصله مینکوفسکی به فاصله اقلیدسی تبدیل می‌شود. همینطور با انتخاب $d=1$ این فاصله همان فاصله

منهتن خواهد بود. همچنین اگر $d \rightarrow \infty$ فاصله مینکوفسکی را فاصله چیشف نیز می‌نامند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{\text{mink}}(A, B; d) = \lim_{d \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^p |x_i - y_i|^d \right)^{\frac{1}{d}} = \text{Max}_{i=1}^p |x_i - y_i| \quad (۴-۵)$$

به این ترتیب فاصله چیشف، بیان‌گر بزرگ‌ترین فاصله در بین فاصله‌های مولفه‌ها است. بر همین اساس اگر $d \rightarrow -\infty$ فاصله مینکوفسکی حداقل فاصله بین مولفه‌ها محسوب می‌شود. به این ترتیب خواهیم داشت:

$$D_{\text{mink}}(A, B; -\infty) = \lim_{d \rightarrow -\infty} \left(\sum_{i=1}^p |x_i - y_i|^d \right)^{\frac{1}{d}} = \text{Min}_{i=1}^p |x_i - y_i| \quad (۴-۶)$$

❖ تابع فاصله همینگ

در تئوری اطلاعات فاصله همینگ برای دو رشته با طول مساوی، برابر تعداد مکان‌هایی است که سمبول‌های متناظر متفاوت هستند. به عبارت دیگر، کمترین تعداد جایگزینی‌هایی است که یک رشته به یک رشته دیگر تغییر پیدا کند، یا تعداد خطاهایی که یک رشته به رشته دیگر تبدیل گردد [۸۰]. به عنوان مثال فاصله همینگ بین:

- «toned» و «roses» برابر سه هست.
- ۱۰۱۱۱۰۱ و ۱۰۰۱۰۰۱ برابر دو هست.
- ۲۱۷۳۸۹۶ و ۲۲۳۳۷۹۶ برابر سه هست.

¹ Hermann Minkowski

۲-۳-۴- درخت تصمیم

درخت تصمیم ابزاری برای اتخاذ تصمیم مناسب‌تر است؛ به طوری که شکل و ساختار درختی (یا سلسله مراتبی)^۱ به تصمیمات و نتایج آن‌ها می‌بخشد. ساختار این درخت می‌تواند بر مبنای شانس و احتمال نیز باشد، به طوری که انتخاب هر تصمیم به طور تصادفی می‌تواند ریسک یا مزایایی به همراه داشته باشد. گاهی اوقات برای نمایش گزاره‌های شرطی و نتایج حاصل از ترکیب آن‌ها از درخت تصمیم نیز استفاده می‌شود. امروزه از درخت تصمیم برای نمایش عملیات سلسله مراتبی و به خصوص تحلیل تصمیمات صورت گرفته برای رسیدن به هدف استفاده می‌شود. به این ترتیب می‌توان درخت تصمیم را یکی از ابزارهای مناسب در حوزه یادگیری ماشین و حتی مدیریت سطح بالا، در نظر گرفت. درخت تصمیم در هر دو حوزه کلاس‌بندی و رگرسیون که از تکنیک‌های یادگیری با نظارت هستند قابل استفاده است [۸۱].

یادگیری درخت تصمیم معمولاً بر اساس حداقل‌سازی کمیتی به نام آنتروپی انجام می‌شود. البته وابع دیگری هم برای یادگیری درخت تصمیم وجود دارند. نسخه‌های قدیمی درخت تصمیم تنها قادر به استفاده از متغیرهای گسسته بودند، اما الگوریتم‌های جدیدتر هردو نوع متغیر گسسته و پیوسته را در یادگیری به کار می‌گیرند. یکی از مزایای مهم الگوریتم درخت تصمیم قابلیت فهم و تفسیر آسان است که محبوبیت این الگوریتم را بالا برده است. از معایب آن عدم استواری و دقت کم است.

درخت تصمیم شبیه یک نمودار روندنما^۲ است که در آن هر گره^۳ به صورت یک آزمایش^۴ در نظر گرفته می‌شود. از طرفی هر شاخه^۵ بیان‌گر نتایج حاصل از این آزمایش است. آخرین گره‌های درخت تصمیم‌گیری، برگ‌های درخت نام‌ارند. به این ترتیب برگ‌های هر شاخه نیز شامل شماره تصمیم اتخاذ شده یا برچسب کلاس‌بندی در خوشه‌بندی یا طبقه‌بندی خواهد بود. مسیری که از ریشه به برگ‌ها طی می‌شود، بیانگر قوانین طبقه‌بندی است.

اجزای اصلی درخت تصمیم عبارتند از:

- گره: گره ساختاری است که می‌تواند دارای یک ارزش یا مقدار خاص یا بیان یک شرط باشد.
- گره ریشه^۶: اولین و بالاترین گره در یک درخت تصمیم، ریشه نامیده می‌شود. بخش‌های دیگر درخت تصمیم از ریشه آغاز و نشات می‌گیرند.
- گره تصمیم: زمانی که یک گره به زیرگره‌های بعدی تقسیم می‌شود، آن را یک گره تصمیم می‌نامیم.
- گره والد^۷: گره‌ای که دارای فرزند باشد. به این معنی که گره‌ای در سطح پایین‌تر به آن متصل است.
- گره فرزند^۸: گره‌ای است که به طور مستقیم به گره دیگری متصل است و در سطح پایین‌تری از گره والد قرار گرفته است.
- برگ/گره پایانه: گره‌هایی که تقسیم نمی‌شوند یا به عبارتی تقسیم‌یابی از طریق آن‌ها پایان می‌یابد، برگ یا گره پایانه نام دارند.
- شاخه: شاخه، گره‌ای است که حداقل دارای یک فرزند است.

¹ Hierarchical

² Flow chart

³ Node

⁴ Experiment

⁵ Branch

⁶ Root

⁷ Parent

⁸ Child

- هرس کردن^۱: هنگامی که از یک گره تصمیم، زیرگره‌ها را حذف کنیم، این عمل هرس کردن نامیده می‌شود. در واقع این عمل متضاد عمل تقسیم کردن است.

۴-۳-۲-۱- الگوریتم ساختن درخت تصمیم‌گیری

با فرض اینکه مجموعه داده‌ها $D = (x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$ هستند، به طوری که $x_i \in \mathcal{R}^d$ و $y_i \in \mathcal{R}$ باشد. درخت تصمیم‌گیری سعی می‌کند به صورت بازگشتی داده‌ها را به صورتی از هم جدا کند که در هر گره متغیرهای مستقل $\mathcal{Y}$ به هم نزدیک شده همسان شوند. هر گره زیر مجموعه‌ای از داده‌ها است که به صورت بازگشتی ساخته شده است. به طور دقیق‌تر در گره m اگر داده برابر Q باشد آن‌گاه یک بُعد از متغیرهایی وابسته را به همراه یک آستانه انتخاب کرده و داده‌ها را برحسب این بُعد و آستانه به دو نیم تقسیم می‌نماییم، به صورتی که به طور متوسط در هر دو نیم، متغیرهای مستقل $\mathcal{Y}$ خیلی به هم نزدیک و همسان شده باشند. این بعد و آستانه $\theta = (j, t_m)$ نامیده می‌شود. دامنه j برابر است با $[1, \dots, d]$ و t_m یک عدد صحیح است. Q بر حسب $\theta = (j, t_m)$ به دو بخش $Q_{left}(\theta)$ و $Q_{right}(\theta)$ به شکل زیر تقسیم می‌شود $[82]-[84]$:

$$Q_{left}(\theta) = \{(x_i, y_i) \in Q \mid x_{i,j} \leq t_m\} \quad (4-7)$$

$$Q_{right}(\theta) = \{(x_i, y_i) \in Q \mid x_{i,j} > t_m\} \quad (4-8)$$

حال باید تعیین نمود که کدام بُعد از متغیرهای وابسته و چه آستانه‌ای را باید انتخاب کرد. به بیان ریاضی باید θ را انتخاب کرد که ناخالصی داده را کم کند. ناخالصی برحسب نوع مسئله، تعریفی متفاوت خواهد داشت؛ مثلاً اگر مسئله از نوع دسته‌بندی دوگانه باشد، آن‌گاه معیار ناخالصی می‌تواند آنتروپی داده باشد. لذا کمترین ناخالصی زمانی اتفاق می‌افتد که $Q_{left}(\theta)$ و $Q_{right}(\theta)$ هر کدام از یک دسته باشند. یعنی در هر کدام از این دو گره، دو نوع دسته وجود نداشته باشد. از آنجا که مقدار داده در $Q_{left}(\theta)$ و $Q_{right}(\theta)$ نسبت به یکدیگر متفاوت است، آن‌گاه میانگین وزن‌دار از هر دو ناخالصی به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$G(Q, \theta) = \frac{n_{left}}{N_m} H(Q_{left}(\theta)) + \frac{n_{right}}{N_m} H(Q_{right}(\theta)) \quad (4-9)$$

که:

$$n_{left} = |Q_{left}(\theta)| \quad (4-10)$$

$$n_{right} = |Q_{right}(\theta)| \quad (4-11)$$

$$N_m = |Q| \quad (4-12)$$

¹ Pruning

هدف یافتن مقدار θ که ناخالصی را حداقل می‌کند، به بیانی دیگر $\theta^* = \arg \min_{\theta} G(Q, \theta)$. در نهایت، همین روند به صورت بازگشتی برای $Q_{left}(\theta)$ و $Q_{right}(\theta)$ انجام می‌شود. لازم به ذکر است که بعضی از گره‌ها باید به برگ تبدیل شود. معیاری که از آن برای تبدیل یک گره به برگ استفاده شود می‌تواند مقداری حداقلی برای N_m (تعداد داده در یک گره) و یا عمق درخت باشد به طوری که با دونیم کردن گره یکی از معیارها عوض شود. معمولاً این دو پارامتر باعث تنظیم مدل می‌شود. در ابتدای کار گره شامل تمام داده‌ها می‌شود یعنی $Q=D$.

در مسئله کلاس‌بندی با استفاده از درخت تصمیم، اگر $y_i \in [1, \dots, K]$ باشد آن‌گاه تابع ناخالصی برای گره Q می‌تواند یکی از موارد ناخالصی گینی^۱، ناخالصی آنتروپی^۲ و یا ناخالصی خطا باشد که به ترتیب در روابط (۴-۱۳) تا (۴-۱۵) نشان داده شده‌اند.

$$H(Q) = \sum_k p_{mk} (1 - p_{mk}) \quad (۴-۱۳)$$

$$H(Q) = - \sum_k p_{mk} \log(p_{mk}) \quad (۴-۱۴)$$

$$H(Q) = 1 - \max(p_{mk}) \quad (۴-۱۵)$$

که در روابط فوق:

$$p_{mk} = \frac{1}{N_m} \sum_{(x_i, y_i) \in Q} I(y_i = k) \quad (۴-۱۶)$$

در پیاده‌سازی تکنیک رگرسیون با استفاده از روش درخت تصمیم، ناخالصی می‌تواند یکی از موارد «میانگین خطای مربعات» و یا «میانگین خطای قدرمطلق» باشد که به ترتیب در روابط (۴-۱۷) و (۴-۱۸) نوشته شده‌اند.

$$H(Q) = \frac{1}{N_m} \sum_{i \in N_m} (y_i - \bar{y}_m)^2 \quad (۴-۱۷)$$

$$H(Q) = \frac{1}{N_m} \sum_{i \in N_m} |y_i - \bar{y}_m| \quad (۴-۱۸)$$

که:

$$\bar{y}_m = \frac{1}{N_m} \sum_{i \in N_m} y_i \quad (۴-۱۹)$$

الگوریتم‌های مختلفی برای ساختن درخت تصمیم وجود دارد که معروف‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها عبارتند از:

^۱ Gini

^۲ Entropy

- الگوریتم درخت تصمیم دسته‌بندی و درخت رگرسیون^۱
- الگوریتم درخت آماری سریع، ناریب و کارا^۲
- الگوریتم درخت شناسایی اثرات متقابل خودکار کای^۳
- الگوریتم درخت C5.0
- الگوریتم درخت ID3

مزایا و معایب روش درخت تصمیم ماشین در جدول ۲-۴ نوشته شده است.

جدول ۲-۴: ویژگی‌های روش درخت تصمیم [۸۲]-[۸۴]

مزایا	معایب
قوانین تولیدشده و به‌کاررفته شده قابل استخراج و قابل فهم هستند.	در مواردی که هدف از یادگیری، تخمین تابعی با مقادیر پیوسته است، مناسب نیستند.
از ویژگی‌های متفاوت برای نمونه‌های مختلف استفاده می‌شود.	در موارد با تعداد دسته‌های زیاد و نمونه آموزشی کم، احتمال خطا بالاست.
احتیاجی به تخمین تابع توزیع نیست.	تولید درخت تصمیم‌گیری، هزینه محاسباتی بالا دارد.
آماده‌سازی داده‌ها برای یک درخت تصمیم، ساده یا غیرضروری است. (روش‌های دیگر اغلب نیاز به یک‌سازی داده یا حذف مقادیر خالی یا ایجاد متغیرهای پوچ دارند)	هرس کردن درخت هزینه محاسباتی بالایی دارد.
درخت تصمیم یک مدل جعبه سفید است. توصیف شرایط در درختان تصمیم به‌آسانی با منطق بولی امکان پذیر است	در مسائلی که دسته‌ها شفاف نباشند و همپوشانی داشته باشند، خوب عمل نمی‌کنند.
تائید یک مدل در درخت‌های تصمیم با استفاده از آزمون‌های آماری امکان‌پذیر است.	در صورت همپوشانی گره‌ها تعداد گره‌های پایانی زیاد می‌شود.
ساختارهای درخت تصمیم برای تحلیل داده‌های بزرگ در زمان کوتاه مناسب است.	در صورتی که درخت بزرگ باشد امکان است خطاها از سطحی به سطحی دیگر جمع شوند (انباشته شدن خطای لایه‌ها و تاثیر بر روی یکدیگر).
روابط غیرمنتظره یا نامعلوم را می‌یابد.	طراحی درخت تصمیم‌گیری بهینه، دشوار است و کارایی یک درخت دسته‌بندی‌کننده به چگونگی طراحی خوب آن بستگی دارد.
درخت‌های تصمیم قادر به شناسایی تفاوت‌های زیرگروه‌ها هستند.	وقتی تعداد دسته‌ها زیاد است، می‌تواند باعث شود که تعداد گره‌های پایانی بیشتر از تعداد دسته‌های واقعی بوده و بنابراین زمان جستجو و فضای حافظه را افزایش می‌دهد.

¹ Classification and regression trees (CART)

² Quick, unbiased, efficient statistical tree (QUEST)

³ Chi-squared automatic interaction detection (CHAID)

درخت تصمیم یک روش غیرپارامتریک است و نیاز به تنظیم خاصی برای افزایش دقت الگوریتم ندارد.	احتمال تولید روابط نادرست وجود دارد.

در ادامه این بخش به معرفی مختصر الگوریتم‌های مختلف پیاده‌سازی درخت تصمیم پرداخته می‌شود [۸۵].

❖ الگوریتم CART

الگوریتم CART، متغیرهای ورودی را برای یافتن بهترین تجزیه آزمایش می‌کند تا شاخص ناخالصی حاصل از تجزیه کم‌ترین مقدار باشد. درخت تصمیم CART برای اینکه تصمیم بگیرد چگونه گره‌های درخت را انتخاب کند از معیار ناخالصی گینی استفاده می‌کند. در هر تجزیه، دو زیرگروه تعیین می‌شود و هر کدام در مرحله بعد به دو زیرگروه دیگر تقسیم می‌شوند و این روند ادامه می‌یابد تا زمانی که یکی از معیارهای توقف برآورده شود. الگوریتم CART به صورت دودویی است که گره‌های والدین را دقیقاً به گروه فرزند منشعب می‌کند و به طور بازگشتی منشعب کردن را تا زمانی که انشعاب دیگری نتواند ساخته شود ادامه می‌دهد.

❖ الگوریتم QUEST

یک الگوریتم دودویی گسترش درخت است که فقط فیلد خروجی سمبلیک را استفاده می‌کند. در تقسیم داده‌ها به صورت بازگشتی به زیر گروه‌ها، فقط دو زیر گروه را پشتیبانی می‌کند. الگوریتم QUEST یک الگوریتم سریع است که هرس نمودن آن رو به عقب است.

❖ الگوریتم CHAID

الگوریتم CHAID، برای ساخت یک درخت تصمیم‌گیری، داده‌ها به صورت متناوب به زیرمجموعه‌های مشابه افراز می‌شود تا آنجا که هر زیرمجموعه دارای تعدادی مشخصی نمونه باشد. این الگوریتم می‌تواند درختی تولید کند که در برخی از مواقع به صورت غیر دودویی عمل کند، در این حالت از روش جداکردن چندتایی به جای جداکردن دودویی استفاده می‌شود، به همین دلیل گره والد به بیش از دو گره فرزند تقسیم می‌شود. این الگوریتم از آزمون کای ^{۲۱} برای تصمیم‌گیری در هر تقسیم برای مشخص نمودن گره‌های فرزند استفاده می‌کند. سپس شاخه‌های درخت به دست آمده تا تحقق معیار توقف یا رسیدن به سطح پیچیدگی خواسته‌شده، هرس می‌شوند. به عبارت دیگر، الگوریتم CHAID ابتدا تفاوت‌های هر نمونه را با سایر نمونه‌ها بررسی و سپس درخت موردنظر را تولید می‌کند. هرس کردن درخت از طریق یافتن تفاوت‌های مشابه انجام می‌شود.

❖ الگوریتم C5.0

الگوریتم C5.0 یک نوع درخت تصمیم‌گیری تک متغیره و بهبودیافته الگوریتم C4.5 است. این الگوریتم مشابه با الگوریتم CART ابتدا درختی تقریباً پر ایجاد می‌کند؛ ولی راهبرد هرس آن کاملاً متفاوت است. این الگوریتم دسته‌بندی را با تقسیم کردن داده‌ها به زیر مجموعه‌هایی که شامل رکوردهای همگن‌تر از والد خود هستند انجام می‌دهد. در C5.0، تقسیم کردن نمونه‌ها بر اساس فیلدی که بیش‌ترین بهره اطلاعات

¹ Chi-square

را دارد اتفاق می‌افتد. این الگوریتم، روشی افزایشی از هرس نمودن درخت را استفاده می‌کند تا خطای کلاس‌بندی ناشی از نویز خیلی زیاد را در داده‌های آموزشی کاهش دهد. هرس کردن با جایگزینی گره داخلی با گره برگ رخ می‌دهد و لذا درصد خطا کاهش می‌یابد.

❖ الگوریتم ID3

الگوریتم ID3 وظیفه پیدا کردن ویژگی‌هایی دارای اطلاعات زیادتر (Gain بیشتر) را دارد و آن‌ها را در سطوح بالاتری از درخت قرار می‌دهد. هر بار که یک ویژگی در سطحی از درخت انتخاب شد، زیر درخت‌های آن نیز دقیقاً به همان صورت (ویژگی‌هایی با اطلاعات بالا) انتخاب می‌شوند و در سطوح و گره‌های بعدی قرار می‌گیرند. البته وقتی یک گره از درخت انتخاب شد، برای ساختن زیردرخت‌های دیگر، مجموعه داده‌ها بر اساس مقدار گره انتخاب‌شده در شاخه‌های بالاتر، کوچک‌تر می‌شوند و هر چه در درخت پایین‌تر می‌رویم (به برگ‌ها نزدیک‌تر می‌شویم)، مجموعه داده‌ها برای محاسبه مقدار اطلاعات کمتر می‌شوند. لازم به ذکر است Gain که در واقع همان Information Gain است، از آنتروپی در هر مقدار از ویژگی‌ها کمک گرفته و به میزان اطلاعاتی که می‌توان از یک ویژگی (بعد) به دست آورد، گفته می‌شود.

۴-۳-۲- ویژگی‌های درخت رگرسیون و درخت دسته‌بندی

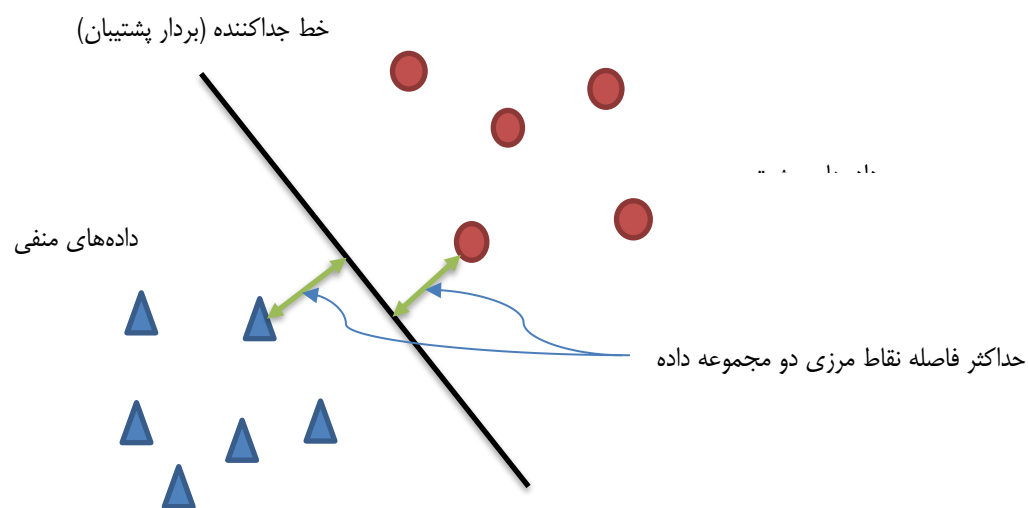
- زمانی که متغیر هدف به صورت پیوسته و عددی باشد، از درخت رگرسیون و زمانی که متغیر هدف به صورت گسسته یا غیر عددی باشد، از درخت تصمیم استفاده می‌شود.
- معیار تقسیم و شاخه زدن در درخت رگرسیون بر اساس معیار خطای عددی است.
- گره‌های برگ در درخت رگرسیون حاوی مقادیر عددی هستند که هر عدد، میانگین مقادیر دسته‌ای است که داده جاری، بیشترین شباهت را با آن‌ها داشته است. اما در درخت تصمیم، مقدار برگ، متناظر با دسته‌ای است که بیشترین تکرار را با شرایط مشابه با داده ارائه‌شده، داشته است.
- هر دو درخت، رویکرد حریصانه بالا به پایین را، تحت عنوان تقسیم باینری بازگشتی دنبال می‌کنند. این روش از بالای درخت، جایی که همه مشاهدات در یک بخش واحد در دسترس هستند شروع می‌شود و سپس تقسیم به دوشاخه انجام‌شده و این روال به صورت پی‌درپی تا پایین درخت ادامه می‌یابد، به همین دلیل این روش بالا به پایین نامیده می‌شود. همچنین به این دلیل این روش را حریصانه می‌گویند که تلاش اصلی در یافتن بهترین متغیر در دسترس برای تقسیم فعلی است و در مورد انشعابات بعدی که به یک درخت بهتر منتهی شود، توجهی نمی‌شود. (به عبارتی همواره بهترین انتخاب در لحظه، بهترین انتخاب در سراسر برنامه نیست و اثرات این تقسیم در تقسیم‌های آینده را در نظر نمی‌گیرد).
- در هر دو نوع درخت، در فرآیند تقسیم این عمل تا رسیدن به معیار تعریف‌شده برای توقف، عملیات ادامه دارد. برای مثال، ما چنین شرطی را وضع نمود که هر زمانی تعداد مشاهدات در هر گره کمتر از ۵۰ شود، عملیات متوقف گردد.
- در هر دو درخت، نتایج فرآیند تقسیم تا رسیدن به معیارهای توقف، باعث رشد درخت می‌شود. اما درخت کاملاً رشد یافته به احتمال زیاد باعث بیش‌برازش داده‌ها (over fit) خواهد شد که در این صورت، شاهد کاهش صحت و دقت بر روی داده‌های آینده که قصد دسته‌بندی آن‌ها را داریم، خواهیم بود. در این زمان هرس کردن را به کار گرفته می‌شود.

۳-۳-۴- ماشین بردار پشتیبان

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان اولیه در سال ۱۹۶۳ توسط Vladimir Vapnik ابداع شد و در سال ۱۹۹۵ توسط Vapnik و Corinna Cortes برای حالت غیرخطی تعمیم داده شد. ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری با نظارت است که از آن برای کلاس‌بندی و

رگرسیون استفاده می‌شود. این روش از جمله روش‌های نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر کارایی خوبی نسبت به روش‌های قدیمی‌تر برای طبقه‌بندی از جمله شبکه‌های عصبی پرسپترون نشان داده است. مبنای کاری ماشین بردار پشتیبان، دسته‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌شود خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد. حل معادله پیدا کردن خط بهینه برای داده‌ها به وسیله روش‌های برنامه‌ریزی مرتبه دوم^۱ که روش‌های شناخته‌شده‌ای در حل مسائل محدودیت‌دار هستند صورت می‌گیرد [۸۶]–[۹۰].

ماشین بردار پشتیبان از یک تکنیک که kernel trick نامیده می‌شود. ماشین بردار پشتیبان، یک دسته‌بند (کلاس‌بند) یا مرزی است که با معیار قرار دادن بردارهای پشتیبان، بهترین دسته بندی و تفکیک بین داده‌ها را مشخص می‌کند. در ساده‌ترین حالت، مطابق شکل ۴–۵، ماشین بردار پشتیبان خطی در واقع یک خط است که دو مجموعه داده‌های مثبت و منفی را از یکدیگر بر اساس معیار حداکثر فاصله داده‌های مرزی دو مجموعه، از یکدیگر جداسازی می‌کند.

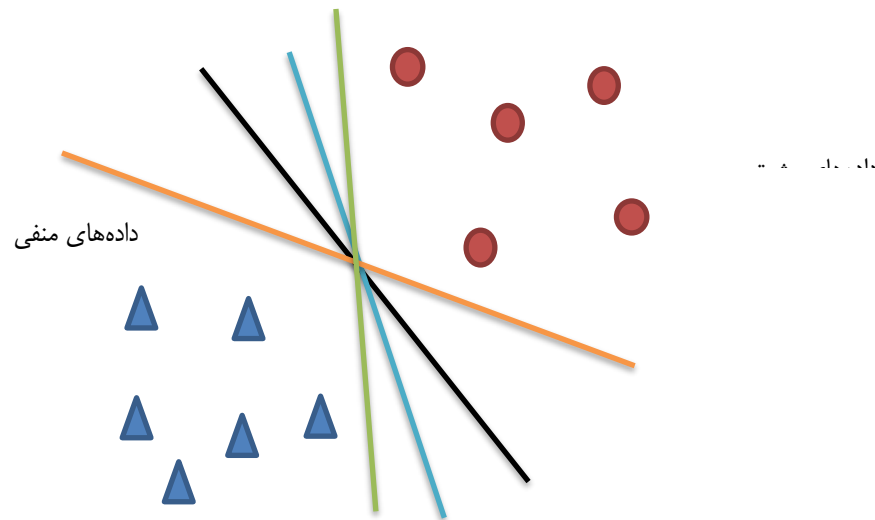


شکل ۴–۵: جداسازی دو مجموعه داده توسط ماشین بردار پشتیبان با استفاده از یک خط (بر صفحه) [۸۶]–[۹۰]

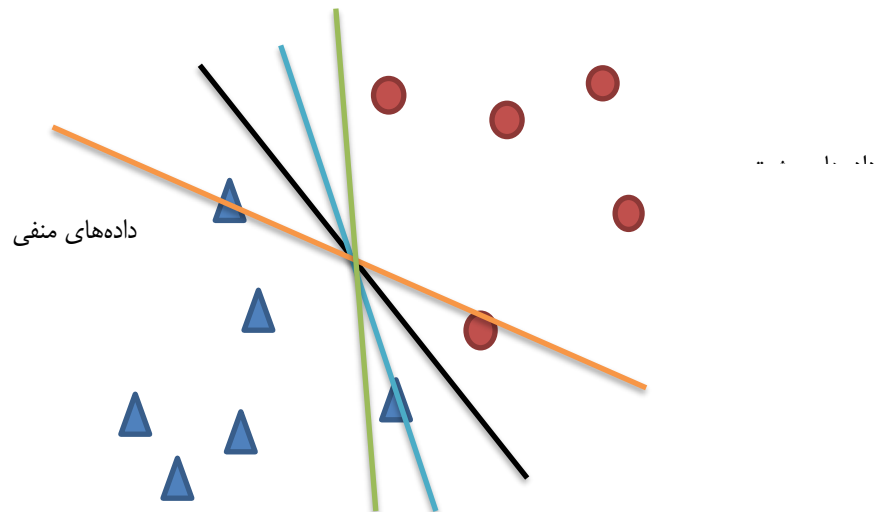
لازم به ذکر است که در حالت کلی این مسئله را می‌توان در فضای n بعدی در نظر گرفت که در آن داده‌ها در دو دسته واقع شده‌اند که این دو دسته به خوبی قابل جداسازی می‌باشند. در این حالت به جای خطوط جداکننده از ابر صفحات جداکننده^۲ استفاده می‌شود. در این حالت، مسلماً بهترین جداکننده خطی (بر صفحه‌ای) است که با وجود مقداری خطا و جابجایی نقاط داده‌های هر یک از گروه‌ها بتواند جدایی را حفظ کند. به عنوان مثال، در شکل ۴–۶ انواع خطوط (بر صفحه‌های) جداکننده دو دسته داده‌های مثبت و منفی دیده می‌شود. اکنون اگر دقت داده‌ها کاهش یابد و یا دارای عدم قطعیت باشند آن‌گاه بهترین خط (بر صفحه)، جداکننده‌ای است که بیشترین حاشیه ریسک را فراهم نماید و بتواند حالت تفکیک‌پذیری داده‌ها را همچنان حفظ نماید. همان‌طور که در شکل ۴–۷ مشاهده می‌شود خط (بر صفحه) مشکی رنگ که از هر دو دسته بیشترین فاصله حاشیه را دارد بهترین جداکننده به نظر می‌رسد، زیرا با جابجایی اندک نقاط دو مجموعه داده‌ها همچنان توانسته حالت تفکیک‌پذیری آن‌ها را حفظ نماید [۸۶]–[۹۰].

¹ Quadratic Programming (QP)

² Hyperplane



شکل ۶-۴: جداسازی داده‌ها توسط خطوط (ابرفضه‌های) مختلف [۸۶]–[۹۰]



شکل ۶-۷: خط (ابرفضه) مشکی بهترین جداکننده [۸۶]–[۹۰]

ماشین‌های بردار پشتیبان در طبقه‌بندی داده‌ها به چند دسته تقسیم می‌شود که عبارتند از:

۱ - ماشین بردار پشتیبان خطی:

الف - داده‌ها در دو دسته جدا از هم قرار گرفته باشند، بدین معنی که داده‌ها جدایی‌پذیر^۱ باشند.

ب - داده‌های دو دسته قابل تفکیک به دو دسته جدا از هم نباشند^۲.

۲- ماشین بردار پشتیبان غیرخطی

^۱ Data Separable

^۲ Data Nonseparable

۳- ماشین بردار پشتیبان برای تفکیک‌کننده‌های چند کلاسه

۴-۳-۱- ماشین بردار پشتیبان در حالت داده‌های جدایی پذیر

ماشین بردار پشتیبان در این حالت ساده‌ترین شکل ممکن خود را دارد. در این حالت فرض می‌شود که مجموعه نمونه‌های آموزشی تفکیک‌پذیر شامل n عضو وجود دارد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$D = \left\{ (x_i, y_i) \mid x_i \in \mathbb{R}^p, y_i \in \{-1, 1\} \right\}_{i=1}^n \quad (4-20)$$

x_i یک بردار p بعدی است و y_i برچسب x_i که برحسب اینکه داده x_i در کدام دسته (کلاس) قرار می‌گیرد، با استفاده از ۱ و -۱ مقداردهی می‌شود. هدف پیدا کردن ابرصفحه جداکننده با بیشترین فاصله از نقاط حاشیه‌ای است که نقاط با $y_i = 1$ را از نقاط با $y_i = -1$ جدا کند. در حالت کلی، یک ابرصفحه جداکننده به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\vec{w} \cdot \vec{x} - b = 0 \quad (4-21)$$

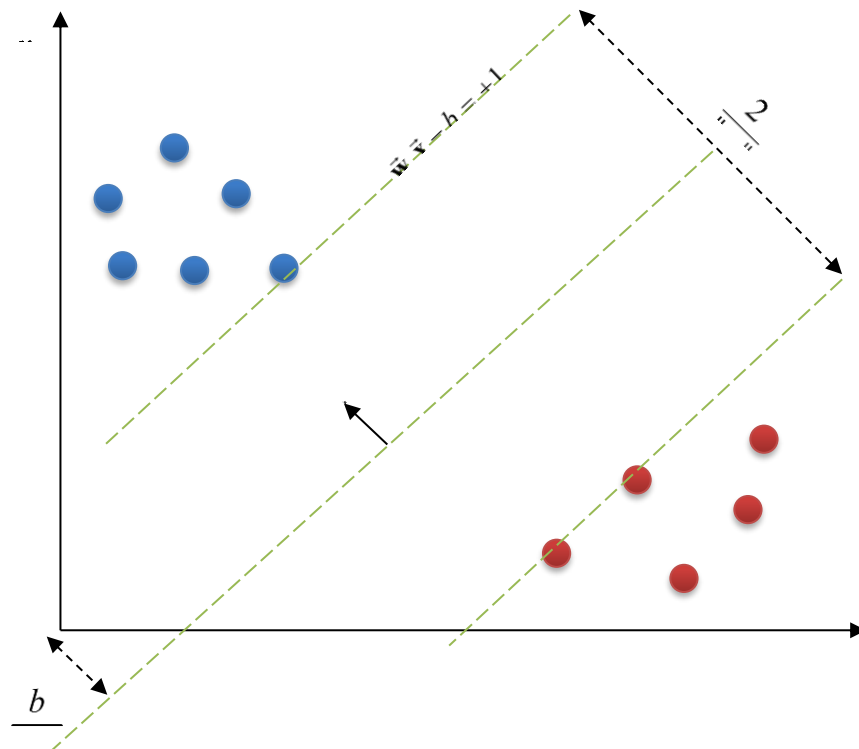
که b مقدار عرض از مبدأ و $\vec{w}$ بردار نرمال است که به ابرصفحه عمود است. هدف این است که $\vec{w}$ و b به گونه‌ای تعیین شوند که بیشترین فاصله بین ابرصفحه‌های موازی که داده‌ها را از هم جدا می‌کنند، ایجاد کند. بدین منظور، جداکننده‌ای است که بیشترین فاصله را با نقاط همسایه از هر دو دسته داده دارد. به فرض تفکیک‌پذیر بودن دو دسته داده مثبت و منفی، دو ابرسطح موازی که مرز جداکننده را تشکیل می‌دهند به صورت زیر نشان داده می‌شوند.

$$\vec{w} \cdot \vec{x} - b = +1 \quad (4-22)$$

$$\vec{w} \cdot \vec{x} - b = -1 \quad (4-23)$$

ناحیه بین این دو ابرصفحه، حاشیه^۱ گفته می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۸-۴ در فضای دوبعدی، بردارهای پشتیبان نشان داده شده است. نزدیکترین داده‌های آموزشی به ابرصفحه‌های جداکننده بردار پشتیبان نامیده می‌شوند. داده‌هایی که بر روی ابرصفحه حاشیه قرار دارند بردارهای پشتیبانی نام دارند.

¹ Margin



شکل ۸-۴: ابرصفحه‌ای با حداکثر حاشیه برای یک ماشین بردار پشتیبانی که با نمونه داده‌های دو دسته تفکیک‌پذیر یادگرفته شده است [۸۶]–[۹۰]

با فرض اینکه داده‌های آموزشی جدایی‌پذیر خطی هستند، می‌توان دو ابر صفحه در حاشیه نقاط به‌طوری که هیچ نقطه مشترکی نداشته باشند، در نظر گرفت و سپس فاصله بین آن‌ها را حداکثر نمود. همان‌طور که در شکل ۸-۴ نشان داده شده است، با استفاده از روابط هندسی، فاصله این دو ابر صفحه برابر $2/\|\vec{w}\|$ است؛ که برای حداکثرسازی آن باید $\|\vec{w}\|$ را کمینه نمود. برای اینکه از ورود نقاط به حاشیه جلوگیری شود و نقاط داده در ناحیه درون مرز قرار نگیرند باید شرایط زیر را در نظر گرفت. شرط **Error! Reference source not found** مربوط به دسته داده آبی رنگ و شرط **Error! Reference source not found** مربوط به دسته داده قرمز رنگ است.

$$\vec{w} \cdot \vec{x}_i - b \geq +1 \quad \text{if} \quad y_i = 1 \quad (4-24)$$

$$\vec{w} \cdot \vec{x}_i - b \leq -1 \quad \text{if} \quad y_i = -1 \quad (4-25)$$

دو رابطه فوق را می‌توان تجمیع نمود و به صورت رابطه **Error! Reference source not found** نوشت:

$$y_i (\vec{w} \cdot \vec{x}_i - b) \geq 1 \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad (4-26)$$

در نهایت مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\begin{aligned} \min_{(\vec{w}, b)} \quad & \|\vec{w}\| \\ \text{s.t.} \quad & \end{aligned} \quad (4-27)$$

$$y_i (\vec{w} \cdot \vec{x}_i - b) \geq 1 \quad \forall 1 \leq i \leq n$$

حل مسأله بهینه‌سازی مقید نشان داده شده در رابطه (۴-۲۷) دشوار است زیرا وابسته به مقدار دقیق $\|\mathbf{w}\|$ است. و به همین دلیل یک مسأله بهینه‌سازی غیرمحدب است که حل آن بسیار مشکل است. لذا می‌توان مسأله را با جایگزینی $\|\mathbf{w}\|^2/2$ به جای $\|\mathbf{w}\|$ بدون اینکه تغییری در جواب مسأله ایجاد شود، حل کرد. با اعمال این تغییر، مسأله از نوع مسائل برنامه‌نویسی درجه دوم^۱ و به شکل رابطه (۴-۲۸) تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است که فاکتور $1/2$ جهت سادگی محاسبات ریاضی استفاده می‌شود.

$$\min_{(\mathbf{w}, b)} \frac{\|\mathbf{w}\|^2}{2} \quad \text{s.t.} \quad (4-28)$$

$$y_i (\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_i - b) \geq 1 \quad \forall 1 \leq i \leq n$$

مسئله فوق را می‌توان با استفاده از ضرایب لاگرانژ $\alpha_i \geq 0$ به صورت زیر بازنویسی کرد و آن را حل نمود.

$$\min_{(\mathbf{w}, b)} \max_{\alpha} \left\{ \frac{\|\mathbf{w}\|^2}{2} - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i (\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_i - b) - 1) \right\} \quad \text{s.t.} \quad (4-29)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad \forall 1 \leq i \leq n$$

نقاط زینی^۲ جواب مسئله بهینه‌سازی رابطه (۴-۲۹) است. از آنجا که مسئله بهینه‌سازی فوق یک مسئله محدب است لذا شرایط KKT^۳ شرایط لازم و کافی برای داشتن پاسخ بهینه برای مسئله بهینه‌سازی فوق است. برای این منظور باید از تابع لاگرانژ $L_{primary}$ که در (۴-۳۰) نشان داده شده است نسبت به متغیرهای $\bar{\mathbf{w}}$ و b مشتق گرفت و سپس آن‌ها برابر صفر قرار داده می‌شود.

$$L_{primary} = \frac{\|\mathbf{w}\|^2}{2} - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i (\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_i - b) - 1) \quad (4-30)$$

مشتقات جزئی عبارتند از:

$$\frac{\partial L_{primary}}{\partial \mathbf{w}} = 0 \rightarrow \bar{\mathbf{w}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \bar{\mathbf{x}}_i \quad (4-31)$$

$$\frac{\partial L_{primary}}{\partial b} = 0 \rightarrow 0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \quad (4-32)$$

تنها تعداد محدودی جواب وجود دارد که شرط **Error! Reference source not found** را با شرایط $\alpha_i > 0$ ارضا می‌نماید. در این حالت، $\bar{\mathbf{x}}_i$ به دست آمده، دقیقاً همان بردار پشتیبان خواهد بود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که بردارهای پشتیبان باید شرط (۴-۳۳) را ارضا نمایند. این شرط اجازه می‌دهد که متغیر b به صورت مناسب محاسبه شود.

$$y_i (\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_i - b) = 1 \quad (4-33)$$

¹ Quadratic programming

² Saddle

³ Tucker-Kuhn-Karush (KKT)

لازم به ذکر است که مسئله بهینه‌سازی (۲۹-۴) را با استفاده از رابطه (۳۱-۴) و رابطه $\|\mathbf{w}\|^2 = \bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{w}}$ می‌توان به فرم ساده‌تر نوشت. در این حالت، دوگان لاگرانژ رابطه **Error! Reference source not found**. به صورت زیر به دست می‌آید.

$$L_{dual} = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\alpha_i \alpha_j y_i y_j (\bar{\mathbf{x}}_i \cdot \bar{\mathbf{x}}_j) \right) \quad (۴-۳۴)$$

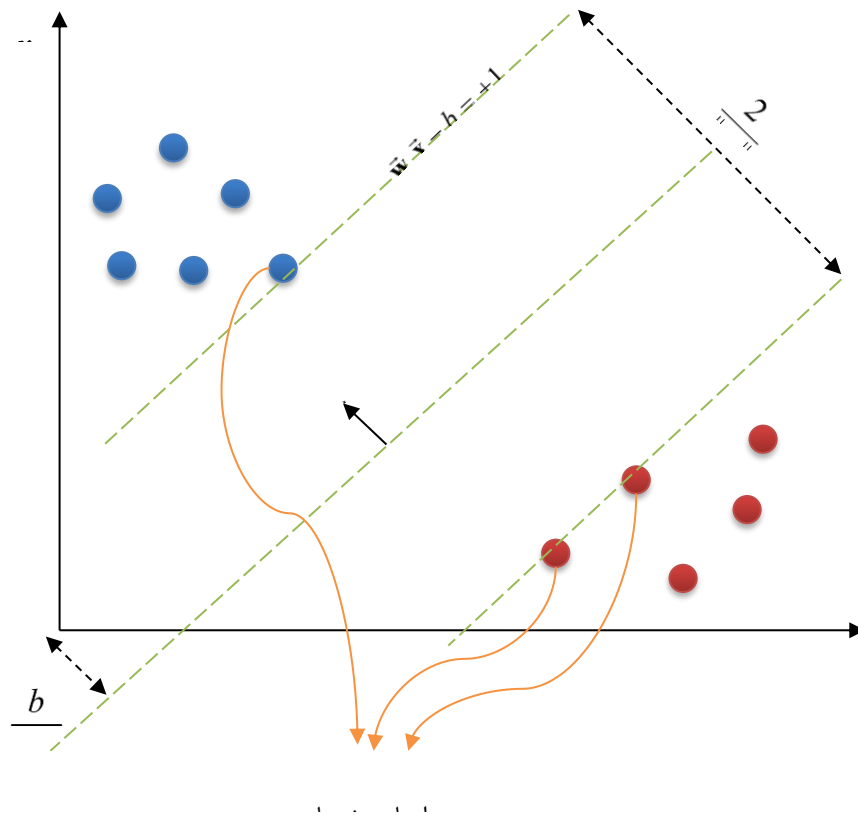
از آنجایی که طبق رابطه (۳۲-۴)، شرط $0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i$ برقرار است، بنابراین تابع لاگرانژ (۳۴-۴) تنها یک تابع از α_i است. با توجه به این توضیحات، مسأله دوگان بهینه‌سازی رابطه (۲۹-۴) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \quad L_{dual} &= \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\alpha_i \alpha_j y_i y_j (\bar{\mathbf{x}}_i \cdot \bar{\mathbf{x}}_j) \right) \\ \text{s.t.} \end{aligned} \quad (۴-۳۵)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad \forall 1 \leq i \leq n$$

حل مسائل بهینه‌سازی رابطه‌های (۲۸-۴)، (۲۹-۴) و (۳۵-۴) به یک جواب خواهند رسید. برای هر نمونه آموزشی $\bar{\mathbf{x}}_i$ یک ضریب لاگرانژ $\alpha_i \geq 0$ وجود دارد. در حل مسأله به نمونه‌هایی که به ازای آن‌ها $\alpha_i > 0$ است، بردارهای پشتیبان گفته می‌شود که بر روی ابرصفحه‌های رابطه‌های (۲۲-۴) و یا (۲۳-۲) قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، بردارهای پشتیبان مسئله کلاس‌بندی شکل ۸-۴، در شکل ۹-۴ نشان داده شده است.



شکل ۹-۴: نمایش بردارهای پشتیبان [۸۶]-[۹۰]

لازم به ذکر است که محاسبه راه‌حل برای مسئله بهینه‌سازی تشریح‌شده مستلزم استفاده از روش‌های عددی است که به ازای حجم زیاد داده‌ها بسیار مشکل و زمان‌بر خواهد بود. همچنین برای عملکرد مقاوم‌تر الگوریتم، مناسب است که برای محاسبه عرض از مبدأ b ، از همه بردارهای پشتیبان استفاده شده و میانگین آن‌ها به عنوان جواب نهایی مطابق رابطه (۴-۳۶) ارائه شود.

$$b = \frac{1}{N_{SV}} \sum_{i=1}^{N_{SV}} (\vec{w} \cdot \vec{x}_i - y_i) \quad (4-36)$$

که N_{SV} تعداد بردارهای پشتیبان است.

۴-۳-۳-۲- ماشین بردار پشتیبان در حالت داده‌های جدایی‌ناپذیر

در این حالت، داده‌ها قابل تفکیک به دو دسته کاملاً جدا از هم نیستند. این حالت به واقعیت نزدیک‌تر است و مسائل واقعی معمولاً از این نوع هستند. این وضعیت با تعریف یک حاشیه نرم^۱ حل می‌شود. در این حالت یک متغیر اضافی به نام متغیر مثبت شناور^۲ به مسئله اضافه می‌شود و قیود (۴-۳۷) و (۴-۳۸) به صورت زیر اصلاح می‌شوند.

$$\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_i - b \geq +1 - \nu_i \quad \text{if} \quad y_i = 1 \quad (4-37)$$

$$\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_i - b \leq -1 + \nu_i \quad \text{if} \quad y_i = -1 \quad (4-38)$$

که $\nu_i \geq 0$ متغیر شناور نام دارد.

دو رابطه فوق را می‌توان تجميع نمود و به صورت رابطه زیر نوشت:

$$y_i (\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_i - b) \geq 1 - \nu_i \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad (4-39)$$

اگر $0 \leq \nu_i \leq 1$ ، آن‌گاه داده‌ها کاملاً تفکیک‌پذیر هستند ولی در یک حاشیه مشخص‌شده توسط متغیر شناور ν_i ، اما اگر $\nu_i \geq 1$ آن‌گاه داده‌ها از یکدیگر تفکیک‌پذیر نخواهند بود.

باتوجه به این اصلاحات، تابع هدف رابطه (۴-۳۸) به صورت $\|\mathbf{w}\|^2/2 + C(\sum_i \nu_i)^k$ اصلاح می‌شود و هدف مسئله بهینه‌سازی، کمینه‌سازی این رابطه است. C ضریب جریمه است که توسط کاربر انتخاب می‌گردد. یک مقدار C بزرگ به معنی اعمال جریمه بیشتر برای خطاها می‌باشد. تابع هدف تعریف‌شده به ازای هر مقدار مثبت از k تابعی محدب است، خصوصاً به ازای $k=1$ و $k=2$ به یک مسئله برنامه‌ریزی مرتبه دوم تبدیل می‌شود.

تابع لاگرانژ اولیه رابطه (۴-۳۰) به صورت زیر گسترش می‌یابد.

$$L_{primary} = \frac{\|\mathbf{w}\|^2}{2} - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i (\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_i - b) - 1 + \nu_i) + C \left(\sum_i \nu_i \right)^k - \sum_i \mu_i \nu_i \quad (4-40)$$

که μ_i ضریب لاگرانژ قید $\nu_i \geq 0$ است.

با اعمال شرایط KKT برای تابع هدف (۴-۴۰) روابط زیر به دست می‌آید. مشتقات جزئی عبارتند از:

$$\frac{\partial L_{primary}}{\partial \mathbf{w}} = 0 \rightarrow \bar{\mathbf{w}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \bar{\mathbf{x}}_i \quad (4-41)$$

$$\frac{\partial L_{primary}}{\partial b} = 0 \rightarrow 0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \quad (4-42)$$

$$\frac{\partial L_{primary}}{\partial \nu_i} = 0 \rightarrow 0 = C - \alpha_i - \mu_i \quad (4-43)$$

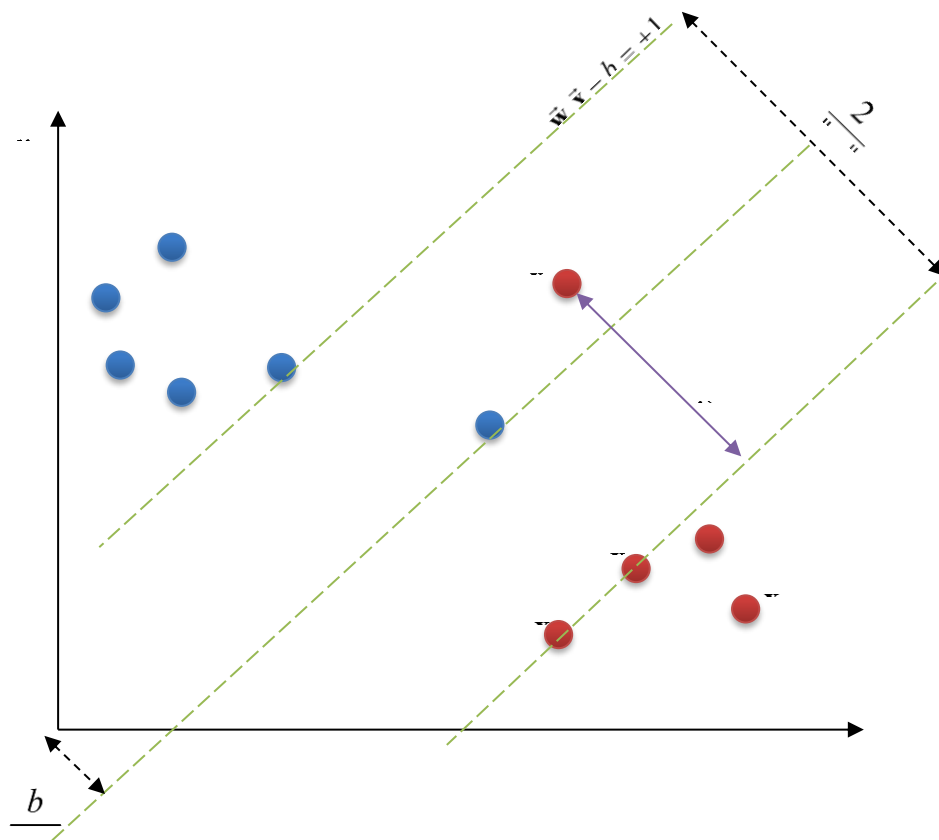
در نهایت با روند مشابه محاسبه تابع هدف دوگان L_{dual} در حالت جدایی‌پذیر، مسئله بهینه‌سازی زیر به دست می‌آید.

¹ Soft margin

² Slack

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \quad & L_{dual} = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\alpha_i \alpha_j y_i y_j (\vec{x}_i \cdot \vec{x}_j) \right) \\ \text{s.t.} \quad & \\ & 0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \\ & 0 \leq \alpha_i \leq C \quad \forall 1 \leq i \leq n \end{aligned} \quad (4-44)$$

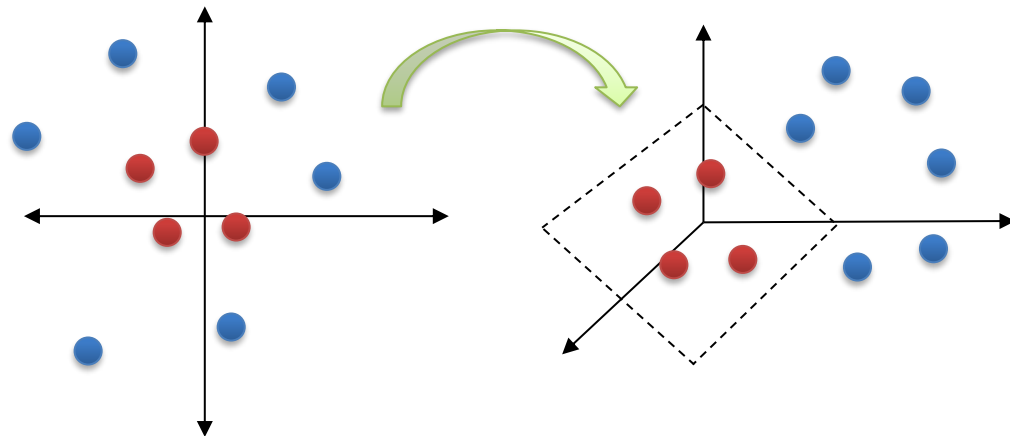
در شکل ۴-۱۰ کلاس‌بندی داده‌های قرمز و آبی در حالت تفکیک‌ناپذیر با استفاده از بردارهای پشتیبان نوشته شده است. داده‌هایی که در ناحیه‌های صحیح قرار گرفته‌اند پارامتر α_i مربوط به آن‌ها برابر صفر است. برای بردارهای پشتیبان مقدار $\alpha_i > 0$ است که بردار $\vec{w}$ را با استفاده از رابطه (۴-۴۱) تعریف می‌کنند. داده‌هایی که برای آن‌ها $0 < \alpha_i < C$ است و بر روی مرز قرار گرفته‌اند، می‌توان از آنها برای محاسبه عرض از مبدأ b استفاده کرد. برای این داده‌ها $\nu_i = 0$ و $y_i(\vec{w} \cdot \vec{x}_i - b) = 1$. داده‌های $\vec{x}_a$ و $\vec{x}_b$ و $\vec{x}_c$ از این نوع هستند که بردارهای پشتیبان نامیده می‌شوند. همانند حالت داده‌های جدایی‌پذیر، در این حالت هم برای عملکرد مقاوم‌تر الگوریتم مناسب است که برای محاسبه عرض از مبدأ b ، از همه بردارهای پشتیبان استفاده شده و میانگین آن‌ها به عنوان جواب نهایی مطابق رابطه (۴-۳۶) ارائه شود. داده‌های $\vec{x}_d$ و $\vec{x}_e$ به طور مناسب تفکیک شده و در ناحیه‌های صحیح و با حاشیه کافی از مرز قرار گرفته‌اند. به همین دلیل برای این داده‌ها $y_d(\vec{w} \cdot \vec{x}_d - b) > 1$ و $y_e(\vec{w} \cdot \vec{x}_e - b) > 1$ است. برای داده $\vec{x}_g$ ، مطابق رابطه $\alpha_d = \alpha_e = 0$ و $0 < \nu_g = 1 - y_g(\vec{w} \cdot \vec{x}_g - b) < 1$ مقدار متغیر شناور بین مقادیر صفر و یک قرار می‌گیرد. اما این داده در حاشیه است و به اندازه کافی از مرز حاشیه دور نیست. برای داده $\vec{x}_f$ ، مطابق رابطه $\nu_f = 1 - y_f(\vec{w} \cdot \vec{x}_f - b) > 1$ مقدار متغیر شناور بزرگ‌تر از ۱ است و لذا این داده کلاس‌بندی اشتباه شده است. همه داده‌ها به جز $\vec{x}_d$ و $\vec{x}_e$ ، بردارهای پشتیبان هستند. برای این داده‌های مقدار $\alpha_d = \alpha_e = 0$ و $\alpha_f = \alpha_g = C$ و $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c < C$.



شکل ۱۰-۴: ماشین‌های بردار پشتیبان در حالت داده‌های جدایی‌ناپذیر [۸۶]–[۹۰]

۴-۳-۳-۳- ماشین بردار پشتیبان غیرخطی

در صورتی که داده‌ها به سادگی از هم تفکیک نشوند، آن‌گاه یک تفکیک‌کننده خطی نمی‌تواند موثر باشد. اما اگر داده‌ها به فضایی با ابعاد بیشتر انتقال داده شوند، می‌توان راه‌حلی برای تفکیک آن‌ها به دست آورد. به عنوان مثال در داده‌های غیرتفکیک‌پذیر در فضای دوبعدی، با استفاده از یک تبدیل غیرخطی به داده‌های تفکیک‌پذیر در فضای سه‌بعدی تبدیل شده‌اند.



شکل ۱۱-۴: تفکیک‌پذیر کردن داده‌ها با انتقال آن‌ها از فضای دوبعدی به فضایی سه بعدی [۸۶]–[۹۰]

همانطور که دیده می‌شود پس این انتقال می‌توان کلاس‌بندی را انجام داد. در حالت‌های خطی، در واقع از حاصلضرب داخلی داده‌های آموزشی در بردارهای پشتیبان برای تشکیل جداکننده خطی به شکل ابرصفحه استفاده شده است. اما در اینجا ابتدا داده‌ها با استفاده از تبدیل غیر خطی Φ به یک فضای اقلیدسی با ابعاد بالاتر که فضای هیلبرت نامیده شده نگاشت می‌شوند و سپس از ضرب داخلی عناصر بدست آمده استفاده می‌شود.

$$\Phi: \mathcal{R}^d \rightarrow H \quad (4-45)$$

در فضای هیلبرت، یک تابع هسته^۱ به فرم کلی زیر تعریف می‌شود:

$$K(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \Phi(\vec{x}_i) \cdot \Phi(\vec{x}_j) \quad (4-46)$$

در الگوریتم یادگیری تنها کافیست که بدون اینکه به طور صریح به Φ اشاره شود، فقط از K استفاده شود. شرایط فوق بیانگر یک کلاس‌بندی خطی ولی در ابعاد بالاتر انجام می‌شود. با این نگاشت و در صورتی که تابع هسته شرایط قضیه Mercer را دارا باشد، هسته مورد استفاده مناسب بوده و داده‌های جدایی‌ناپذیر در فضای اصلی در فضای نگاشته شده، جدایی‌پذیر خواهند بود. برخی از توابع هسته پرکاربرد عبارتند از:

$$K(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = (\vec{x}_i \cdot \vec{x}_j + 1)^p \quad (4-47)$$

$$K(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = e^{\frac{-\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|^2}{2\sigma^2}} \quad (4-48)$$

$$K(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \tanh(\beta \vec{x}_i \cdot \vec{x}_j + \delta) \quad (4-49)$$

در نهایت، به طور مشابه با حالت کلاس‌بندی خطی با داشتن تابع‌های هسته ذکر شده در روابط فوق، دوگان مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر نوشته شده و سپس حل می‌شود.

¹ Kernel function

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \quad & L_{dual} = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i \alpha_j y_i y_j \mathbf{K}(\bar{\mathbf{x}}_i, \bar{\mathbf{x}}_j)) \\ \text{s.t.} \quad & \\ & 0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \\ & 0 \leq \alpha_i \leq C \quad \forall 1 \leq i \leq n \end{aligned} \quad (4-50)$$

۴-۳-۳-۴- ماشین‌های بردار پشتیبان تفکیک‌کننده‌های چند کلاسه

در دنیای واقعی بسیاری از مسائل شامل دسته‌بندی‌های چند کلاسه هستند و فقط به دسته‌بندی‌های دودویی محدود نمی‌شود. راه‌حل‌های مختلفی برای این دسته ارائه شده است. عموماً برای این دسته از کلاس‌بندی‌ها از ترکیبی از روش‌های دودویی استفاده می‌شود. یک روش ساده دیگر روش «یکی در مقابل بقیه»^۱ می‌باشد، بدین معنی که در این روش یک دسته به عنوان داده‌های مثبت و بقیه دسته داده‌ها به عنوان منفی فرض می‌شوند.

۴-۳-۳-۵- مزایا و معایب الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

❖ مزایای ماشین بردار پشتیبان [۸۶]، [۹۱]

۱. حاشیه جداسازی برای دسته‌های مختلف کاملاً واضح است.
۲. در فضاها با ابعاد بالاتر کارایی بیشتری دارد.
۳. در شرایطی که تعداد ابعاد بیش از تعداد نمونه‌ها باشد نیز کار می‌کند.
۴. یک زیر مجموعه از نقاط تمرینی را در تابع تصمیم‌گیری استفاده می‌کند (که به آن‌ها بردارهای پشتیبان گفته می‌شود)، بنابراین در مصرف حافظه نیز به صورت بهینه عمل می‌کند.

❖ نقاط ضعف ماشین بردار پشتیبان [۸۶]، [۹۱]

۱. این نوع الگوریتم‌ها، محدودیت‌های ذاتی دارند. مثلاً هنوز مشخص نشده است که به ازای یک تابع نگاشت، پارامترها را چگونه باید تعیین کرد.
۲. ماشین‌های مبتنی بر بردار پشتیبان به محاسبات پیچیده و زمان بر نیاز دارند و به دلیل پیچیدگی محاسباتی، حافظه زیادی نیز مصرف می‌کنند.
۳. داده‌های گسسته و غیر عددی هم با این روش سازگار نیستند و باید تبدیل شوند.

¹ One-versus-rest classifiers

۴-۳-۴- کلاس‌بند بیز

روش بیز روشی برای کلاس‌بندی پدیده‌ها، بر پایه احتمال وقوع یا عدم وقوع یک پدیده است. در طبقه‌بندی، از قانون بیز برای محاسبه احتمالات کلاس‌ها استفاده می‌شود. به طور کلی هدف این است که چگونه می‌توان تصمیمات منطقی را در میان اقدامات متعدد اتخاذ کرد تا ریسک مورد انتظار را به حداقل رساند. اصول این دسته‌بند براساس قضیه بیز است [۹۲]–[۹۵].

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (۴-۵۱)$$

با استفاده از قضیه بیز می‌توان احتمال وقوع اتفاق A را در صورت رخداد B در نظر گرفت. در اینجا، B شواهد و A فرضیه است. فرض این است که فرضیات/مشخصه‌ها مستقل باشند. وجود یک ویژگی خاص بر دیگری تاثیر نمی‌گذارد. به همین خاطر بیز ساده نامیده می‌شود. در حوزه یادگیری ماشین، تکنیک و روش دسته‌بندی بیز ساده^۱ «با به کارگیری قضیه بیز و فرض استقلال بین متغیرها، به عنوان عضوی از خانواده دسته‌بندی‌های مبتنی بر احتمال^۲ قرار می‌گیرد. در سال‌های ۱۹۶۰ تحقیق و بررسی‌های زیادی پیرامون بیز ساده به خصوص در زمینه بازیابی متن^۳ صورت گرفت و حتی امروز هم به عنوان ابزاری برای دسته‌بندی متن^۴ برای حل مسائلی مانند تشخیص هرزنامه‌ها به کار می‌رود. معمولاً این کار به کمک برآورد تابع احتمال و از طریق فراوانی یا فراوانی نسبی کلمات در اسناد متنی صورت می‌گیرد. به این ترتیب به کمک حداکثرسازی تابع درست‌نمایی، برآورد پارامترهای مدل میسر می‌شود. در حوزه آمار و دانش رایانه، مدل بیز ساده با نام‌های دیگری نظیر بیز ساده و بیز مستقل نیز شناخته می‌شود که در بسیاری از حوزه‌های دیگر نیز کاربرد دارد.

بسیاری از روش‌های به کار گرفته شده در یادگیری ماشین، از تکنیک‌های آماری بهره می‌برند. دسته‌بند بیز ساده نیز همان‌طور که از اسمش بر می‌آید از این قاعده مستثنی نیست. هر چند که تکنیک دسته‌بند بیز ساده از قضیه بیز به منظور تفکیک احتمالات استفاده می‌کند ولی نمی‌توان آن را یک استنباط بیزی در نظر گرفت.

براساس ویژگی‌های ذاتی احتمال (به ویژه اشتراک احتمال) دسته‌بندی بیز ساده با دریافت تمرین اولیه نتایج خوبی ارائه خواهد کرد. برای نمونه یک میوه ممکن است پرتغال باشد. اگر نارنجی و کروی با شعاع حدود ده سانتی‌متر باشد. اگر این احتمالات به درستی به همدیگر وابسته باشند آن‌گاه روش بیز ساده در تشخیص اینکه این میوه پرتغال است یا نه بدرستی عمل خواهد کرد. برنامه‌های کاربردی بسیاری هستند که پارامترهای دسته‌بندی بیز ساده را تخمین می‌زنند، بنابراین افراد بدون سروکار داشتن با تئوری بیز می‌توانند از این امکان به منظور حل مسایل مورد نظر بهره ببرند. با وجود مسایل طراحی و پیش فرض‌هایی که در خصوص روش بیز وجود دارد، این روش برای طبقه‌بندی کردن بیشتر مسایل در جهان واقعی، مناسب است.

برای به کارگیری دسته‌بند بیز ساده، الگوریتم یکتایی وجود ندارد در عوض خانواده‌ای از الگوریتم‌ها موجود است که با فرض استقلال ویژگی‌ها یا متغیرها نسبت به یکدیگر عمل می‌کنند. برای مثال اندازه یک میوه و رنگ آن که متغیرها مستقل در نظر گرفته می‌شوند، در تعیین نوع آن می‌توانند موثر باشند. بنابراین اگر میوه‌ای با رنگ قرمز و دارای اندازه حدود ۱۰ سانتی‌متر باشد، با احتمال زیاد سیب است.

¹ Naive Bayes Classifiers

² Probabilistic Classifiers

³ Text Retrieval

⁴ Text Categorization

در بیشتر تکنیک‌ها و مدل‌های بیز ساده از روش حداکثرسازی تابع درست‌نمایی استفاده می‌شود. هرچند تکنیک دسته‌بند بیز ساده دارای فرضیات محدود و قابل دسترس است ولی به خوبی می‌تواند از عهده حل مسائل واقعی برآید. یکی از مزایای قابل توجه در دسته‌بند بیز ساده، امکان برآورد پارامترهای مدل با اندازه نمونه کوچک به عنوان مجموعه داده آموزشی^۱ است.

بیز ساده را می‌توان یک مدل بر مبنای احتمال شرطی در نظر گرفت. با فرض اینکه $X=(x_1, \dots, x_n)$ برداری از n ویژگی را بیان کند که به صورت متغیرهای مستقل هستند. به این ترتیب می‌توان احتمال رخداد C_k یعنی $p(C_k | x_1, x_2, \dots, x_n)$ را به عنوان یکی از حالت‌های کلاس رخدادهای مختلف به ازاء k های متفاوت، به شکل زیر نمایش داد [۹۲]–[۹۵].

$$p(C_k | X) = \frac{p(C_k)p(X | C_k)}{p(X)} \quad (4-52)$$

همان‌طور که دیده می‌شود رابطه بالا همان قضیه بیز است.

قضیه بیز را براساس احتمالات پیشامدهای پیشین^۲، پسین^۳، درست‌نمایی^۴ و شواهد^۵ در رابطه زیر بازنویسی می‌شود.

$$posterior = \frac{prior \times likelihood}{evidence} \quad (4-53)$$

به این ترتیب برای محاسبه احتمال $p(C_k | x_1, \dots, x_n)$ کافی است از احتمال توام^۶ کمک گرفته شود و به کمک احتمال شرطی با توجه به استقلال متغیرها، آن را ساده کرد.

$$\begin{aligned} p(C_k, x_1, \dots, x_n) &= p(x_1, \dots, x_n, C_k) \\ &= p(x_1 | x_2, \dots, x_n, C_k) p(x_2, \dots, x_n, C_k) \\ &= p(x_1 | x_2, \dots, x_n, C_k) p(x_2 | x_3, \dots, x_n, C_k) p(x_3, \dots, x_n, C_k) \\ &= \dots \\ &= p(x_1 | x_2, \dots, x_n, C_k) p(x_2 | x_3, \dots, x_n, C_k) \dots p(x_{n-1} | x_n, C_k) p(x_n | C_k) p(C_k) \end{aligned} \quad (4-54)$$

با فرض استقلال مولفه‌ها یا ویژگی‌های x_i ها از یکدیگر می‌توان احتمالات را به شکل ساده‌تری نوشت. کافی است رابطه زیر در نظر گرفته شود.

$$p(x_i | x_{i+1}, \dots, x_n, C_k) \approx p(x_i | C_k) \quad (4-55)$$

به این ترتیب احتمال توام را به صورت حاصلضرب احتمال شرطی می‌توان نوشت.

¹ Training Data

² Prior

³ Posterior

⁴ Likelihood

⁵ Evidence

⁶ Joint Probability

$$\begin{aligned}
 p(C_k | x_1, \dots, x_n) &\propto p(C_k, x_1, \dots, x_n) \\
 &\approx p(C_k) p(x_1 | C_k) p(x_2 | C_k) p(x_3 | C_k) \dots \quad (4-56) \\
 &= p(C_k) \prod_{i=1}^n p(x_i | C_k)
 \end{aligned}$$

در رابطه فوق مخرج کسر در همه محاسبات یکسان و ثابت است در نتیجه می‌توان احتمال شرطی را متناسب با احتمال توام در نظر گرفت. در رابطه بالا این تناسب را با علامت $\propto$ نشان داده شده است.

با توجه به نکته گفته شده، و رابطه (۴-۵۶) می‌توان احتمال شرطی معرفی شده در رابطه (۴-۵۴) را به صورت زیر بدست آورد. در نتیجه احتمال تعلق یک مشاهده به دسته یا گروه C_k با توجه به مشاهدات X مطابق با رابطه زیر مشخص خواهد شد.

$$p(C_k | x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{Z} p(C_k) \prod_{i=1}^n p(x_i | C_k) \quad (4-57)$$

$$Z = p(x) = \sum_k p(C_k) p(x | C_k)$$

در اینجا احتمال شواهد (مشاهدات) به صورت

در اینجا احتمال شواهد (مشاهدات) به صورت

شواهد و مشاهدات $x_1, \dots, x_n$ وابسته است.

۴-۳-۱- ساخت کلاس‌بند براساس مدل احتمالاتی

در این بخش می‌توان به کمک قواعد تصمیم^۱، کلاس‌بند بیز را ایجاد و کامل کرد. یکی از اساسی‌ترین قواعد تصمیم، انتخاب فرضیه محتمل‌تر است. به این ترتیب از بین تصمیمات مختلف، آن عملی انتخاب می‌شود که براساس شواهد جمع‌آوری شده، بیشترین احتمال رخداد را دارد. این قاعده را حداکثر پسین (MP)^۲ می‌نامند. به این ترتیب دسته‌بند بیز را می‌توان به صورت تابعی از تصمیمات C_k در نظر گرفت که به وسیله تابع $\hat{y}$ تخمین زده می‌شود. حداکثرسازی این تابع به صورت زیر نشان داده می‌شود [۹۲]-[۹۵].

$$\hat{y} = \max_{k \in \{1, \dots, K\}} p(C_k) \prod_{i=1}^n p(x_i | C_k) \quad (4-58)$$

در نتیجه با توجه به توزیع‌های مختلفی که ممکن است نمونه تصادفی داشته باشد (نمونه از آن جامعه آمده باشد) یعنی $p(x_i | C_k)$ می‌توان

پارامترها را محاسبه کرد.

❖ کلاس‌بند بیز ساده گاوسی^۳

اگر مشاهدات و داده‌ها از نوع پیوسته باشند، از مدل احتمالی با توزیع گاوسی برای متغیرهای مربوط به شواهد می‌توان استفاده کرد. در این حالت هر دسته یا گروه دارای توزیع گاوسی است. به این ترتیب اگر k دسته یا کلاس وجود داشته باشد، آن‌گاه می‌توان برای هر دسته میانگین

¹ Decision rule

² Maximum posterior (MP)

³ Gaussian naive bayes

و واریانس را محاسبه کرده و پارامترهای توزیع گاوسی را برای آن‌ها برآورد کرد. μ_k میانگین و σ_k^2 واریانس دسته k / m یعنی C_k باشد. همچنین v مشاهدات حاصل از متغیرهای تصادفی X است. از آنجایی که توزیع X در هر دسته به صورت گاوسی فرض شده است، بنابراین [۹۲]–[۹۵]:

$$p(x = v | C_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}} e^{-\frac{(v-\mu_k)^2}{2\sigma_k^2}} \quad (۴-۵۹)$$

❖ کلاس‌بند بیز ساده چندجمله‌ای^۱

بیز ساده چندجمله‌ای، به عنوان یک کلاس‌بند متنی بسیار کاربرد دارد. در این حالت برحسب مدل احتمالی یا توزیع چندجمله‌ای، برداری از n ویژگی برای یک مشاهده به صورت $X = (x_1, \dots, x_n)$ با احتمالات $(p_1, \dots, p_n)$ در نظر گرفته می‌شود. مشخص است که در این حالت بردار X بیانگر تعداد مشاهداتی است که ویژگی خاصی را دارا هستند. به این ترتیب تابع درست‌نمایی در چنین مدلی به شکل زیر نوشته می‌شود [۹۲]–[۹۵].

$$p(X | C_k) = \frac{(\sum_i x_i)!}{\prod_i x_i!} \prod_i p_{ki}^{x_i} \quad (۴-۶۰)$$

اگر مدل بیز ساده براساس لگاریتم تابع درست‌نمایی نوشته شود، به صورت یک کلاس‌بند خطی درخواهد آمد.

$$\begin{aligned} \log p(C_k | X) &\propto \log \left(p(C_k) \prod_{i=1}^n p_{ki}^{x_i} \right) \\ &= \log p(C_k) + \sum_{i=1}^n x_i \cdot \log p_{ki} \\ &= b + W_k^T X \end{aligned} \quad (۴-۶۱)$$

که:

$$b = \log p(C_k) \quad (۴-۶۲)$$

$$W_k^T = [w_{k1} \quad \dots \quad w_{kn}]^T = [\log p_{k1} \quad \dots \quad \log p_{kn}]^T \quad (۴-۶۳)$$

❖ کلاس‌بند بیز ساده برنولی^۲

این نوع از کلاس‌بند بیز بیشترین کاربرد را در دسته‌بندی متن‌های کوتاه داشته، به همین دلیل محبوبیت بیشتری نیز دارد. در این مدل در حالت چند متغیره، فرض بر این است که وجود یا ناموجود بودن یک ویژگی در نظر گرفته شود. برای مثال با توجه به یک لغت‌نامه مربوط به اصطلاحات ورزشی، متن دلخواهی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و بررسی می‌شود که آیا کلمات مربوط به لغت‌نامه ورزشی در متن وجود دارند یا خیر. به این ترتیب مدل تابع درست‌نمایی متن براساس کلاس‌های مختلف C_k به شکل زیر نوشته می‌شود [۹۲]–[۹۵].

^۱ Multinomial Naive Bayes

^۲ Bernoulli Naive Bayes

$$p(X|C_k) = \prod_{i=1}^n p_{ki}^{x_i} (1 - p_{ki})^{(1-x_i)} \quad (4-64)$$

منظور از p_{ki} احتمال تولید مشاهده x_i از کلاس C_k است. با توجه به استقلال مشاهدات، تابع درست‌نمایی به صورت حاصلضرب نوشته شده است.

۱-۱-۱-۱ مزایا و معایب

- مزایای کلاس‌بند بیز ساده [۹۲]–[۹۵]
- کلاس‌بند کردن داده‌های آزمایشی آسان و سریع است. همچنین زمانی که تعداد دسته‌ها از دو بیشتر باشد نیز عملکرد خوبی از خودش نشان می‌دهد.
- تا زمانی که شرط مستقل بودن برقرار باشد، یک کلاس‌بند بیز ساده عملکرد بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد و به حجم آموزش کمی نیاز دارد.
- در حالتی که ورودی‌ها کلاس‌بندی شده باشند این روش عملکرد بهتری نسبت به حالتی دارد که ورودی‌های عدد باشند. برای حالتی که ورودی عدد باشد معمولاً فرض می‌شود که از توزیع گاوسی پیروی می‌کنند. (که فرض قوی‌ای است)
- پیاده‌سازی کلاس‌بند بیز ساده فرآیندی آسان دارد.
- معایب کلاس‌بند بیز ساده [۹۲]–[۹۵]
- نیازمند فرض استقلال مشاهدات است که در اغلب مسائل واقعی این فرض چندان درست نمی‌باشد و تقریباً غیر ممکن است.
- در صورتی که ورودی‌ها دسته‌بندی شده باشد و در مرحله یادگیری کلاسی وجود داشته باشد که کلاس‌بند هیچ داده‌ای از آن دسته مشاهده نکرده باشد، کلاس‌بند احتمالی برابر صفر برای آن دسته در نظر می‌گیرد و قادر به کلاس‌بندی نخواهد بود.

۵-۳-۴- تکنیک رگرسیون منطقی

این الگوریتم یکی از محبوب‌ترین الگوریتم‌های طبقه‌بندی است که بیشتر برای مسایل طبقه‌بندی دو حالت (دودویی) استفاده می‌شود. رگرسیون منطقی را می‌توان به عنوان مدل خطی تعمیم‌یافته‌ای که از تابع لوجیت^۱ به عنوان تابع پیوند استفاده می‌کند و خطایش از توزیع چندجمله‌ای پیروی می‌کند، به حساب آورد. منظور از دو حالت بودن، رخداد یک واقعه تصادفی در دو موقعیت ممکن است. به عنوان مثال خرید یا عدم خرید، ثبت نام یا عدم ثبت نام، ورشکسته شدن یا ورشکسته نشدن و ... متغیرهایی هستند که فقط دارای دو موقعیت هستند و مجموع احتمال هر یک آن‌ها در نهایت یک خواهد شد. کاربرد این روش عمدتاً در ابتدای ظهور در مورد کاربردهای پزشکی برای احتمال وقوع یک بیماری مورد استفاده قرار می‌گرفت. اما امروزه در تمام زمینه‌های علمی کاربرد وسیعی یافته است. رگرسیون منطقی زمانی استفاده می‌شود که متغیر وابسته (هدف) قطعی باشد [۹۶]–[۹۹].

رگرسیون منطقی می‌تواند یک مورد خاص از مدل خطی عمومی و رگرسیون خطی فرض نمود. مدل رگرسیون منطقی، بر اساس فرض‌های کاملاً متفاوتی (درباره رابطه متغیرهای وابسته و مستقل) از رگرسیون خطی است. تفاوت مهم رگرسیون منطقی نسبت به رگرسیون خطی عبارت است از:

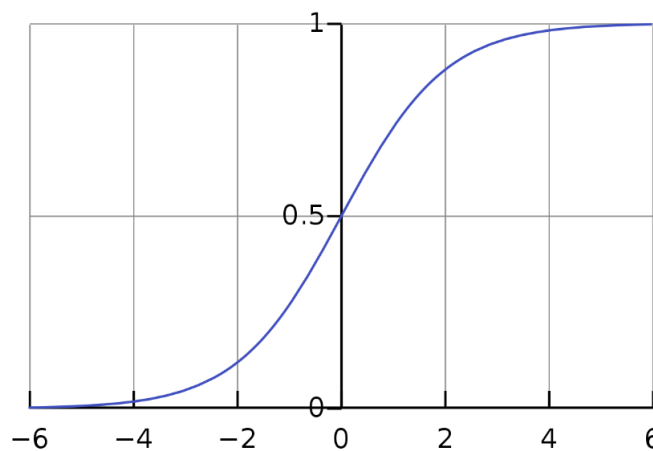
¹ Logit

• در رگرسیون منطقی توزیع شرطی $y|\bar{x}$ یک توزیع برنولی به جای یک توزیع گاوسی رگرسیون خطی است، زیرا متغیر وابسته دو حالت است.

• مقادیر پیش‌بینی احتمالاتی است و محدود بین بازه صفر و یک و به کمک تابع توزیع منطقی به دست می‌آید.

رگرسیون منطقی را می‌توان توسط تابع منطقی تعریف کرد. دامنه این تابع اعداد حقیقی هستند و بُرد این تابع بین صفر و یک می‌باشد. رابطه این تابع در زیر نوشته شده و منحنی آن در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است.

$$\sigma(t) = \frac{e^t}{1+e^t} = \frac{1}{1+e^{-t}} \quad (۴-۶۵)$$



شکل ۱۲-۴: تابع منطقی استاندارد [۹۶]-[۹۹]

در صورتی که t یک ترکیب خطی از x_i باشد آن‌گاه رگرسیون منطقی به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$p = \Pr(y_i = 1 | \bar{x}_i, \bar{\beta}_i) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 \bar{x}_{1,i} + \dots + \beta_k \bar{x}_{k,i}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 \bar{x}_{1,i} + \dots + \beta_k \bar{x}_{k,i}}} \quad i = 1, \dots, n \quad (۴-۶۶)$$

x_i متغیری است که وقوع یا عدم وقوع در i امین اتفاق و p احتمال وقوع را نشان می‌دهد.

به منظور برآورد پارامترهای این مدل، می‌توان از تبدیل لوجیت استفاده کرد. تابع لوجیت عدد حقیقی p بین صفر و یک که در رابطه آن در

Error! Reference source not found نوشته شده است. به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{logit}(p) &= \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \log\left(\frac{\frac{e^{\beta_0 + \beta_1 \bar{x}_{1,i} + \dots + \beta_k \bar{x}_{k,i}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 \bar{x}_{1,i} + \dots + \beta_k \bar{x}_{k,i}}}}{1 - \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 \bar{x}_{1,i} + \dots + \beta_k \bar{x}_{k,i}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 \bar{x}_{1,i} + \dots + \beta_k \bar{x}_{k,i}}}}\right) = \log\left(e^{\beta_0 + \beta_1 \bar{x}_{1,i} + \dots + \beta_k \bar{x}_{k,i}}\right) \quad (۴-۶۷) \\ &= \beta_0 + \beta_1 \bar{x}_{1,i} + \dots + \beta_k \bar{x}_{k,i} \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

برای بدست آوردن پارامترهای بهینه $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ می‌توان از روش «برآورد درست نمایی بیشینه»^۱ استفاده کرد. با این کار یک دستگاه معادلات حاصل می‌شود که متاسفانه برای حل آن روش تحلیلی وجود ندارد و باید به کمک روش‌های عددی برآورد را انجام داد.

۴-۳-۵- مزایا و معایب

- ❖ مزایای استفاده از رگرسیون لجستیک
 - استفاده از رگرسیون لجستیک به ویژه زمانی که با پایگاه داده‌های بسیار بزرگ است، بسیار مناسب است.
 - در وضعیت‌هایی که متغیرهای مستقل از یک قاعده منظم و کلی پیروی نکرده و مفروضات مدل‌های عمومی را نقض می‌کنند، بسیار مفید خواهد بود.
- ❖ معایب استفاده از رگرسیون لجستیک
 - برای دستیابی به نتایج استوار و پایا و معنی‌دار به حجم داده‌هایی بیش از آنچه در رگرسیون خطی معمولی یا تحلیل تشخیص مواجه هستیم، نیاز است.
 - متغیر پاسخ در یک مدل رگرسیون لجستیک به صورت دو حالتی است. در حالی که در تکنیک‌های رگرسیون خطی، متغیر پاسخ یک ساختار پیوسته بی‌کران را شامل می‌شود.

۴-۴- رگرسیون

روش‌های رگرسیون نیز از تکنیک‌های معمول برای پیش‌بینی مقدار «متغیر پاسخ»^۲ براساس مقدار «متغیرهای توصیفی»^۳ است. لازم به ذکر است که متغیر پاسخ را هم «متغیر وابسته»^۴ و متغیرهای توصیفی را هم «متغیرهای مستقل»^۵ می‌نامند. در مدل‌های آماری، تحلیل رگرسیون یا تحلیل ارتباط یک فرآیند آماری برای تخمین روابط بین متغیرها می‌باشد. این روش شامل تکنیک‌های زیادی برای مدل‌سازی و تحلیل متغیرهای خاص و منحصر بفرد، با تمرکز بر رابطه بین متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل می‌باشد. تحلیل رگرسیون در فهم اینکه چگونه مقدار متغیر وابسته با تغییر هر کدام از متغیرهای مستقل و با ثابت بودن دیگر متغیرهای مستقل تغییر می‌کند کمک شایانی می‌کند. متداول‌ترین مدل‌های رگرسیون عبارتند از:

- رگرسیون منطقی
- رگرسیون خطی^۶
- رگرسیون چندجمله‌ای^۷

¹ Maximum likelihood estimation

² Response

³ Explanatory

⁴ Dependent variable

⁵ Independent variable

⁶ Linear regression

⁷ Polynomial regression

رگرسیون منطقی هنگامی استفاده می‌شود که متغیر پاسخ دسته‌ای باشد. ایده رگرسیون منطقی پیدا کردن رابطه بین ویژگی و احتمال یک خروجی خاص است. از آنجایی که این مدل رگرسیون در طبقه‌بندی مسائل کاربرد دارد به همین دلیل در ذیل روش‌های طبقه‌بند با نظارت معرفی در بخش ۳-۴-۵ معرفی گردیده است. اما رگرسیون خطی و چندجمله‌ای نوعی تابع پیش‌بینی‌کننده خطی است که در آن متغیر وابسته، متغیری که قرار است پیش‌بینی شود، به صورت ترکیبی خطی از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌شود، بدین معنی که هر کدام از متغیرهای مستقل در ضریبی که در فرآیند تخمین برای آن متغیر به دست آمده ضرب می‌شود؛ جواب نهائی مجموع حاصل ضرب‌ها به علاوه یک مقدار ثابت خواهد بود که آن هم در فرآیند تخمین به دست آمده است.

۴-۴-۱- رگرسیون خطی ساده

رگرسیون خطی ساده میزان اثر یک متغیر مستقل بر یک متغیر وابسته را می‌سنجد و همبستگی رابطه بین آن‌ها را مورد سنجش قرار می‌دهد. مدل خطی در رگرسیون ساده با n نقطه به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۰۰]–[۱۰۴]:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (4-68)$$

x_i متغیر مستقل و β_1 و β_0 ضرایب رگرسیون خطی و y_i متغیر وابسته است. ε_i مقدار خطای مدل و i شماره هر مشاهده را نشان می‌دهد. در مدل رگرسیون خطی، β_0 مقدار عرض از مبدأ و β_1 شیب خط مدل (ضریب متغیر مستقل) را هستند. شیب خط در حالت رگرسیون خطی ساده، نشان می‌دهد که میزان حساسیت متغیر وابسته به متغیر مستقل چقدر است. به این معنی که متوجه می‌شویم با افزایش یک واحد به مقدار متغیر مستقل چه میزان متغیر وابسته تغییر خواهد کرد. عرض از مبدأ نیز بیانگر مقداری از متغیر وابسته است که به ازاء صفر بودن مقدار متغیر مستقل محاسبه می‌شود. به شکل دیگر می‌توان مقدار ثابت یا عرض از مبدأ را مقدار متوسط متغیر وابسته به ازاء حذف متغیر مستقل در نظر گرفت.

برای تخمین مدل رگرسیون خطی باید سه پارامتر تخمین زده بشوند: ضرایب‌های β_1 و β_0 و ε_i . روش رایج برای به دست آوردن پارامترها، روش کمترین مربعات خطا است. در این روش پارامترها را با کمینه کردن مجموع مربعات خطا به دست می‌آورند. مطابق رابطه (۴-۶۹) خطا برابر تفاوت بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده برای متغیر پاسخ یا متغیر وابسته است.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4-69)$$

بر این اساس، برآورد پارامترهای مدل خطی به صورت زیر است:

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\text{var}(x)} \quad (4-70)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (4-71)$$

که $\bar{x}$ و $\bar{y}$ به ترتیب مقادیر میانگین متغیر مستقل و متغیر وابسته هستند.

۲-۴-۴- رگرسیون چندجمله‌ای

گاهی می‌توان یک مدل غیرخطی بین متغیرهای توصیفی و پاسخ را به صورت یک چند جمله‌ای درجه k تعیین کرد. مدل رگرسیونی چند جمله‌ای در چنین مواقعی می‌تواند رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته را به خوبی بیان کند. برای بالابردن دقت رگرسیون، هر چه تعداد نقاط بیشتر باشد، درجه منحنی یا چند جمله‌ای که از آن نقاط بگذرد، بیشتر خواهد شد [۱۰۵]، [۱۰۶]. تابع چند جمله‌ای مرتبه k در رگرسیون چندجمله‌ای با n نقطه به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_k x_i^k + \varepsilon_i \quad i=1, \dots, n \quad (4-72)$$

رگرسیون چندجمله‌ای سعی دارد با استفاده از تعداد متغیرهای بسیار کمتر از تعداد نقطه‌ها، پارامترهای چندجمله‌ای رگرسیون را برآورد کند. در نتیجه پیچیدگی مدل کاهش یافته ولی در عوض خطا نیز افزایش خواهد یافت. به این ترتیب یک توازن بین بیش‌برازش^۱ و کم‌برازش^۲ در مدل برقرار خواهد شد.

طبق قضیه یا بسط تیلور، می‌توان هر «تابع پیوسته»^۳ و دارای مشتقات متعدد را به صورت یک رابطه خطی یا چند جمله‌ای نمایش داد. از همین قضیه، برای رگرسیون چندجمله‌ای استفاده می‌شود. بر همین اساس و با استفاده از تغییر متغیر رابطه (۴-۷۳)، می‌توان رگرسیون چندجمله‌ای را به صورت «رگرسیون خطی چندگانه»^۴ در نظر گرفت [۱۰۷].

$$X_{1,i} = x_i, \quad X_{2,i} = x_i^2, \quad X_{3,i} = x_i^3, \dots, \quad X_{k,i} = x_i^k \quad (4-73)$$

رگرسیون چندجمله‌ای با استفاده از تغییر متغیر فوق به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_k X_{k,i} + \varepsilon_i \quad i=1, \dots, n \quad (4-74)$$

رابطه (۴-۷۴) را می‌توان به فرم ماتریسی به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4-75)$$

که:

$$\mathbf{Y} = [y_1 \quad \dots \quad y_n]^T \quad (4-76)$$

$$\boldsymbol{\beta} = [\beta_0 \quad \dots \quad \beta_k]^T \quad (4-77)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & X_{1,1} & \dots & X_{k,1} \\ 1 & X_{1,2} & \dots & X_{k,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1,n} & \dots & X_{k,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \quad (4-78)$$

¹ Overfitting

² Underfitting

³ Continuous function

⁴ Multiple linear regression

همانند رگرسیون خطی، با استفاده از روش کمترین مربعات خطا می‌توان بردار ضرایب رگرسیون را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4-79)$$

این برآورد، زمانی امکان پذیر است که ماتریس $(X^T X)$ معکوس پذیر باشد. به این معنی که دترمینان آن باید مخالف صفر بوده تا نشان دهنده عدم وابستگی خطی بین سطرها یا ستون‌های ماتریس باشد. به همین دلیل یکی از شرط‌های اصلی در مدل رگرسیون چندجمله‌ای، استقلال متغیرهای توصیفی است. در غیر این صورت ماتریس $(X^T X)$ معکوس پذیر نبوده و امکان برآورد پارامترها وجود ندارد. همچنین وجود شرط کم بودن تعداد متغیرها نسبت به مشاهدات $(k \ll n)$ به منظور بالا بردن دقت تخمین نیز به باید رعایت شود. لازم به ذکر است که با اینکه روش کمترین مربعات از متداول‌ترین روش‌های تخمین مدل رگرسیون خطی و چندجمله‌ای است، اما روش‌های دیگری مانند کمترین قدرمطلق‌ها (که در آن مجموع قدرمطلق تفاضل پیش‌بینی و داده وابسته به عنوان تابع هزینه در نظر گرفته می‌شود)، روش تخمین جریمه‌یافته کمترین مربعات (مانند جریمه نرم L_2 و جریمه نرم L_1) و یا روش «گرادیان کاهشی تصادفی»^۱ نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۴-۴- مزایا و معایب

➤ مزایا [۱۰۶]

- برای مدل‌های ساده، رگرسیون خطی از دقت مناسب و سرعت محاسباتی خوبی برخوردار است
- رگرسیون چند جمله‌ای بهترین مدل تقریبی را بین متغیر وابسته و مستقل پیدا می‌کند.
- بسیاری از توابع پیچیده غیر خطی، توسط رگرسیون چند جمله‌ای قابل برازش هستند.
- همگرایی به پاسخ بهینه در اغلب موارد با سرعت زیاد همراه است.

➤ معایب [۱۰۶]

- وجود داده‌های پرت^۲ باعث گمراه شدن مدل و در نتیجه نامعتبر بودن مقدار برازش‌شده، خواهد شد.
- رگرسیون خطی برای داده‌های با پراکندگی زیاد جواب معتبری ارائه نمی‌دهد و باید از رگرسیون چندجمله‌ای که دارای محاسبات زیادی است استفاده کرد.
- متاسفانه شناسایی داده پرت در مدل‌های غیرخطی پیچیده و مشکل‌تر از مدل‌های خطی است که این امر به کارگیری رگرسیون چند جمله‌ای را محدود می‌کند.
- تعیین درجه رگرسیون چندجمله‌ای نیازمند سعی و خطا و یا استفاده از روش‌های ابتکاری است.

¹ Stochastic gradient descent

² Outlier

فصل ۵- یادگیری بدون نظارت

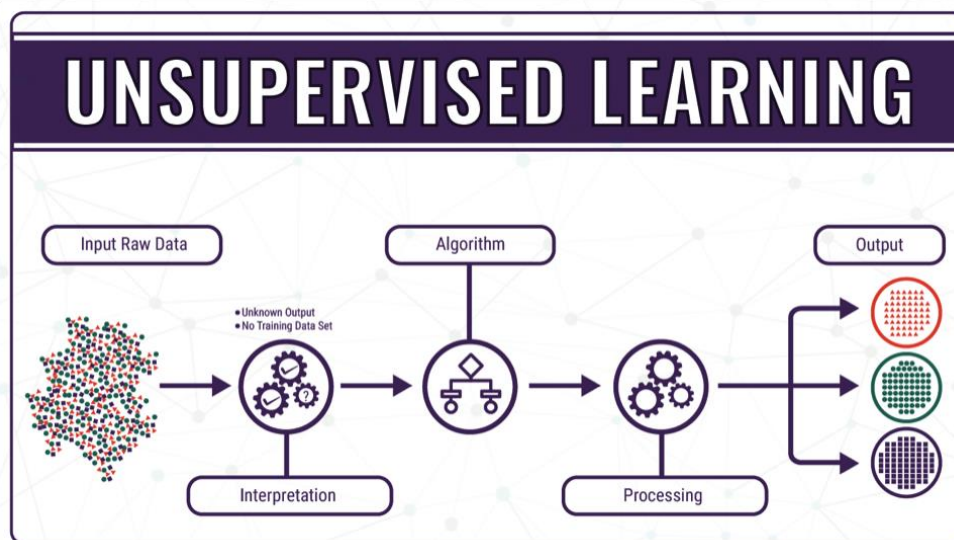
۱-۵- مقدمه

در این فصل به بررسی روش‌های یادگیری بدون نظارت پرداخته می‌شود. بدین منظور در ابتدا اصول یادگیری بدون نظارت شرح داده شده و سپس انواع روش‌های یادگیری ماشین که در این دسته قرار می‌گیرند معرفی می‌گردد. در این بین توجه به اینکه لازم است که روش‌های بسیار متعددی تاکنون ارائه شده و همواره روش‌های جدیدتری در حال ابداع هستند که عمدتاً از ترکیب و یا بهبود روش‌های اصلی نشأت می‌گیرند. به همین دلیل در این فصل، مبانی روش‌های اصلی یادگیری بدون نظارت بررسی می‌شود.

۲-۵- مبانی یادگیری بدون نظارت

یادگیری بدون نظارت یک دسته از روش‌های یادگیری ماشین برای کشف الگوهای موجود در میان داده‌ها است. داده‌های ارائه شده به الگوریتم بدون نظارت دارای برچسب نیستند، بدین معنا که متغیر ورودی (X) بدون هیچ متغیر خروجی متناظری داده شده است. در یادگیری بدون نظارت، الگوریتم‌ها به حال خود رها می‌شوند تا ساختارهای موجود در میان داده‌ها را کشف کنند.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین بدون نظارت زمانی استفاده می‌شود که اطلاعات مورد استفاده برای آموزش، طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری نشده‌اند. در یادگیری بدون نظارت، ماشین یاد می‌گیرد که چگونه سیستم‌ها می‌توانند یک تابع را برای توصیف یک ساختار پنهان از داده‌های بدون برچسب داشته باشند. سیستم، خروجی درست را تشخیص نمی‌دهد، اما این داده‌ها را بررسی می‌کند و می‌تواند نتیجه‌گیری از مجموعه داده‌ها را برای توصیف ساختارهای پنهان از داده‌های بدون برچسب به کار بگیرد. به بیان دیگر، هنگامی که الگوریتم برای کار کردن از مجموعه داده‌ای بهره‌گیر که فاقد داده‌های برچسب‌دار (متغیرهای خروجی) است، از مکانیزم دیگری برای یادگیری و تصمیم‌گیری استفاده می‌کند. در این حالت مدل از طریق مشاهدات یادگیری کرده و دستورالعمل‌ها و ساختارهای موجود در در مجموعه داده‌ها را کشف می‌کند. در این مدل داده‌های ورودی به سیستم ارائه می‌شوند ولی خروجی نهایی مثل یادگیری با نظارت از پیش مشخص و آماده نیست و خود سیستم باید بتواند بر اساس ساختار و الگوی داده‌های ورودی، خروجی را ایجاد کند. در واقع در یادگیری بدون نظارت برخلاف یادگیری با نظارت پیش‌بینی یا برآورد انجام نمی‌شود [۱۰۸]–[۱۱۴]. باتوجه به این موارد، ساختار کلی الگوریتم یادگیری بدون نظارت در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۵: ساختار الگوریتم یادگیری بدون نظارت [۷۴]

چندین راه برای پیاده‌سازی یادگیری نظارت‌شده وجود دارد که برخی از متداول‌ترین رویکردها و الگوریتم‌های مربوطه در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. برپایه مجموعه داده‌های موجود و هدف مطالعه مورد نظر، یادگیری بدون نظارت به سه دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

- خوشه‌بندی^۱
- قوانین انجمنی^۲
- کاهش ابعاد^۳

مطالعات خوشه‌بندی سعی در پیدا کردن گروه‌هایی از اشیاء مشابه مانند کفش‌های ورزشی، کفش‌های طبی و کفش‌های مجلسی، و یا گروه‌بندی داده‌های مختلف نظیر گروه‌بندی مشتریان بر اساس رفتار خرید آن‌ها دارد. در حقیقت خوشه‌بندی مسئله‌ای است که نشان می‌دهد کاربر می‌خواهد چه چیزی را کشف کند و این به گروه‌بندی ذاتی داده‌ها کمک می‌کند.

هدف قوانین انجمنی درک و شناخت توالی‌های مشترک اشیاء است. این بخش از الگوریتم‌های یادگیری ماشین بدون نظارت برای کشف احتمال وقوع موارد در یک مجموعه استفاده می‌شود. برای نمونه این دسته از روش‌ها به صورت گسترده در تجزیه و تحلیل سبد خرید مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰۸]–[۱۱۴]. این دسته از تکنیک‌های یادگیری بدون نظارت نسبت به تکنیک‌های خوشه‌بندی و کاهش ابعاد از کاربرد کم‌تری برخوردارند.

الگوریتم‌هایی که در دسته کاهش ابعاد قرار می‌گیرند، برای کاهش تعداد متغیرهای یک مجموعه داده استفاده می‌شوند؛ به طوری که ضمن این کاهش حجم متغیرها و ابعاد، اطلاعات مهم و با ارزش حفظ و منتقل شوند. این الگوریتم‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های استخراج و انتخاب ویژگی انجام داد. انتخاب ویژگی زیرمجموعه‌ای از متغیرها و ابعاد اصلی را به منظور ادامه مطالعات انتخاب می‌کند. در حالی که استخراج ویژگی، وظیفه انتقال داده‌ها را از یک فضای با ابعاد بالا به یک فضای با ابعاد کم بر عهده دارد. در ادامه این بخش، به معرفی و نحوه عملکرد الگوریتم‌های یادگیری بدون نظارت پرداخته می‌شود.

۳-۵- تکنیک خوشه‌بندی

خوشه‌بندی از جمله الگوریتم‌های قطعه‌بندی به حساب می‌آید. الگوریتم خوشه‌بندی اطلاعاتی را که ویژگی‌های نزدیک به هم و مشابه دارند در دسته‌های جداگانه که به آن خوشه گفته می‌شود قرار می‌دهد. بخش‌بندی داده‌ها به گروه‌ها یا خوشه‌های معنادار به طوری که محتویات هر خوشه ویژگی‌های مشابه و در عین حال نسبت به اشیاء دیگر در سایر خوشه‌ها غیر مشابه باشند را خوشه‌بندی می‌گویند. بنابراین خوشه مجموعه‌ای از اشیاء است که در آن اشیاء با یکدیگر مشابه بوده و با اشیاء موجود در خوشه‌های دیگر غیر مشابه هستند. به بیان دیگر خوشه‌بندی، فرآیندی است که به کمک آن می‌توان مجموعه‌ای از اشیاء را به گروه‌های مجزا که خوشه نامیده می‌شوند افراز کرد. اعضاء هر خوشه با توجه به ویژگی‌هایی که دارند به یکدیگر بسیار شبیه هستند و در عوض میزان شباهت بین خوشه‌ها کمترین مقدار است. برای مشابه بودن می‌توان معیارهای مختلفی را در نظر گرفت. مثلاً می‌توان معیار فاصله را برای خوشه‌بندی مورد استفاده قرار داد و اشیائی را که به یکدیگر نزدیک‌تر

¹ Clustering

² Association Rule

³ Dimensionality Reduction

هستند به عنوان یک خوشه در نظر گرفت. در چنین حالتی هدف از خوشه‌بندی، نسبت دادن برچسب‌هایی به اشیاء است که نشان دهنده عضویت هر شیء به خوشه است. تکنیک‌های خوشه‌بندی در مجموعه داده‌های بزرگ و در مواردی که تعداد ویژگی‌های داده زیاد باشد استفاده می‌شود. برای مثال تکنیک‌های خوشه‌بندی در علوم مختلف مانند گیاه‌شناسی، هوش مصنوعی، تشخیص الگوهای مالی و ... کاربرد دارند [۱۱۵]–[۱۱۹]. همان‌طور که گفته شد، هدف خوشه‌بندی یافتن خوشه‌های مشابه از اشیاء در بین نمونه‌های ورودی است. یکی از مسایل مهم در خوشه‌بندی انتخاب تعداد خوشه‌ها می‌باشد. در بعضی از الگوریتم‌ها تعداد خوشه‌ها از قبل مشخص شده است و در بعضی دیگر خود الگوریتم تصمیم می‌گیرد که داده‌ها به چند خوشه تقسیم شوند. در واقع الگوریتم‌های خوشه‌بندی اغلب بدین‌گونه هستند که یک سری نماینده اولیه برای نمونه‌های ورودی در نظر می‌گیرند و سپس از روی میزان تشابه نمونه‌ها با این نماینده‌ها مشخص می‌شود که نمونه به کدام خوشه تعلق دارد و بعد از این مرحله نماینده‌های جدید برای هر خوشه محاسبه می‌شود و دوباره نمونه‌ها با این نماینده‌ها مقایسه می‌شوند تا مشخص شود که به کدام خوشه تعلق دارند و این کار آن قدر تکرار می‌شود تا زمانی که نماینده‌های خوشه‌ها تغییری نکنند.

نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که خوشه‌بندی با کلاس‌بندی متفاوت است. در کلاس‌بندی نمونه‌های ورودی برچسب‌گذاری شده‌اند ولی در خوشه‌بندی نمونه‌های ورودی دارای برچسب اولیه نمی‌باشند و در واقع با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی است که داده‌های مشابه، مشخص و به طور ضمنی برچسب‌گذاری می‌شوند. در واقع می‌توان قبل از عملیات کلاس‌بندی داده‌ها یک خوشه‌بندی روی نمونه‌ها انجام داد و سپس مراکز خوشه‌های حاصل را محاسبه کرد و یک برچسب به مراکز خوشه‌ها نسبت داد و سپس عملیات کلاس‌بندی را برای نمونه‌های ورودی جدید انجام داد.

اگر چه بیشتر الگوریتم‌ها یا روش‌های خوشه‌بندی مبنای یکسانی دارند ولی تفاوت‌هایی در شیوه اندازه‌گیری شباهت یا فاصله و همچنین انتخاب برچسب برای اشیاء هر خوشه در این روش‌ها وجود دارد. آگاهی از الگوریتم‌های خوشه‌بندی و آشنایی با نحوه اجرای آن‌ها کمک می‌کند تا مناسب‌ترین روش را برای خوشه‌بندی داده‌ها به کار برد. هر چند ممکن است امکان دسته‌بندی روش‌ها و الگوریتم‌ها خوشه‌بندی به راحتی میسر نباشد، ولی طبقه‌بندی کردن آن‌ها درک صحیحی از روش خوشه‌بندی به کار گرفته شده در الگوریتم‌ها ارائه می‌دهد. معمولاً چهار گروه اصلی برای الگوریتم‌های خوشه‌بندی وجود دارد [۱۱۵]–[۱۱۹]:

- الگوریتم‌های خوشه‌بندی تفکیکی^۱
- الگوریتم‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی^۲
- الگوریتم‌های خوشه‌بندی بر مبنای چگالی^۳
- الگوریتم‌های خوشه‌بندی بر مبنای مدل^۴

در ادامه به معرفی هر یک از این دسته‌بندی‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۳-۵- خوشه‌بندی تفکیکی

در این روش، براساس n مشاهده و k گروه، عملیات خوشه‌بندی انجام می‌شود. به این ترتیب تعداد خوشه‌ها یا گروه‌ها از قبل در این الگوریتم مشخص بوده و با طی مراحل خوشه‌بندی تفکیکی، هر شیء فقط و فقط به یک خوشه تعلق می‌گیرد و هیچ خوشه‌ای بدون عضو باقی نمی‌ماند.

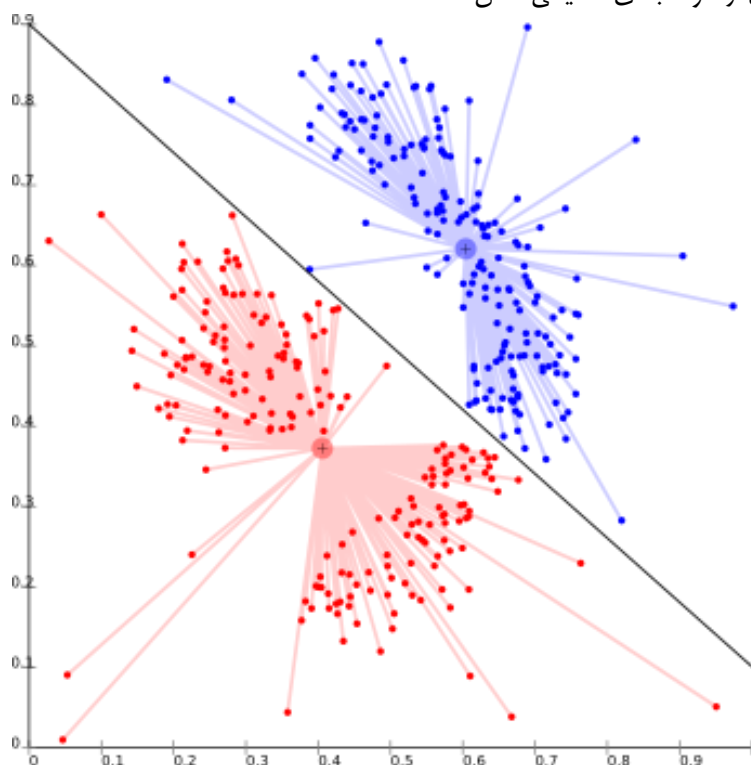
^۱ Partitional Clustering

^۲ Hierarchical Clustering

^۳ Density-Based Clustering

^۴ Model-Based Clustering

معمولاً الگوریتم‌های تفکیکی بر مبنای بهینه‌سازی یک تابع هدف عمل می‌کنند. این کار براساس تکرار مراحل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود؛ در نتیجه الگوریتم‌های مختلفی بر این مبنای ایجاد شده‌اند. برای مثال الگوریتم k-Mean با تعیین تابع هدف براساس میانگین فاصله اعضای هر خوشه نسبت به میانگین‌شان عمل می‌کند و به شکلی اشیاء را در خوشه‌ها قرار می‌دهد تا میانگین مجموع مربعات فاصله‌ها در هر خوشه، کمترین مقدار را داشته باشد. به این ترتیب با استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی می‌توان به جواب مناسب برای خوشه‌بندی تفکیکی رسید؛ اما باید توجه داشت از آنجایی که تعداد خوشه‌ها یا مراکز اولیه باید به الگوریتم داده شود، ممکن است با تغییر نقاط اولیه نتایج متفاوتی در خوشه‌بندی به دست آید. در میان الگوریتم‌های خوشه‌بندی تفکیکی، الگوریتم k-Means از محبوبیت زیادی برخوردار است. در شیوه خوشه‌بندی تفکیکی با طی مراحل خوشه‌بندی، برچسب عضویت اشیاء به هر خوشه براساس خوشه‌های جدیدی که ایجاد می‌شوند قابل تغییر است. در شکل ۲-۵ نمونه‌ای از خوشه‌بندی تفکیکی نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: نمونه‌ای از خوشه‌بندی تفکیکی

۲-۳-۵- خوشه‌بندی سلسله مراتبی

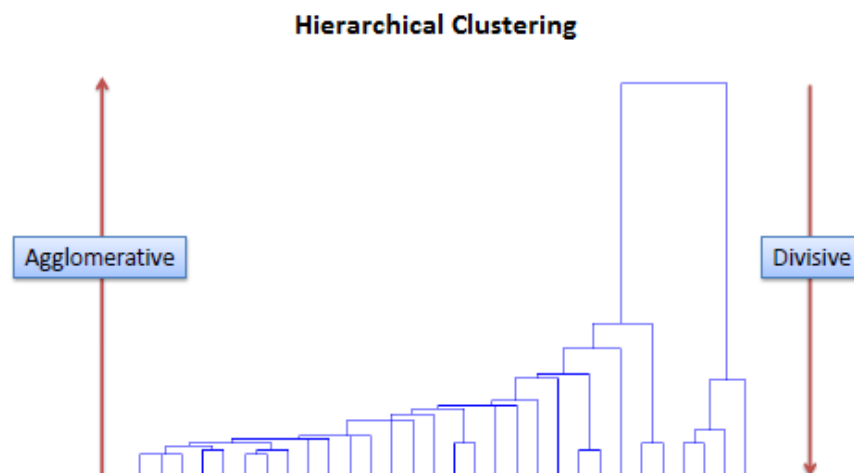
برعکس خوشه‌بندی تفکیکی که اشیاء را در گروه‌های مجزا تقسیم می‌کند، خوشه‌بندی سلسله مراتبی، در هر سطح از فاصله بین داده‌ها و خوشه‌ها، نتیجه خوشه‌بندی را نشان می‌دهد. این سطوح به صورت سلسله مراتبی^۱ هستند. برای نمایش نتایج خوشه‌بندی به صورت سلسله مراتبی از درخت‌واره^۲ استفاده می‌شود. این شیوه، روشی موثر برای نمایش نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی است. در این روش هر داده

^۱ Hierarchy

^۲ Dendrogram

در ابتدا یک خوشه محسوب می‌شود. در طی مراحل خوشه‌بندی، نزدیک‌ترین مقادارها (براساس تابع فاصله تعریف شده) با یکدیگر ادغام شده و خوشه جدیدی می‌سازند. الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی معمولاً با کوچکترین خوشه‌ها شروع می‌شود سپس دو مقداری که بیشترین شباهت یا کمترین فاصله را دارند با یکدیگر ادغام شده و یک خوشه جدید می‌سازند. بعد از این مرحله ممکن است دو مقدار یا یک مقدار با یک خوشه یا حتی دو خوشه با یکدیگر ادغام شده و خوشه جدیدی ایجاد شود.

در خوشه‌بندی سلسله مراتبی در هر مرحله فقط یک عمل ادغام انجام می‌شود. این عملیات با رسیدن به بزرگ‌ترین خوشه که از همه مقادارها تشکیل یافته پایان می‌یابد. به این ترتیب اگر n داده وجود داشته باشد، در مرحله اول تعداد خوشه‌ها برابر با n است و در آخرین مرحله یک خوشه باقی خواهد ماند. شایان ذکر است خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی عمدتاً دید از پایین به بالا و تجمعی^۱ داشته که در بالا بدان اشاره شد؛ اگرچه به صورت تئوری و کلی، روش تقسیمی^۲ نیز برای خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی وجود دارد که به صورت عکس روش تجمعی عمل می‌کند؛ یعنی ابتدا تمامی داده‌های پایگاه داده را در یک خوشه قرار داده و به ترتیب از دل هر خوشه، خوشه‌های جدیدی را پدید می‌آورد؛ اما از آنجایی که محدودیت‌هایی برای تقسیم یک خوشه به زیر خوشه‌های دیگر وجود دارد، روش تقسیمی کمتر به کار گرفته می‌شود. در خوشه‌بندی سلسله مراتبی، عمل تخصیص داده‌ها به خوشه‌ها در طی مراحل خوشه‌بندی اصلاح‌پذیر نیست؛ یعنی هرگاه داده‌ای درون یک خوشه قرار گرفت، هرگز از آن خوشه خارج نمی‌شود. در شکل ۳-۵ شمای کلی خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: شمای کلی خوشه‌بندی سلسله مراتبی [۱۱۵]–[۱۱۹]

۳-۳-۵- خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی

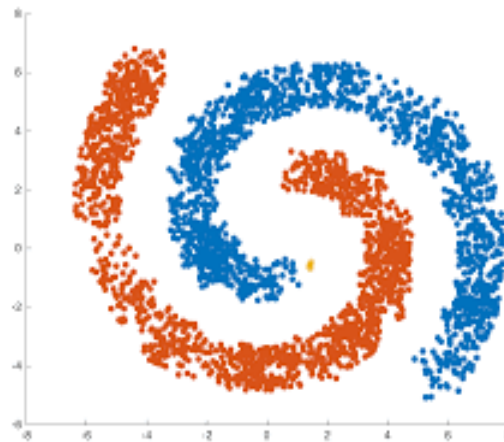
در الگوریتم‌های خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، نقاط با تراکم زیاد شناسایی شده و در یک خوشه قرار می‌گیرند. از الگوریتم‌های معروف در این زمینه می‌توان به DBSCAN^۳ اشاره کرد. این الگوریتم توانایی شناسایی نقاط دورافتاده را داشته و می‌تواند تاثیر آن‌ها را در نتایج خوشه‌بندی

^۱ Agglomerative

^۲ Divisive

^۳ Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise

از بین ببرد. مراحل خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی به این ترتیب است که ابتدا یک نقطه را به صورت اختیاری انتخاب کرده و نقاط قابل دسترس برای آن پیدا می‌شود. اگر X یک نقطه مرکزی باشد (نقطه‌ای که درون خوشه قرار داشته باشد)، خوشه را تشکیل می‌دهد ولی اگر X نقطه‌ای مرزی باشد (نقطه‌ای که در لبه‌های خوشه قرار داشته باشد)، آن‌گاه هیچ نقطه قابل دسترسی برای X وجود نخواهد داشت و الگوریتم از نقطه‌ای دیگری ادامه پیدا می‌کند. در مراحل خوشه‌بندی ممکن است دو خوشه که به یکدیگر نزدیک باشند، ادغام شوند. فاصله بین دو خوشه عمدتاً برحسب حداقل فاصله بین اعضای دو خوشه سنجیده می‌شود. این تکنیک خوشه‌بندی قادر است تا خوشه‌های خاصی که الگوریتم‌های خوشه‌بندی تفکیکی نمی‌توانند آن‌ها را به درستی تمیز دهد، شناسایی و معرفی کند. خوشه‌هایی که تراکم بین اعضای آن‌ها حاکم است از این دسته از خوشه‌ها بوده که شکل‌های مختلفی می‌توان برای آن‌ها متصور شد. در شکل ۴-۵ نمونه‌ای از این خوشه‌بندی نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: نمونه‌ای از خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی

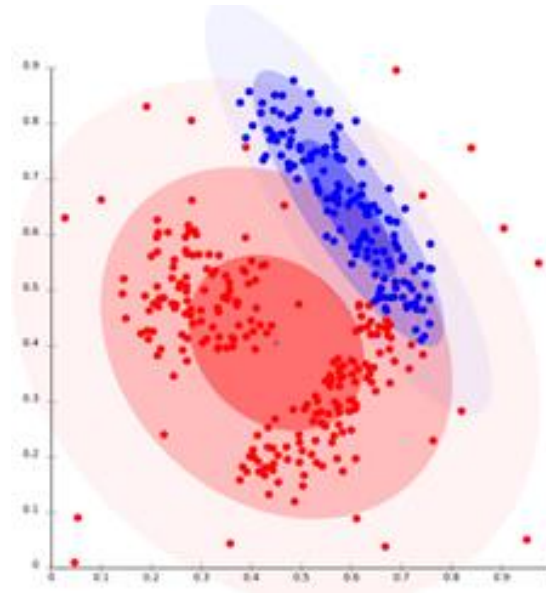
۴-۳-۵- خوشه‌بندی مبتنی بر مدل

در روش‌های پیشین، فرضیاتی مبنی بر وجود یک توزیع آماری برای داده‌ها وجود نداشت. در روش خوشه‌بندی بر مبنای مدل، یک توزیع آماری برای داده‌ها فرض می‌شود. هدف در اجرای خوشه‌بندی بر مبنای مدل، برآورد پارامترهای توزیع آماری به همراه متغیر پنهانی است که به عنوان برچسب خوشه‌ها در مدل معرفی شده است. این مدل خوشه‌بندی که دقیقاً مربوط به آمار می‌باشد، مبتنی بر مدل‌های توزیع است. خوشه‌ها به راحتی می‌توانند به عنوان اشیائی تعریف شوند که به احتمال زیاد توزیع یکسانی دارند. یک ویژگی خوب این رویکرد این است که با نمونه‌برداری از اشیاء تصادفی از یک توزیع، دقیقاً شبیه نحوه تولید مجموعه داده‌های مصنوعی است. مشکل اصلی این روش بیش‌برازش است. در دنیای الگوریتم‌ها بیش‌برازش شدن به معنای این است که الگوریتم صرفاً می‌تواند داده‌هایی را که در مجموعه آموزشی یاد گرفته است به درستی پیش‌بینی کند؛ ولی اگر داده‌ای به مقدار کمی از مجموعه آموزشی فاصله داشته باشد، الگوریتمی که بیش‌برازش شده باشد، نمی‌تواند به درستی پاسخی برای این داده‌های جدید پیدا کند و آن‌ها را با خطای زیادی خوشه‌بندی کند. یک روش شناخته‌شده در زمینه خوشه‌بندی مبتنی بر مدل، مدل مخلوط گاوسی^۱ (GMM) با استفاده از الگوریتم حداکثر سازی انتظار^۲ است. خوشه‌بندی مبتنی بر توزیع، مدل‌های پیچیده‌ای را برای خوشه‌ها ایجاد می‌کند که می‌تواند همبستگی و وابستگی ویژگی‌ها را نشان دهد. به منظور به دست آوردن خوشه‌بندی سخت که هر

¹ Gaussian Mixture Mod

² Expectation Maximization

داده فقط به یک خوشه تعلق دارد، اشیاء اغلب به توزیع گاوسی که با احتمال بیشتری به آن توزیع تعلق دارند، اختصاص داده می‌شوند؛ در حالی که برای خوشه‌بندی نرم که در آن هر شیء با یک احتمال به خوشه‌های مختلفی تعلق دارد، این کار لازم نبوده و پس از همگرایی الگوریتم فوق، احتمال تعلق هر داده یا شیء به هر خوشه به دست خواهد آمد. این پارمتر در حقیقت همان متغیر پنهان ذکر شده در روش GMM می‌باشد. در شکل ۵-۵ نمونه‌ای از خوشه‌بندی مبتنی بر مدل



شکل ۵-۵: نمونه‌ای از خوشه‌بندی مبتنی بر مدل

۵-۳-۵- معرفی الگوریتم‌های پر کاربرد خوشه‌بندی

در ادامه به الگوریتم‌های پایه‌ای خوشه‌بندی در یادگیری ماشین بدون نظارت خواهیم پرداخت تا شناخت کلی نسبت به الگوریتم‌های موجود یادگیری بدون نظارت در زمینه خوشه‌بندی حاصل شود. اسامی الگوریتم‌های مورد نظر از قرار ذیل است:

- K-Means
- DBSCAN
- Mean-Shift
- BIRCH¹
- مدل آمیخته گاوسی با استفاده از بیشینه‌سازی انتظار

لازم به ذکر است که الگوریتم‌های K-Means و DBSCAN در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های خوشه‌بندی از کاربرد بیشتری برخوردار هستند.

¹ Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies

۵-۳-۵-۱- الگوریتم K-Means

این روش، روشی مسطح بوده و جزو خوشه‌بندی‌های تفکیکی و سخت دسته‌بندی می‌شود. برای این الگوریتم شکل‌های مختلفی پیشنهاد شده است؛ ولی با این وجود تمامی آن‌ها از یک روش تکراری بهره برده و برای تعداد ثابتی خوشه، سعی در تخمین موارد زیر دارند [۱۲۰]:

(۱) به دست آوردن نقاطی به عنوان مراکز خوشه‌ها که در حقیقت این نقاط همان میانگین داده‌های متعلق به هر خوشه است.

(۲) نسبت دادن هر داده به یک خوشه به صورتی که آن داده کمترین فاصله تا مرکز آن خوشه را داشته باشد.

در نوع متداول این روش، در ابتدا تعداد خوشه‌ها (پارامتر K) تعیین می‌شود. سپس به صورت تصادفی K عدد از داده‌ها به عنوان حدس اولیه مراکز خوشه‌ها انتخاب می‌شوند. سپس برای هر داده فاصله آن تا مراکز خوشه‌ها محاسبه شده و در پایان داده به خوشه‌ای که کمترین فاصله را تا مرکز آن خوشه دارد، تعلق می‌گیرد. پس از این که تمامی داده‌ها بین خوشه‌های مختلف تقسیم شدند، بایستی مراکز خوشه‌ها دوباره محاسبه شوند. مرکز هر خوشه برابر میانگین عناصر متعلق به آن خوشه است. پس از محاسبه مراکز جدید خوشه‌ها، دوباره فاصله داده‌ها تا مراکز خوشه‌ها محاسبه شده و مانند قبل هر داده به خوشه‌ای تعلق می‌گیرد که کمترین فاصله را تا مرکز آن خوشه داشته باشد. این رویه به صورت تکراری انجام می‌شود تا الگوریتم همگرا شود. همگرایی این الگوریتم زمانی خواهد بود که در دو تکرار متوالی خوشه هیچ یک از داده‌ها تغییر نکند. در حقیقت در این روش سعی می‌شود تا میانگین مجموع مربعات فاصله‌ها در خوشه‌ها، کمترین مقدار را داشته باشد. در این حالت تابع هدف مورد نظر که طی این الگوریتم سعی در کمینه شدن آن می‌شود از قرار زیر است:

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{\substack{i=1 \\ x_i \in \text{Cluster } j}}^n \|x_i - c_j\|^2 \quad (5-1)$$

در رابطه بالا $\|x_i - c_j\|$ معیار فاصله بین نقطه i ام با مرکز خوشه j ام می‌باشد. در رابطه بالا n تعداد داده‌ها و k تعداد خوشه‌ها می‌باشد. شایان ذکر است عمده‌تأ از فاصله اقلیدسی در این الگوریتم استفاده می‌شود.

به طور خلاصه، الگوریتم K-Means عبارت است از [۱۲۰]، [۱۲۱]:

۱- تعیین تعداد خوشه‌ها و انتخاب تصادفی مراکز این خوشه‌ها

۲- تخصیص داده‌ها به خوشه‌ای که کمترین فاصله تا مرکز آن خوشه را دارند

۳- محاسبه مراکز جدید خوشه‌ها بر اساس میانگین داده‌های موجود در یک خوشه

۴- تکرار مراحل ۲ و ۳ تا زمانی که تغییری در مراکز خوشه‌ها حاصل نشود

در شکل ۵-۶ روندنمای این الگوریتم مشاهده می‌شود.

مزایا و معایب این الگوریتم بر اساس ماهیت این روش از قرار ذیل است [۱۲۲]، [۱۲۳].

مزایا:

➤ الگوریتمی موثر برای داده‌هایی با حجم زیاد است. دلیل این ویژگی این است که پیچیدگی زمانی این الگوریتم $O(nmkt)$ است؛

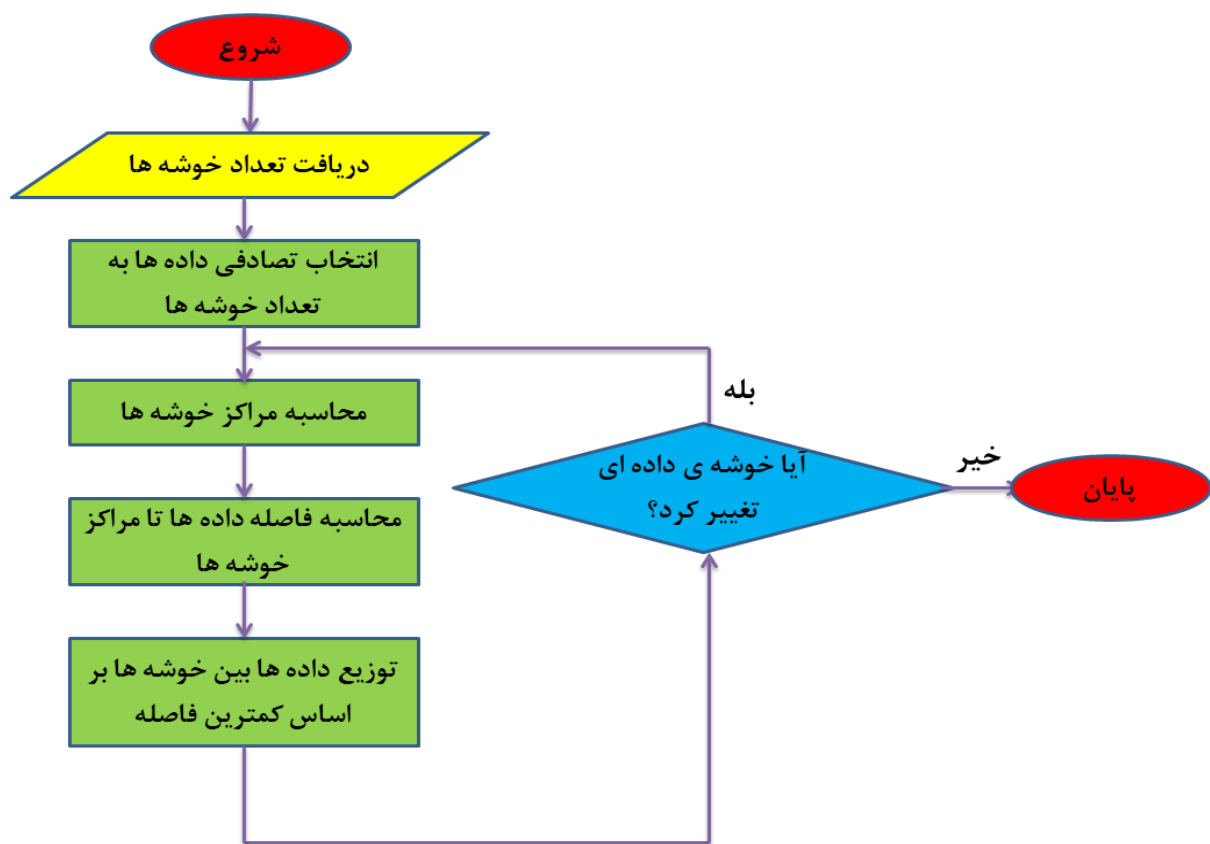
که در آن n تعداد نمونه‌ها، m تعداد ویژگی‌ها، k تعداد خوشه‌ها و t تعداد تکرار هستند. لذا پیچیدگی زمانی این الگوریتم تابعی

خطی از حجم نمونه می‌باشد.

➤ کاربرد گسترده و موثری به دلیل محاسبات ساده و سریع الگوریتم

معایب:

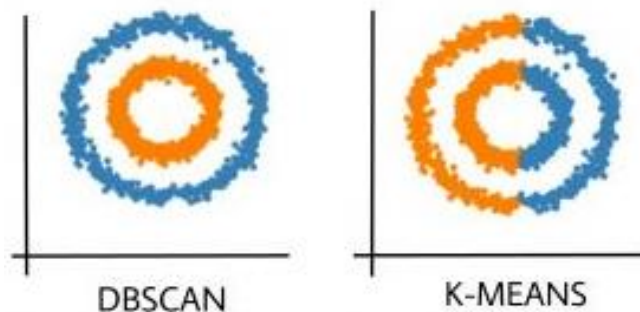
- کارآمد، صرفاً برای داده‌های عددی
- جواب نهایی آن واحد نبوده و به فرض اولیه مراکز خوشه‌ها وابسته است.
- نسبت به داده‌های دارای نویز حساس است.
- در این روش تعداد خوشه‌ها از ابتدا بایستی مشخص باشد.
- برای خوشه‌های به شکل محدب کاربرد دارد.



[۱۲۰]، [۱۲۱] K-Means شکل ۶-۵: روندنمای الگوریتم

۵-۳-۵- الگوریتم DBSCAN

الگوریتم DBSCAN بعد از الگوریتم K-Means به عنوان معروف‌ترین الگوریتم در حوزه خوشه‌بندی داده‌ها دانست. یکی از تفاوت‌های اصلی این الگوریتم با K-Means این است که الگوریتم DBSCAN نیاز به تعیین تعداد خوشه توسط کاربر ندارد و خود الگوریتم می‌تواند خوشه‌ها را مبتنی بر چگالی آن‌ها شناسایی کند. برای مثال، در شکل ۷-۵ مشاهده می‌شود که روش K-Means نتوانسته عمل خوشه‌بندی را به طرز مناسبی انجام دهد؛ در حالی که خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی به خوبی داده‌ها را در خوشه‌های مناسبی قرار داده است.



شکل ۵-۷: مقایسه نتایج خوشه‌بندی تفکیکی با روش چگالی

در الگوریتم DBSCAN دو پارامتر وجود دارد. یکی از آن‌ها شعاع است که به آن Epsilon نیز می‌گویند و دومی حداقل نقاط موجود در یک خوشه است که به آن MinPoints گفته می‌شود. این الگوریتم ابتدا یک نمونه را انتخاب می‌کند و با توجه به مقدار شعاع Epsilon به دنبال همسایه برای این نقطه در فضا می‌گردد. اگر الگوریتم در آن شعاع مشخص Epsilon حداقل توانست به تعداد MinPoint نقطه پیدا کند، آن‌گاه همه آن نقطه‌ها با هم به یک خوشه تعلق می‌گیرند. الگوریتم سپس به دنبال یکی از نقطه‌های همجوار نقطه فعلی می‌رود تا دوباره با شعاع Epsilon در آن نقطه به دنبال نقاط همسایه دیگر بگردد و اگر تعداد نقاط همسایه‌ی جدید باز هم پیدا شوند، این الگوریتم دوباره همه آن نقاط جدید را با نقاط قبلی به یک خوشه متعلق می‌کند و اگر نقطه جدیدی در همسایگی پیدا نکرد، این خوشه تمام شده است و برای پیدا کردن خوشه‌های دیگر در نقاط دیگر، به صورت تصادفی یک نقطه دیگر را انتخاب کرده و شروع به یافتن همسایه و تشکیل خوشه جدید برای آن نقطه می‌کند. این روند آن قدر ادامه پیدا می‌کند تا تمامی نقاط بررسی شوند. البته ممکن است تمامی نمونه‌ها در همسایگی، دارای حداقل همسایه تعیین شده نباشند. به این نمونه‌ها نقطه‌های مرزی یا حاشیه^۱ گفته می‌شوند. در این الگوریتم، به نقاطی که حداقل میزان MinPoints را در شعاع خود داشته باشند، نقاط هسته^۲ می‌گویند. شایان ذکر است در این الگوریتم به داده‌هایی که در شعاع پیرامون خود تعداد داده کمتری نسبت به MinPoints داشته باشد، داده پرت^۳ گفته می‌شود؛ البته بایستی تمامی خوشه‌ها ساخته بشود تا معلوم گردد که یک داده پرت است. همان‌طور که مشخص است، الگوریتم DBSCAN حساس به دو پارامتر MinPoints و شعاع است. هر چه شعاع کوچک‌تر در نظر گرفته شود، خوشه‌های بیشتر و کوچک‌تری تشکیل می‌شود. همچنین هر چه قدر MinPoint بزرگ‌تر باشد، احتمال ایجاد خوشه‌ها، کمتر می‌شود؛ زیرا الگوریتم باید تعداد نمونه‌های بیشتری را در یک شعاع خاص ببیند تا خوشه را تشکیل دهد. به طور خلاصه، الگوریتم DBSCAN از قرار زیر است.

۱- تعیین شعاع و حداقل داده هر خوشه

۲- انتخاب تصادفی یک داده و تشکیل یک خوشه در صورت ارضای شرط حداقل داده در شعاع همسایگی عنصر، در غیر این صورت تکرار

مرحله ۲

۳- بررسی نقاط همسایگی، تکمیل خوشه و تعیین نقاط هسته و حاشیه‌ای

۴- تکرار مراحل ۲ و ۳ تا زمانی که تمامی نقاط بررسی شوند.

۵- تعیین داده‌های پرت

^۱ Border

^۲ Core

^۳ Outlier

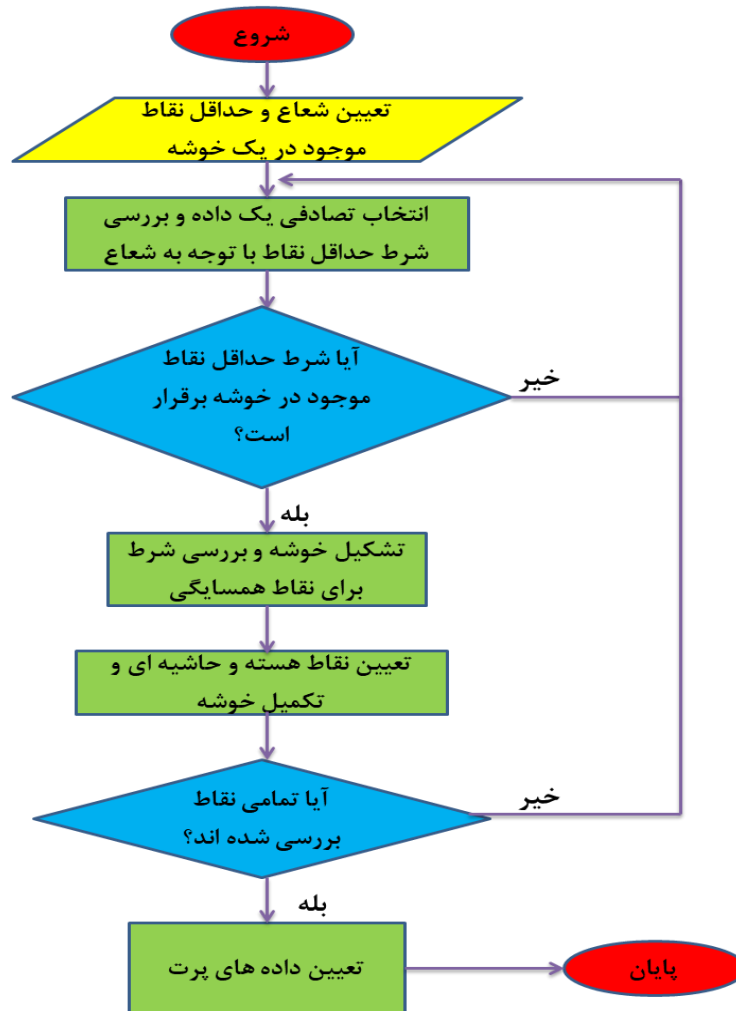
در شکل ۵-۸ روندنمای این الگوریتم قابل مشاهده می‌باشد. همانند سایر الگوریتم‌ها، روش BDSCAN نیز دارای مزایا و معایبی است که از قرار زیر است [۱۲۴]، [۱۲۵]:

مزایا:

- عدم محدودیت به شکل خوشه‌ها
- مقاوم بودن در مقابل نویز
- تعیین خودکار تعداد خوشه‌ها
- سرعت نسبتاً بالا
- ساده و قابل فهم بودن

معایب:

- دشواری تعیین مقدار دقیق و بهینه پارامترهای ورودی
- عدم تشخیص خوشه‌های با چگالی‌های بسیار تنک
- عدم تشخیص صحیح خوشه‌ها در هنگام نزدیک بودن خوشه‌ها به هم
- حساسیت نتیجه خروجی نسبت به پارامترهای ورودی



[۱۲۴], [۱۲۵] BDSCAN شکل ۸-۵: روندنمای الگوریتم

۳-۵-۳-۵ الگوریتم Mean-Shift

انتقال میانگین تکنیکی برای یافتن نقاط بیشینه (مُد) در یک تابع توزیع احتمال است. این تکنیک دارای ساختار تکرارشونده می‌باشد و با شروع از یک حدس اولیه، به نقاط بیشینه همگرا می‌شود. بر خلاف روش K-means، در این روش هیچ پیش فرضی بر روی شکل توزیع داده‌ها و یا خوشه‌ها و یا تعداد بیشینه‌های محلی وجود ندارد. ایده اصلی در این الگوریتم این است که نقاط موجود در یک فضای m بعدی ویژگی را در قالب یک توزیع احتمال در نظر می‌گیرد که در آن، نواحی فشرده^۱ مربوط به بیشینه‌های محلی توزیع مربوطه می‌باشند. در این الگوریتم، به مسئله توزیع نقاط ویژگی در یک فضای m بعدی، به صورت یک مسئله توزیع احتمال نگاه شده و سعی می‌شود بیشینه‌های محلی داده‌ها در این توزیع احتمال پیدا شود. به ازای هر نقطه داده در فضای ویژگی^۲ و قرار دادن مرکز یک پنجره جستجو در آن نقطه، بررسی می‌شود که

^۱ Dense

^۲ Feature Space

آیا آن داده از نظر توزیع آماری در یک بیشینه محلی قرار دارد یا خیر. این کار با محاسبه میانگین عناصر صورت می‌پذیرد. شایان ذکر است برای محاسبه مقدار میانگین فقط نقاطی که در یک همسایگی معینی از مرکز پنجره قرار دارند لحاظ می‌شوند. دامنه این همسایگی توسط تعریف تابع کرنل تعیین می‌شود. در صورت واقع نبودن در یک بیشینه محلی، مرکز همسایگی جابجا شده و مجدداً بررسی می‌شود که آیا آن نقطه جدید (مرکز همسایگی) از نظر توزیع آماری در یک بیشینه محلی قرار دارد یا خیر. مقایسه فوق ادامه می‌یابد تا جایی که به یک همگرایی رسیده و داده‌ای پیدا شود (مرکز پنجره جستجو) که بر روی بیشینه محلی قرار گیرد. در نهایت مجموعه نقاطی که به یک بیشینه محلی یکسان منتهی می‌شوند، تشکیل یک خوشه می‌دهند. نکته با اهمیت این است که تعداد خوشه‌ها بستگی به توزیع آماری داده‌ها دارد؛ چرا که همه نقاط داده، به عنوان مرکز یک پنجره جستجو انتخاب شده و در مسیر حرکت نهایتاً به تعدادی بیشینه محلی می‌رسند [۱۲۶]–[۱۲۸].

با فرض اینکه هدف یافتن مد بوده و حدس اولیه از مکان آن x_i است. به عبارت دیگر هدف تخصیص عنصر x_i به یک خوشه است. اکنون فرض می‌شود تابعی وجود دارد که برای تخمین بهتر از مکان بیشینه، اهمیت نقاط همسایگی را نشان می‌دهد، یعنی به نقاط همسایگی وزن می‌دهد. این تابع را در آمار، کرنل می‌نامند. واضح است که یک تابع کرنل^۱ می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد. در این الگوریتم عمدتاً از تابع کرنل گاوسی استفاده می‌شود که وزن همسایگی x_i را به صورت زیر می‌دهد:

$$K(x_i - x) = e^{-c\|x_i - x\|^2} \quad (5-2)$$

حال حدس جدید از مد، را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$m(x) = \frac{\sum_{x_i \in N(x)} K(x_i - x) x_i}{\sum_{x_i \in N(x)} K(x_i - x)} \quad (5-3)$$

که در آن، $m(x)$ حدس جدید می‌باشد. حال می‌توان $m(x)$ را به جای x قرار داد و الگوریتم را تکرار کرد. شرط پایان آن است که تغییر در $m(x)$ در دو تکرار این الگوریتم ناچیز باشد. با انجام این رویه برای تمامی داده‌ها و عناصر، در نهایت هر کدام از عناصر به یک بیشینه محلی هدایت می‌شوند. طبیعی است تمامی عناصری که به یک بیشینه محلی منتهی شده‌اند، تشکیل یک خوشه می‌دهند. به طور خلاصه، الگوریتم Mean-Shift از قرار زیر است [۱۲۶]–[۱۲۸]:

۱- انتخاب و تعیین تابع کرنل

۲- انتخاب تصادفی یک داده و یافتن بیشینه محلی مربوط به آن و تعلق آن عنصر به خوشه مربوطه

۳- انجام مرحله ۲ برای تمامی عناصر

۴- تعیین داده‌های پرت

شایان ذکر است، می‌توان پس از بررسی تمامی نقاط، داده‌هایی که خوشه آن‌ها کمتر از تعداد معینی عضو دارد را به عنوان داده‌های پرت در نظر گرفت. در شکل ۹-۵ روندنمای این الگوریتم قابل مشاهده است. مزایا و معایب این الگوریتم نیز به صورت ذیل می‌باشد [۱۲۹]:

مزایا:

- نیاز به تعیین تنها یک پارامتر پهنای باند^۲

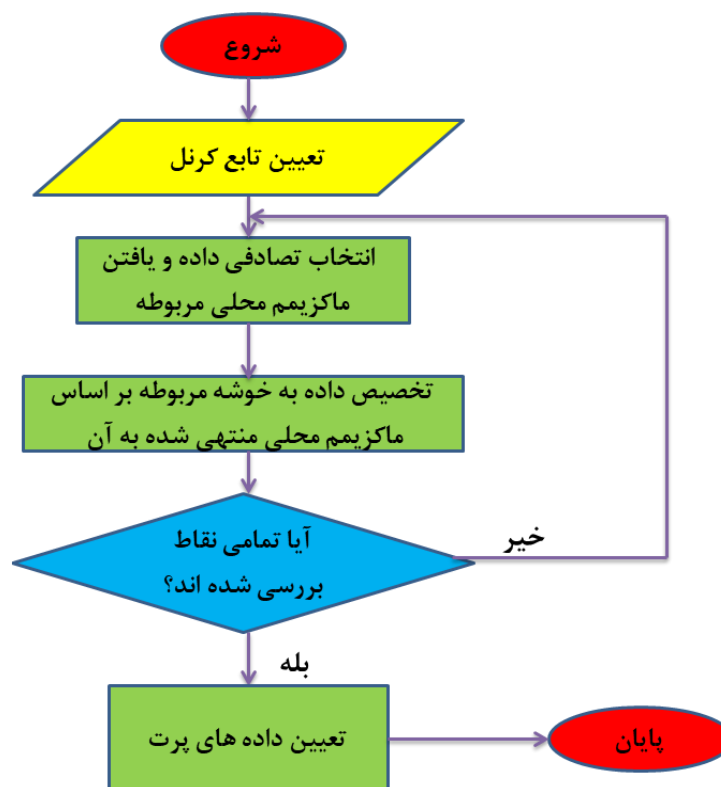
^۱ Kernel

^۲ Band Width

- قابلیت مدل‌سازی خوشه‌های پیچیده و غیرمحدب^۱
- عدم ایجاد ناکارآمدی به جهت وجود داده‌های پرت
- عدم اعمال پیش‌فرض روی شکل خوشه‌ها
- مناسب برای تجزیه و تحلیل داده‌های واقعی، مستقل از برنامه مربوطه

معایب:

- اهمیت تعیین اندازه پنجره
- امکان ادغام خوشه‌ها و یا تشکیل خوشه‌های کم‌عمق در صورت انتخاب نامناسب پنجره
- عدم کنترل روی تعداد خوشه‌ها، برای کاربردهایی که به تعداد خاصی خوشه نیاز است
- کاهش کارایی الگوریتم در مطالعات با ابعاد بالا و در حالتی که تعداد خوشه‌ها به صورت ناگهانی تغییر می‌کند



Mean-Shift [۱۲۶]–[۱۲۸] شکل ۹–۵: روندنمای الگوریتم

۵-۳-۵-۴- الگوریتم BIRCH

¹ Non-convex

در خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، بسته به تجمعی یا تقسیمی بودن روش، در هر مرحله دو خوشه بر اساس فاصله از یکدیگر ادغام یا تفکیک می‌شوند. نکته‌ای که در اینجا لازم به توضیح است نحوه محاسبه فاصله بین دو خوشه می‌باشد. در ادامه به مهم‌ترین روش‌های محاسبه فاصله بین دو خوشه پرداخته می‌شود. با فرض اینکه C_i و C_j دو خوشه با تعداد داده‌های N_i و N_j و در بعد r می‌باشد. همچنین m_i و m_j بیان‌گر میانگین عناصر خوشه‌های i و j بوده که به راحتی قابل محاسبه می‌باشد. انواع روش‌های محاسبه فاصله بین دو خوشه از قرار زیر است [۱۳۰]–[۱۳۴]:

- فاصله کمینه: برابر کم‌ترین فاصله بین دو عنصر از هر دو خوشه است.

$$d_{\min}(C_i, C_j) = \min_{X_i \in C_i, X_j \in C_j} |X_i - X_j| \quad (5-4)$$

- فاصله بیشینه: برابر بیشترین فاصله بین دو عنصر از هر دو خوشه است.

$$d_{\max}(C_i, C_j) = \max_{X_i \in C_i, X_j \in C_j} |X_i - X_j| \quad (5-5)$$

- فاصله میانگین: برابر فاصله بین میانگین‌های دو خوشه است.

$$d_{\text{mean}}(C_i, C_j) = |m_i - m_j| \quad (5-6)$$

- فاصله متوسط: برابر فاصله متوسط بین تمامی عناصر عضو هر دو خوشه مجزا است.

$$d_{\text{avg}}(C_i, C_j) = \frac{1}{N_i N_j} \sum_{X_i \in C_i} \sum_{X_j \in C_j} |X_i - X_j| \quad (5-7)$$

که $||$ بیان‌گر فاصله، مثلاً اقلیدسی است. لازم به ذکر است عمدتاً استفاده از فاصله‌های کمینه و بیشینه سبب حساسیت الگوریتم به داده‌های پرت شده که با استفاده از فواصل میانگین و متوسط این مخاطره را کاهش می‌دهد. حال با استفاده از هر یک از فواصل تعریف شده، می‌توان به خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی داده‌ها پرداخت. برای این کار، در ابتدا فرض می‌شود هر داده یک خوشه است. در هر مرحله، دو خوشه‌ای که نزدیک‌ترین فاصله را به یکدیگر دارند ادغام شده و تشکیل خوشه جدید را می‌دهند. این رویه می‌تواند تا رسیدن به یک خوشه واحد ادامه یابد. برای فرآیند خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی تقسیمی نیز در هر مرحله، دو خوشه از یکدیگر تفکیک می‌شوند. این روند کاملاً عکس رویه خوشه‌بندی تجمعی بوده و با دستیابی به خوشه‌بندی تجمعی و طی کردن عکس مراحل انجام شده، می‌توان به خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی تقسیمی دست یافت. شایان ذکر است این الگوریتم یک روش عمومی و کلی بوده و می‌توان آن را به حالت‌های مختلف تعمیم داد.

BIRCH یک الگوریتم داده‌کاوی بدون نظارت است که جهت خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی روی پایگاه داده‌های حجیم استفاده می‌شود. در اغلب موارد جهت پیاده‌سازی روش مزبور، صرفاً نیاز به یک‌بار مراجعه به پایگاه داده است. مبدعان این روش ادعا کرده‌اند که این الگوریتم اولین شیوه خوشه‌بندی موثر با در نظر گرفتن اثرات نویز می‌باشد؛ اگر چه به مرور زمان این دسته از الگوریتم‌ها افزایش یافته‌اند. عمده الگوریتم‌های ارائه شده قبل از BIRCH، بازدهی مناسبی برای اعمال روی پایگاه داده‌های بزرگ و حجیم نداشتند؛ در حالی که این روش به خوشه‌بندی داده‌های حجیم با کیفیت بالا و در عین کاهش هزینه‌های پردازش کامپیوتری می‌پردازد. در الگوریتم مذکور، تمامی داده‌ها و خوشه‌های موجود در هر مرحله مورد بازنگری و مراجعه قرار نمی‌گیرند که این امر سبب استفاده بهینه از حافظه در دسترس و کاهش هزینه‌های پردازش کامپیوتری

می‌شود. در این الگوریتم و در هر تصمیم خوشه‌بندی و مرحله جدید، تمامی داده‌ها و خوشه‌ها به یک چشم بررسی شده و برای خوشه‌ها، وزن ابتکاری با توجه به فاصله داده‌ها از یکدیگر در نظر گرفته نمی‌شود [۱۳۰]–[۱۳۴].

این الگوریتم در حقیقت در قسمت اول خود از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی به عنوان یک گام اولیه استفاده کرده و در گام بعدی با استفاده از نتایج به دست آمده در گام اول و نیز یک روش کلی خوشه‌بندی، به جداسازی خوشه‌ها از یکدیگر می‌پردازد. لذا الگوریتم BIRCH یک روش خوشه‌بندی ترکیبی می‌باشد. با فرض اینکه داده‌ها (X_i) به تعداد N و در فضای M بعدی وجود دارند. در این الگوریتم یک مفهوم جدید به اسم ویژگی خوشه‌بندی^۱ تعریف می‌شود. CF یک بردار سه بعدی است که حاوی خلاصه اطلاعات مربوط به هر خوشه است [۱۳۰]–[۱۳۴].

$$CF = (N_C, \vec{LS}, \vec{SS}) \quad (5-8)$$

که در آن N_C تعداد اعضای خوشه مربوطه است. همچنین برای هر خوشه C_i داریم،

$$\vec{LS}_{C_i} = \sum_{X_i \in C_i} \vec{X}_i \quad (5-9)$$

$$\vec{SS}_{C_i} = \sum_{X_i \in C_i} (\vec{X}_i)^2 \quad (5-10)$$

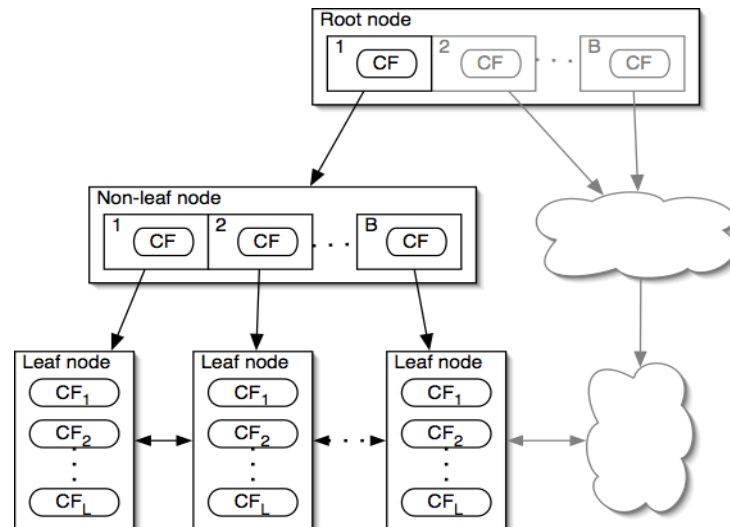
در صورتی که دو خوشه C_i و C_j با یکدیگر ادغام شوند، به راحتی ویژگی خوشه‌بندی مربوط به خوشه جدید برابر مجموع ویژگی خوشه‌بندی مربوط به دو خوشه i و j خواهد بود. این الگوریتم از یک ساختمان داده درختی جهت ذخیره‌سازی ویژگی خوشه‌ها، به نام درخت ویژگی خوشه^۲ استفاده می‌کند. این درخت به صورت پویا ساخته می‌شود بدین معنی که در هر لحظه یک داده وارد شده و درخت تکمیل می‌گردد. در این الگوریتم سه پارامتر B ، L و T وجود دارد که تعیین کننده اندازه درخت ویژگی خوشه می‌باشد. یک CF-Tree دارای دو نوع گره برگ^۳ و غیر برگ^۴ است. هر گره غیر برگ می‌تواند حداکثر به تعداد B فرزند داشته باشد که هر فرزند، نماینده ویژگی خوشه C_i می‌باشد. علاوه بر این می‌توان گفت که هر گره غیر برگ، خوشه ساخته‌شده از زیرخوشه‌های فرزندان مربوط به خود می‌باشد. گره‌های برگ می‌توانند شامل حداکثر L خوشه به نام خوشه اولیه باشند؛ به طوری که هر خوشه اولیه دارای یک ویژگی خوشه‌بندی CF_i می‌باشد. در حقیقت گره‌های برگ نماینده خوشه‌هایی هستند که هر کدام از داده‌های ورودی تشکیل شده‌اند. در شکل ۵-۱۰ نمونه‌ای از CF-Tree قابل مشاهده است [۱۳۰]–[۱۳۴].

¹ Clustering Feature

² CF-Tree

³ Leaf node

⁴ Non-leaf node



شکل ۱۰-۵: نمونه‌ای از CF-Tree

T نیز یک حد آستانه روی شعاع یا قطر هر خوشه اولیه گره‌های برگ است. باید توجه نمود که اندازه T با اندازه درخت رابطه عکس دارد، لذا اگر در حین تشکیل درخت، الگوریتم با کمبود حافظه مواجه شد، بایستی مقدار T را افزایش داد تا یک درخت کوچک‌تر از ویژگی خوشه‌بندی‌ها و داده‌های باقیمانده ساخته شود. شعاع یا قطر برای یک خوشه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\vec{X}_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{X}_i}{N} \quad (5-11)$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\vec{X}_i - \vec{X}_0)^2}{N}} \quad (5-12)$$

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\vec{X}_i - \vec{X}_j)^2}{N(N-1)}} \quad (5-13)$$

شایان ذکر است که مقادیر بالا بر اساس ویژگی خوشه‌بندی خوشه مربوطه نیز قابل محاسبه است. اولین قدم ساخت CF-Tree است. همان‌طور که گفته شد در هر مرحله یک داده وارد درخت می‌شود. داده جدید در نزدیک‌ترین خوشه اولیه و در گره برگ مربوطه قرار می‌گیرد؛ اما اگر قطر این شبیه‌ترین ویژگی خوشه پس از اضافه شدن داده جدید به آن، شرط T را نقض کرد، بایستی آن خوشه به وسیله تشکیل یک خوشه اولیه جدید در گره مورد نظر افزاز شود؛ برای این منظور و پس از اضافه شدن داده جدید به خوشه مورد نظر، دو داده عضو خوشه که بیشترین فاصله از هم را دارند، جداگانه در این خوشه و خوشه جدید قرار گرفته و داده‌های مربوط به خوشه مورد نظر دوباره بین این دو خوشه، بر حسب فاصله خود تا این دو خوشه تقسیم می‌شوند. همچنین در صورت تجاوز اندازه گره‌های برگ و غیر برگ از L و B مربوطه، با تشکیل گره جدید و تخصیص دادن هر یک از خوشه‌های مربوط به آن گره بر اساس معیار نزدیکی به این گره و گره جدید تشکیل شده، می‌توان به ساخت CF-Tree ادامه داد. باید توجه نمود در صورت شکستن یک گره برگ، گره برگ جدید زیر مجموعه گره غیربرگ حاوی گره برگ افزاز شده قرار می‌گیرد. در هر مرحله نیز به دلیل وجود ارتباط بین گره‌های برگ مختلف و خوشه‌های موجود در هر گره برگ، امکان تغییر گره

برگ برای هر خوشه اولیه و حتی ادغام با خوشه اولیه از گره برگ دیگر امکان‌پذیر است. این موضوع می‌تواند باعث افزایش کیفیت خوشه‌بندی شود. طبیعی است با اضافه شدن داده جدید به CF-Tree، تمامی ویژگی خوشه‌بندی‌های تاثیر گرفته از اضافه شدن داده جدید، به‌روزرسانی می‌شود. یادآور می‌شود که با استفاده از CF_i ها به راحتی می‌توان نزدیک‌ترین خوشه اولیه به داده ورودی و یا میزان شباهت یا فاصله دو خوشه اولیه را محاسبه کرد و لزوماً نیاز به مراجعه به تک‌تک داده‌ها نمی‌باشد. پس از تشکیل CF-Tree، می‌توان نسبت به ادغام خوشه‌های اولیه با یکدیگر جهت کاهش اندازه CF-Tree به دست آمده، اقدام کرد. حال می‌توان مثلاً با استفاده از الگوریتم سلسله‌مراتبی تجمعی، نسبت به خوشه‌بندی خوشه‌های اولیه تمامی گره‌های برگ اقدام کرد. یعنی ابتدا داده‌ها را در خوشه‌های اولیه تقسیم‌بندی کرده و سپس با استفاده از یک الگوریتم خوشه‌بندی عمومی به خوشه‌بندی این خوشه‌های اولیه پرداخته می‌شود. هر چند عمل خوشه‌بندی به پایان رسیده است، اما می‌توان یک گام دیگر را برای بهبود الگوریتم انجام داد. برای این کار و پس تعیین خوشه‌ها و مراکز آن‌ها، می‌توان بار دیگر تمامی داده‌ها را به خوشه‌های مختلف، بر اساس معیار نزدیکی به مرکز خوشه‌های به دست آمده در مرحله قبل تخصیص داد. همچنین می‌توان با تعریف یک حد آستانه فاصله، نسبت به شناسایی داده‌های پرت و حذف آن‌ها اقدام کرد. بنابراین الگوریتم BIRCH به طور خلاصه دارای گام‌های زیر است [۱۳۰]–[۱۳۴]:

۱- تعیین پارامترهای T و B, L

۲- ساخت CF-Tree، اگر پیش از در نظر گرفتن تمامی داده‌ها با کمبود حافظه مواجه شد، با افزایش حد آستانه T اقدام به ساخت CF-Tree نمایید.

۳- ترکیب خوشه‌های اولیه نزدیک به هم

۴- بهره‌گیری از یک الگوریتم خوشه‌بندی پایه، نظیر الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی تجمعی و خوشه‌بندی خوشه‌های اولیه به دست آمده

۵- باز توزیع داده‌ها بر اساس فاصله تا مراکز خوشه‌های به دست آمده در مرحله چهار و تعیین داده‌های پرت

روندنمای الگوریتم BIRCH در شکل ۱۱–۵ قابل مشاهده است.

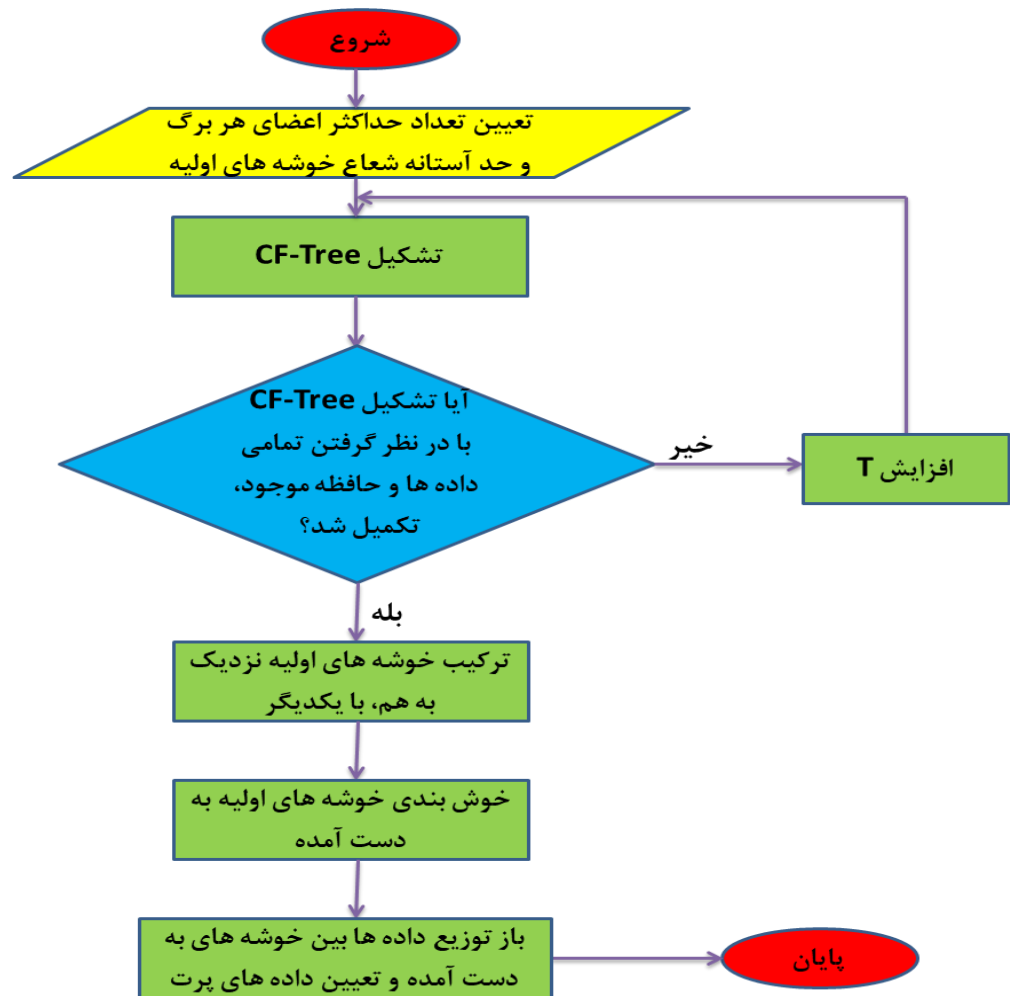
مزایا و معایب این الگوریتم نیز به صورت ذیل است [۱۳۵]:

مزایا:

- قابلیت خوشه‌بندی پایگاه داده‌های حجیم و وسیع
- عدم نیاز به پیاده‌سازی دوباره، در صورت ورود یک داده جدید به پایگاه داده
- عمدتاً نیاز به یک بار مراجعه به پایگاه داده دارد
- قابلیت افزایش کیفیت خوشه‌بندی
- خطی بودن پیچیدگی محاسباتی نسبت به تعداد داده‌ها

معایب:

- قابلیت پیاده‌سازی صرفاً برای داده‌های عددی
- امکان پایین بودن کیفیت خوشه‌بندی برای خوشه‌های غیر کروی



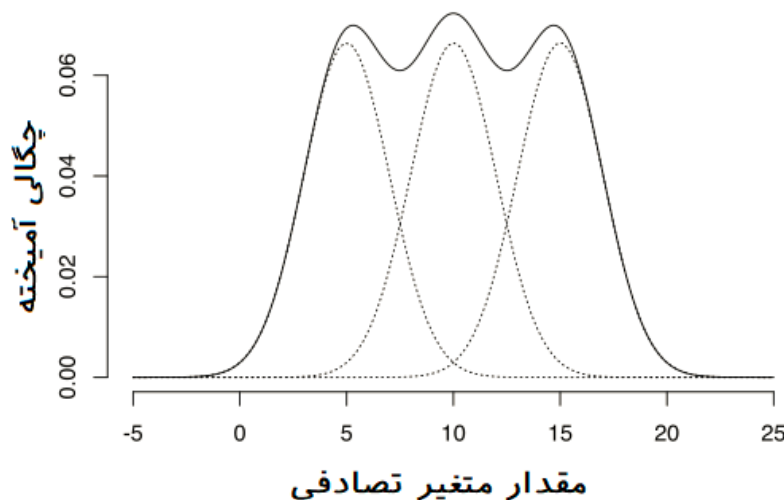
[۱۳۵] BIRCH شکل ۱۱-۵: روندنمای الگوریتم

۵-۳-۵- مدل آمیخته گاوسی با استفاده از بیشینه‌سازی انتظار

اگرچه الگوریتم بیشینه‌سازی امید یک الگوریتم عمومی است و می‌توان برای هر مدل و توزیعی استفاده نمود، ولی عمدتاً به جهت عمومیت توزیع گاوسی، در این بخش فرض می‌شود هر خوشه از مدل گاوسی پیروی کرده و با استفاده از مدل مولد مناسب، الگوریتم مورد نظر به دنبال پیدا کردن پارامترهایی برای برای وصف مدل گاوسی داده‌ها و تعلق آن‌ها به خوشه‌های مختلف است؛ اگر چه همان‌طور که گفته شد گاوسی بودن توزیع خوشه‌ها لزومی نداشته و الگوریتم بیشینه‌سازی انتظار حتی برای برآورد پارامترهای مدل‌های مختلف آماری نظیر مدل مخفی مارکوف^۱، که بعضاً در خوشه‌سازی استفاده می‌شود، نیز کارآمد می‌باشد. شایان ذکر است چنین روشی در زمره خوشه‌بندی بر مبنای مدل قرار

¹ Hidden Markov Model

می‌گیرد. پارامترهای مورد نظر در این روش با استفاده از الگوریتم بیشینه‌سازی انتظار محاسبه می‌شوند. این الگوریتم دو بخش دارد. بخش اول انتظار است که در این قسمت، الگوریتم می‌خواهد بیابد که هر کدام از نمونه‌ها به کدام توزیع گاوسی بیشتر نزدیک هستند و در واقع احتمال عضویت یک نمونه را به تابع گاوسی پیدا کند. بحث EM در الگوریتم K-Means نیز وجود دارد. در الگوریتم K-Means در هر تکرار از این الگوریتم، هر کدام از نمونه‌ها به نزدیک‌ترین مرکز خوشه تعلق پیدا می‌کردند. این یعنی الگوریتم انتظار دارد که این نمونه به یک خوشه خاص تعلق داشته باشد. حال در GMM در هر بار تلاش، الگوریتم انتظار دارد تا احتمال عضویت یک نمونه را به هر کدام از توزیع‌های گاوسی مورد نظر نسبت دهد؛ بخش اول در این مرحله تمام می‌شود. بخش دوم روش EM در واقع بیشینه‌سازی است. در الگوریتم K-Means در هر دور نیاز بود که مرکز خوشه تغییر یابد تا شباهت مرکز خوشه با تمامی نمونه‌های داخل آن خوشه بیشینه شود. در الگوریتم GMM نیز پارامترهای موجود که شامل وزن، میانگین و کواریانس می‌باشند؛ در هر مرحله به‌روزرسانی می‌شود تا در نهایت توزیع گاوسی برای هر کدام از خوشه‌ها تشکیل شده و در واقع شباهت توزیع داده‌ها به صورت گاوسی بیشینه شود. به بیان دیگر در این شیوه خوشه‌بندی، فرض بر این است که هر خوشه، از داده‌هایی با توزیع گاوسی تشکیل شده و در حالت کلی نیز داده‌ها نمونه‌ای از توزیع آمیخته گاوسی هستند. هدف از خوشه‌بندی مدل آمیخته گاوسی، برآورد پارامترهای توزیع هر یک از خوشه‌ها و تعیین برچسب برای مشاهدات است. به این ترتیب مشخص می‌شود که هر مشاهده به کدام خوشه تعلق دارد. برای نمونه، در شکل ۱۲-۵ یک توزیع آمیخته گاوسی تک بعدی به نمایش درآمده است [۱۳۶].



شکل ۱۲-۵: یک توزیع آمیخته گاوسی تک بعدی نوعی [۱۳۶]

روش‌های خوشه‌بندی مانند K-Means قادر به شناسایی خوشه‌های کروی هستند و اگر ساختار خوشه‌ها خارج از این شکل باشد، عمل خوشه‌بندی توسط این الگوریتم‌ها به خوبی صورت نمی‌گیرد. به عنوان یک راه‌حل در چنین مواردی می‌توان از خوشه‌بندی بر مبنای مدل یا همان مدل آمیخته گاوسی استفاده کرد. البته با توجه به ساختار خوشه‌های می‌توان از توزیع‌های دیگری نیز در این میان کمک گرفت ولی به طور معمول فرض می‌شود که مشاهدات مربوط به خوشه‌ها دارای توزیع گاوسی هستند. یک مدل آمیخته گاوسی با نماد ریاضی به شکل زیر نوشته می‌شود. در اینجا منظور از π_k وزن توزیع خوشه k ام یا فراوانی مشاهدات از آن توزیع است [۱۳۷]:

$$p(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(x | \mu_k, \Sigma_k) \quad (۱۴-۵)$$

در اینجا K تعداد خوشه‌ها است. در نهایت، طی این روش بایستی تابع درست‌نمایی زیر که با در نظر گرفتن تمامی داده‌ها بایستی نوشته شود، بیشینه‌سازی شود:

$$P(X | \mu, \Sigma, \pi) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \pi_k N(x_n | \mu_k, \Sigma_k) \quad (5-15)$$

که N تعداد داده‌ها می‌باشد. که عمدتاً به جهت سادگی مسئله، با توجه به محدب بودن تابع لگاریتم به بیشینه‌سازی تابع زیر پرداخته می‌شود:

$$L = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K E[z_{nk}] \{ \ln \pi_k + \ln N(x_n | \mu_k, \Sigma_k) \} \quad (5-16)$$

که در آن $E[z_{nk}]$ برابر احتمال تعلق x_n به خوشه k ام می‌باشد. متأسفانه وجود پارامترهای زیاد در این تابع مانند: میانگین، واریانس و همچنین کوواریانس بین خوشه‌ها، امکان بیشینه‌سازی آن را با روش تحلیلی نمی‌دهد. بنابراین در چنین مواقعی استفاده از تکنیک‌های عددی مانند الگوریتم EM کارساز است. همان طور که گفته شد این فرآیند در دو گام انجام می‌شود. در گام اول (E-step) یا گام متوسط‌گیری، هدف برآورد احتمال تعلق x_n به خوشه k ام به شرط آن که وزن (π) ، میانگین‌ها (μ) و ماتریس کوواریانس (Σ) توزیع آمیخته گاوسی است. برای این کار ابتدا یک حدس اولیه برای این پارامترها زده می‌شود، سپس گام‌های بعدی به ترتیب برداشته می‌شوند. شایان ذکر است حدس‌های اولیه را می‌توان به وسیله الگوریتم K-Means به دست آورد. به این معنی که برای خوشه‌های حاصل از الگوریتم K-Means، میانگین، ماتریس کوواریانس و وزن‌ها محاسبه می‌شود. خاظر نشان می‌شود که منظور از وزن π_k ، درصدی از داده‌ها است که در خوشه K ام قرار دارند. در گام دوم (M-step) با استفاده از احتمال تعلق x_n ها به خوشه‌های مختلف، سعی می‌شود تا تابع درست‌نمایی نسبت به پارامترهای وزن، میانگین و کواریانس توزیع آمیخته گاوسی بیشینه شود. این مراحل گام E و گام M تا زمانی که الگوریتم همگرا شود ادامه خواهد داشت. همگرایی زمانی خواهد بود که مقدار تابع درست‌نمایی یا به عبارت دیگر پارامترهای وزن، میانگین و ماتریس کواریانس توزیع آمیخته گاوسی مربوط به تمامی خوشه‌ها تغییر نکند. به این ترتیب الگوریتم EM علاوه بر برآورد پارامترهای توزیع آمیخته گاوسی، احتمال تعلق داده‌ها به هر یک از خوشه‌ها را نیز مشخص می‌کند. با توجه به نکات بالا، روند خوشه‌بندی مدل آمیخته گاوسی با استفاده از بیشینه‌سازی انتظار از قرار ذیل است [۱۳۷]–[۱۴۲]:

۱- انتخاب اولیه برای وزن، میانگین و ماتریس کواریانس توزیع خوشه‌ها

۲- محاسبه احتمال تعلق تمامی داده‌ها به هر یک از خوشه‌ها به صورت زیر:

$$P(C_j | x_n) = \frac{|\Sigma_j(t)|^{-\frac{1}{2}} e^{\eta_j} \pi_j(t)}{\sum_{k=1}^K |\Sigma_k(t)|^{-\frac{1}{2}} e^{\delta_k} \pi_k(t)} \quad (5-17)$$

که در آن:

$$\eta_j = -\frac{1}{2}(x_n - \mu_j(t))^T \Sigma_j^{-1}(t)(x_n - \mu_j(t)) \quad (5-18)$$

$$\delta_k = -\frac{1}{2}(x_n - \mu_k(t))^T \Sigma_k^{-1}(t)(x_n - \mu_k(t)) \quad (5-19)$$

t بیان گر مرحله t ام از روند حل تکراری است. همچنین نماد $|\Sigma|$ ، بیان گر دترمینان ماتریس کواریانس Σ می‌باشد.

۳- برآورد پارامترهای توزیع آمیخته گاوسی برای تمامی خوشه‌ها به صورت زیر:

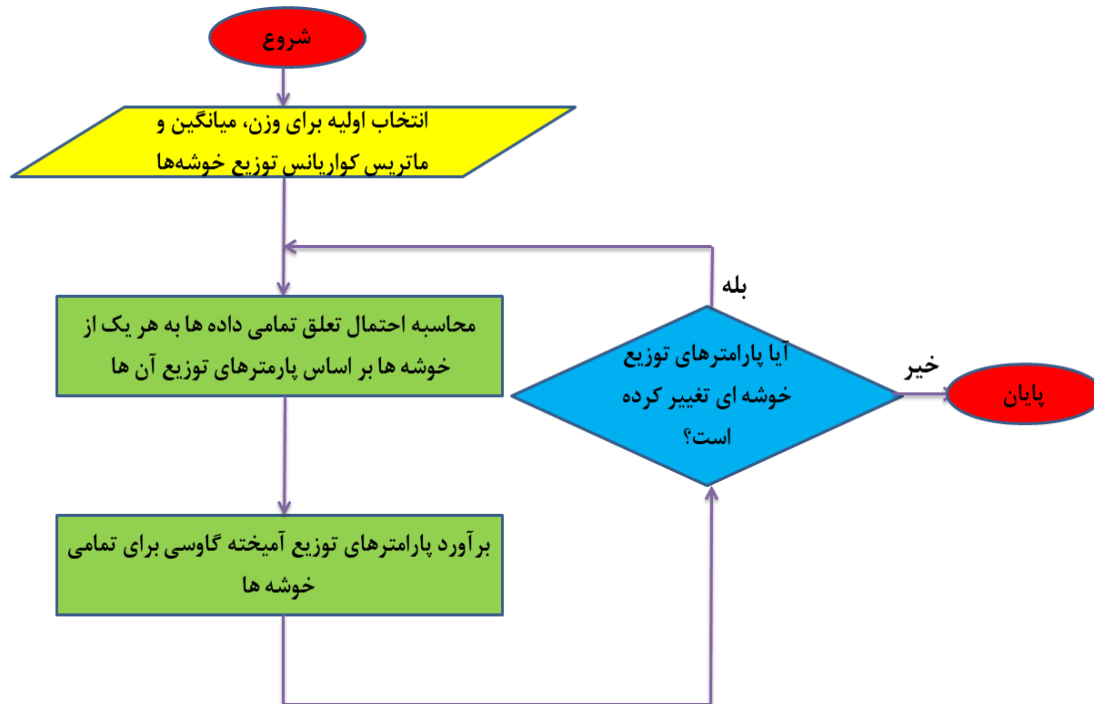
$$\mu_j^{new}(t+1) = \frac{\sum_{n=1}^N P(C_j | x_n) x_n}{\sum_{n=1}^N P(C_j | x_n)} \quad (5-20)$$

$$\Sigma_j^{new}(t+1) = \frac{\sum_{n=1}^N P(C_j | x_n) (x_n - \mu_j^{new}(t+1))(x_n - \mu_j^{new}(t+1))^T}{\sum_{n=1}^N P(C_j | x_n)} \quad (5-21)$$

$$\pi_j^{new}(t+1) = \frac{\sum_{n=1}^N P(C_j | x_n)}{N} \quad (5-22)$$

۴- تکرار مراحل ۲ و ۳ تا همگرایی روش

شایان ذکر است در صورتی که بعد داده‌ها برابر m باشد، میانگین خوشه‌ها یک بردار به طول m و ماتریس کواریانس خوشه‌ها یک ماتریس $m \times m$ می‌باشد. در این حالت η_j و δ_k یک عدد حقیقی خواهند بود. در این الگوریتم پس از همگرایی، هر عنصر با یک احتمالی، به یک خوشه که پارامترهای مربوط به توزیع گاوسی آن نیز محاسبه شده است، تعلق می‌گیرد. با این تفسیر، الگوریتم مزبور یک تکنیک خوشه‌بندی نرم می‌باشد. طبیعی است اگر بخواهیم هر داده را به یک خوشه تخصیص دهیم، می‌توانیم ببینیم که احتمال تعلق آن داده به کدام خوشه بیشتر است. در شکل ۱۳-۵ روندنمای این الگوریتم مشاهده می‌شود [۱۳۷]–[۱۴۲].



EM [۱۴۲]–[۱۳۷] با استفاده از GMM شکل ۱۳–۵: روندنمای الگوریتم

مزایا و معایب این الگوریتم نیز به صورت ذیل است [۱۴۰]:

مزایا:

- عمومیت بیشتر نسبت به خوشه‌بندی‌های فازی
- با تعداد کمی پارامتر، خوشه‌ها مشخص می‌شوند
- قابلیت ارضای فرض‌های آماری مدل‌های عمومی

معایب:

- همگرایی به بهینه محلی
- هزینه محاسباتی بالا در صورت بالا بودن تعداد توزیع‌ها
- دشواری تخمین تعداد خوشه‌ها
- نیاز به مجموعه داده با حجم بالا

۴-۵- تکنیک قوانین انجمنی (وابستگی)

در داده‌کاوی، یادگیری قوانین وابستگی یا قوانین انجمنی، یک روش مناسب برای یافتن روابط جذاب بین متغیرهای موجود در پایگاه داده‌های بزرگ است. شایان ذکر است بر خلاف دنباله کاوی^۱، در یادگیری قانون وابستگی، ترتیب چه در میان آیتم‌ها و چه در میان تراکنش‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در این گونه مسائل فرض می‌شود که N تراکنش به صورت ترکیبی از M آیتم موجود، وجود دارد. در صورتی که آیتم i ام در تراکنش z ام وجود داشته باشد، کمیت مربوط به آن آیتم در این تراکنش برابر یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. بنابراین داده‌های موجود در این روش، یک جدول بوده که آیتم‌های موجود در N تراکنش را اعلام می‌کند. در این بخش از الگوریتم‌های یادگیری ماشین با دو مفهوم مهم سروکار داریم که در زیر به آن‌ها اشاره شده است [۱۴۳].

- پشتیبان^۲: پشتیبان آیتم X یا $\text{supp}(X)$ بیان‌گر نسبت تراکنش‌های حاوی آیتم X به تعداد کل تراکنش‌ها است. به طور مشابه برای مجموعه آیتم $\{X_1, X_2, \dots, X_r\}$ نیز پشتیبان قابل محاسبه است.
- اطمینان^۳: اطمینان $(X \Rightarrow Y)$ conf ، بیان‌گر آن است که چه درصدی از تراکنش‌های حاوی X ، شامل آیتم Y نیز می‌باشند. در اینجا نیز X و Y لزوماً یک تک آیتم نبوده و می‌توانند مجموعه‌ای از آیتم‌ها باشند.

الگوریتم‌های مختلفی در زمینه کاوش قواعد انجمنی جهت دستیابی به این قوانین وجود دارند، که مهم‌ترین آن‌ها از قرار ذیل است:

- Apriori
- FP-Growth

در ادامه به این دو الگوریتم مهم در زمینه کاوش قواعد انجمنی پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که این الگوریتم‌ها در مقایسه با دیگر تکنیک‌های یادگیری بدون نظارت کاربرد زیادی ندارند.

۱-۴-۵- الگوریتم Apriori

الگوریتم Apriori یکی از روش‌های پر کاربرد برای کاوش مجموعه اقلام مکرر و قواعد وابستگی است. پیش از آغاز بحث اصلی، مفهوم مجموعه اقلام مکرر^۴ و مجموعه اقلام کاندید شرح داده می‌شود [۱۱۴]، [۱۴۴].

- یک مجموعه اقلام مکرر، مجموعه اقلامی است که پشتیبان آن بیشتر از حداقل پشتیبان تعریف شده توسط کاربر باشد. مجموعه اقلام مکرر با L_k علامت‌گذاری شده که در آن k اندازه مجموعه اقلام است.
- یک مجموعه اقلام کاندید، مجموعه اقلام مکرر بالقوه است که با C_k علامت‌گذاری شده که در آن k اندازه مجموعه اقلام است.

¹ Sequence Mining

² Support

³ Confidence

⁴ Frequent

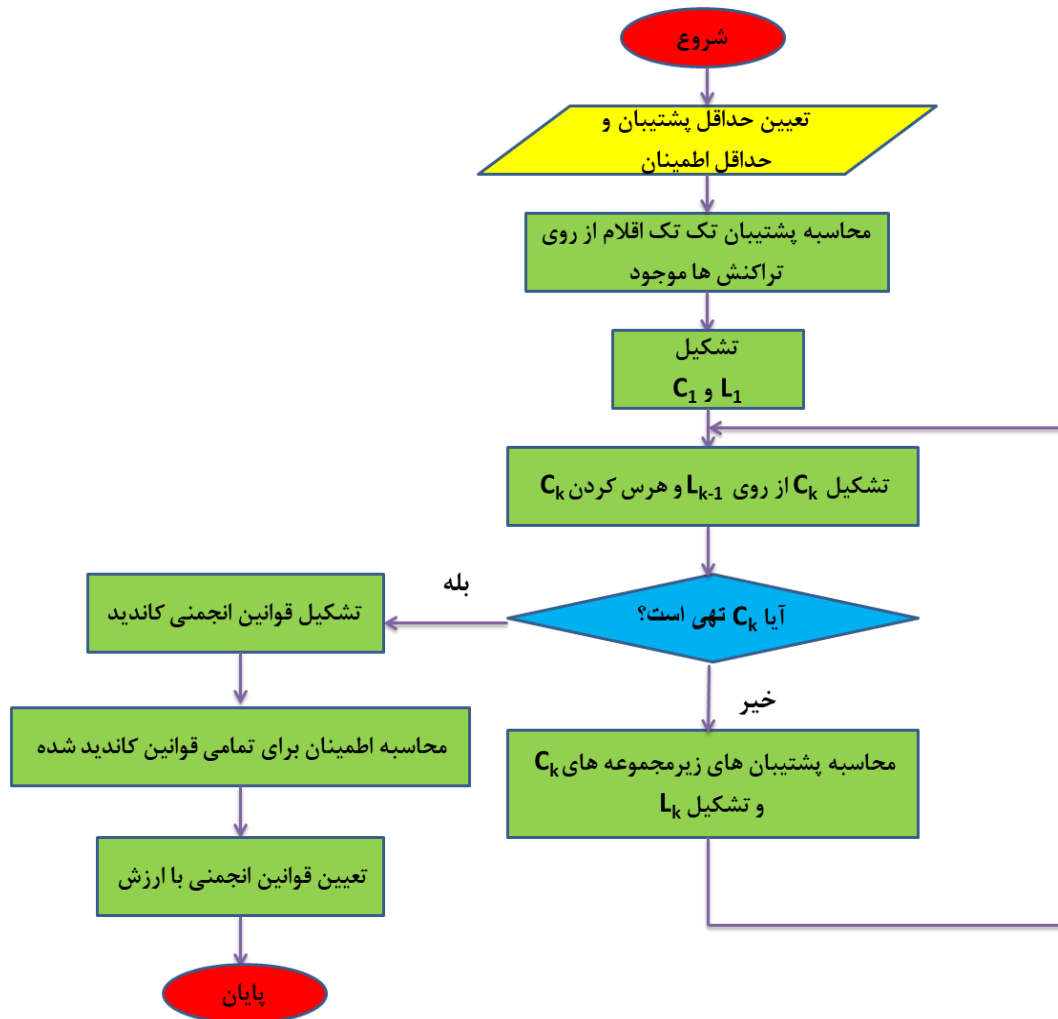
این الگوریتم توسط اگراوال^۱ و همکاران، در مرکز تحقیقات IBM Almaden کشف شد و از آن می‌توان برای تولید کلیه مجموعه اقلام مکرر استفاده کرد. در این الگوریتم ابتدا یک پارامتری تحت عنوان پشتیبان کمینه تعریف می‌شود. مجموعه اقلام مکرر که در نهایت منجر به تعیین قوانین انجمنی می‌شوند، بایستی پشتیبانی حداقل برابر با این پارامتر داشته باشند. در قدم اول، پشتیبان مجموعه اقلام کاندید را در C_1 ذخیره کرده و سپس با بررسی پشتیبان مربوطه به هر کدام از آیت‌ها، مجموعه اقلام تکی مکرر در L_1 ذخیره می‌شود. پس از این مرحله به طور کلی بایستی مجموعه اقلام کاندید در C_k با استفاده از مجموعه اقلام مکرر در L_{k-1} به وجود آید. این کار با ترکیب دو زیر مجموعه از L_{k-1} انجام می‌شود. در مرحله دوم برای تعیین C_2 تمامی ترکیبات دوتایی از زیر مجموعه‌های L_1 در نظر گرفته می‌شود. اما برای C_3 و بالاتر، آن ترکیبات K تایی از دو زیر مجموعه L_{k-1} در نظر گرفته می‌شوند که $K-2$ تا از آیت‌ها در آن دو زیر مجموعه مشترک باشند. پس از تشکیل C_k ، برای تمامی زیر مجموعه‌های K تایی، تمامی زیر مجموعه‌های $K-1$ تایی تشکیل می‌شود. در این مرحله هر زیر مجموعه‌ای از C_k که حداقل یک زیر مجموعه $K-1$ تایی آن در مجموعه L_{k-1} موجود نباشد، از C_k حذف می‌شود. به این عمل هرس کردن مجموعه اقلام کاندید گفته می‌شود. طبیعی است در C_2 هرسی صورت نمی‌گیرد؛ چرا که تمامی اقلام L_1 مکرر بوده و هر ترکیب دوتایی از آن‌ها نیز مکرر خواهد بود. پس از هرس کردن C_k ، اقدام به تعیین پشتیبان زیر مجموعه‌های آن کرده و بر اساس حداقل پشتیبان تعیین شده، اقدام به تشکیل مجموعه اقلام مکرر L_k می‌کنیم. این رویه تا آنجایی ادامه می‌یابد که مجموعه اقلام کاندید C_k تهی شود. حال پس از اتمام این مرحله، تعدادی از مجموعه‌های L_k داریم که هر کدام از آن‌ها زیر مجموعه‌هایی حاوی K آیت هستند؛ علاوه بر این تمامی این زیر مجموعه‌ها مکرر اند؛ یعنی حداقل به تعداد حداقل پشتیبان تعریف شده تراکنش وجود دارد که تمامی آیت‌های موجود در این زیر مجموعه‌ها، در آن تراکنش‌ها وجود دارند. اکنون بایستی به استخراج قواعد انجمنی اقدام کرد. بدین منظور، هر زیرمجموعه‌ای از هر L_k برای $K=2$ و بالاتر را به دو قسمت تقسیم می‌کنیم. بایستی توجه شود که تمامی حالات این تقسیم دو بخشی بایستی در نظر گرفته شود. برای مثال یک زیر مجموعه از L_3 که حاوی سه آیت است، شش حالت بایستی در نظر گرفته بشود، زیرا $3 = \binom{3}{1} + \binom{3}{2}$. برای یک زیر مجموعه از L_4 که چهار آیت است، بیست حالت بایستی در نظر گرفته بشود. زیرا: $20 = \binom{4}{1} + 2\binom{4}{2} + \binom{4}{3}$. خاطر نشان می‌شود که $conf(X \Rightarrow Y)$ با $conf(Y \Rightarrow X)$ برابر نمی‌باشد. لذا بایستی هر دوی این قوانین انجمنی را در نظر گرفت. این حالت مختلف در حقیقت کاندیدای قوانین انجمنی هستند که دارای ارزش و قدرت بالا می‌باشند. سپس برای تمامی زیر مجموعه‌های تمامی L_k ها، به محاسبه $conf(X \Rightarrow Y)$ پرداخته می‌شود. در این قسمت مشابه پارامتر حداقل پشتیبان، یک پارامتر حداقل اطمینان نیز تعریف می‌شود. در نهایت آن دسته از قوانینی را از مجموعه قوانین کاندید به عنوان قوانین انجمنی با ارزش انتخاب می‌شوند که شرط داشتن حداقل اطمینان را پیدا نمایند [۱۴۴]–[۱۴۶].

به طور خلاصه، فرآیند الگوریتم Apriori به صورت زیر است [۱۴۴]–[۱۴۶]:

- ۱- تعیین حداقل پشتیبان و حداقل اطمینان
- ۲- محاسبه پشتیبان تک‌تک اقلام از روی تراکنش‌ها موجود
- ۳- تشکیل C_1 و L_1
- ۴- تشکیل C_k از روی L_{k-1} و هرس کردن C_k
- ۵- محاسبه پشتیبان‌های زیرمجموعه‌های C_k و تشکیل L_k
- ۶- انجام مراحل ۴ و ۵ تا زمانی که مجموعه C_k تهی شود
- ۷- تقسیم تمامی زیر مجموعه‌های تمامی L_k ها به دو قسمت برای $K > 1$ و تشکیل مجموعه قوانین کاندید

¹ Agrawal

- ۸- محاسبه اطمینان برای تمامی قوانین کاندید شده
 ۹- تعیین قوانین انجمنی با ارزش بر اساس حداقل اطمینان تعریف شده
 در شکل ۱۴-۵ روندنمای این الگوریتم قابل مشاهده است.



شکل ۱۴-۵: روندنمای الگوریتم Apriori [۱۴۴]–[۱۴۶]

مزایا و معایب الگوریتم Apriori به صورت ذیل می‌باشد [۱۴۴]–[۱۴۶]:

مزایا:

- مصرف حافظه پایین
- پیاده‌سازی آسان
- پایین بودن تعداد مجموعه اقلام و قوانین نهایی جهت بررسی، به سبب هرس کردن مجموعه کاندیدها

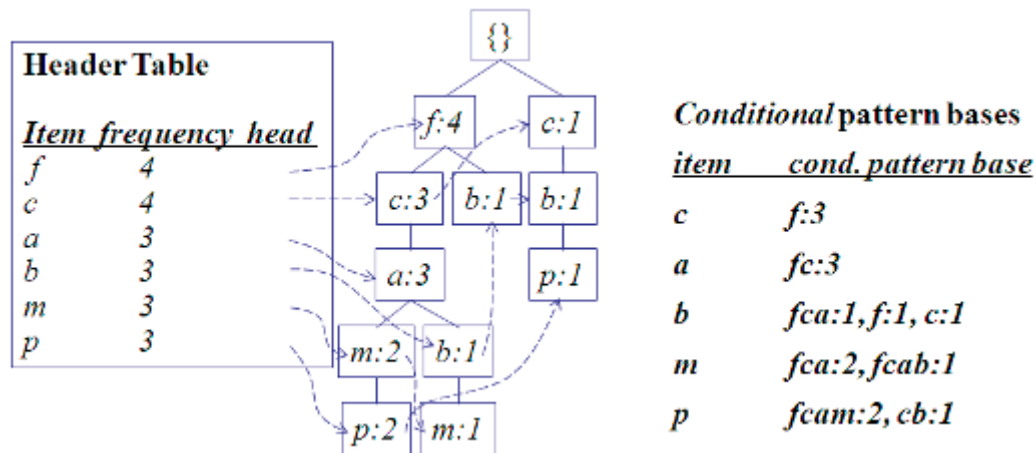
معایب:

- بالا بودن تعداد مراجعات به پایگاه داده جهت محاسبه پشتیبان مجموعه‌ها
- مناسب برای پایگاه داده‌های کوچک
- هزینه محاسباتی بالا
- شناسایی قوانین جعلی و کم ارزش در صورت کاهش آستانه پشتیبان

۲-۴-۵- الگوریتم FP-Growth

این الگوریتم از الگوریتم‌های داده کاوی جهت کاوش اقلام مکرر بر روی پایگاه داده‌های عظیم می‌باشد که طی دوبار پیمایش درون پایگاه داده، اقلام تکرار شونده را استخراج می‌کند. در اولین پیمایش ابتدا اقلام تکرار شونده از مرتبه یک استخراج شده و سپس بر اساس میزان پشتیبانی آن‌ها به ترتیب نزولی، در جدولی به نام جدول سرآیند^۱ به همان ترتیب قرار می‌گیرند. جدول سرآیند نه تنها شامل آیتم‌ها و مقدار پشتیبانی آنهاست، بلکه شامل یک اشاره‌گر به همان اقلام در درخت FP-tree می‌باشد. طبیعی است که در این قسمت آیتم‌هایی که پشتیبانی کمتر از پشتیبان حداقل دارند، حذف می‌شوند. سپس با رجوع به پایگاه داده، آیتم‌های تراکنش‌ها بر اساس جدول سرآیند بر اساس میزان پشتیبانی از چپ به راست به صورت نزولی مرتب می‌شوند. اکنون بایستی اقدام به تشکیل FP-tree نماییم. در این قسمت، یک ساختمان داده فشرده به نام FP-tree توسعه داده شده که در آن اطلاعات کامل ولی نه زائد، برای کاوش اقلام مکرر فشرده می‌شود. در این روش، یک پایگاه داده بزرگ در ساختار فشرده درخت الگو فشرده شده و به این ترتیب از رجوع‌های پرهزینه به پایگاه داده جلوگیری می‌شود. این روش از طریق متدلوژی تقسیم و حل عمل می‌کند. همچنین از تولید کاندید نیز خودداری می‌کند. در پیمایش دوم، آیتم‌های هر تراکنش به عنوان یک مسیر درون درخت FP-tree قرار می‌گیرد. ریشه تمامی مسیرها یک گره با نام NULL است. در این مسیر هر آیتم به صورت یک گره با یک برچسب که میزان پشتیبان آن آیتم در آن مسیر است، دیده می‌شود. مسیرهای مجزایی که دارای آیتم‌های اولیه یکسان می‌باشند، در هنگام اضافه شدن به درخت ادغام می‌گردند تا از مصرف حافظه کاسته شود. از آنجا که درخت FP-tree حاوی همه اطلاعات لازم برای کاوش اقلام تکرار شونده می‌باشد، کاوش آن در حقیقت برابر با کاوش کل پایگاه داده است. با تعقیب اشاره‌گر یک آیتم در جدول سرآیند، تمام مسیرهای شامل آن آیتم قابل مشاهده‌اند. پس از تکمیل درخت FP-tree، گام بعدی تشکیل جدول الگوهای شرطی پایه است. در این حالت به مسیرهای از ریشه تا گره والد X اصطلاحاً الگوهای شرطی پایه گفته می‌شود و بر اساس این الگوهای شرطی پایه، FP-growth به طور بازگشتی یک درخت FP-tree جدید ایجاد می‌کند که به آن درخت FP-tree شرطی نیز می‌گویند. با الحاق آیتم X به آیتم‌های تکرار شونده یک مسیر که آیتم X پسوند آنهاست، مجدد یک الگوی شرطی پایه شکل می‌گیرد. با اعمال چنین کاوشی برای هر قلم داده تکرار شونده از مرتبه یک، همه اقلام داده تکرار شونده درون درخت FP-tree کشف می‌شوند. جدول الگوهای شرطی پایه دارای تعدادی سطر به اندازه تعداد آیتم‌هایی است که دارای حداقل پشتیبان می‌باشند. تکمیل جدول با شروع از آیتمی که دارای کمترین پشتیبان است، آغاز می‌شود. در جلوی هر آیتم، تمامی الگوهای شرطی پایه که در حقیقت مسیرهای منتهی به آن آیتم می‌باشند، نوشته می‌شود. نکته بسیار مهم آن است که برای هر یک از این مسیرها بایستی برچسب آن مسیر که بیان‌گر پشتیبان آیتم مورد نظر در آن مسیر است نوشته شود. در شکل ۱۵-۵ یک جدول سرآیند، درخت FP-tree و جدول الگوهای شرطی پایه نمونه نشان داده شده است [۱۴۷]-[۱۵۱].

¹ Header



و جدول الگوهای شرطی پایه [۱۴۷]–[۱۵۱] FP-tree شکل ۱۵–۵: نمونه‌ای از جدول فرآیند، درخت

پس از تکمیل الگوهای شرطی در جدول مربوطه، به تعیین درخت‌های FP-tree شرطی مربوط به هر آیت‌م پرداخته تا بر اساس آن‌ها اقدام به تولید الگوهای مکرر کنیم. درخت‌های FP-tree شرطی از ادغام الگوهای شرطی پایه مربوط به هر آیت‌م تشکیل می‌شود. این درخت‌ها می‌توانند حاوی یک یا تعداد بیشتری آیت‌م باشند. نکته بسیار با اهمیت که بدان بایستی توجه نمود آن است که در هر ادغام، برچسب هر آیت‌م در هر کدام از درخت‌های FP-tree شرطی، برابر مجموع پشتیبان آن آیت‌م در الگوهای شرطی پایه‌ای است که آن درخت را تولید می‌کنند. یادآوری می‌شود آن درخت‌های FP-tree شرطی در این مرحله لحاظ می‌شوند که شرط حداقل پشتیبان را ارضا کنند. پس از تعیین تمامی درخت‌های FP-tree شرطی مربوط به هر آیت‌م، مرحله آخر که تولید الگوهای مکرر است، آغاز می‌شود. برای هر آیت‌م در جدول الگوهای شرطی پایه، الگوهای مکرر بر اساس درخت‌های FP-tree شرطی مربوط به آن آیت‌م و ادغام آن با خود آیت‌م ساخته می‌شوند. در این بخش تمامی حالات و الگوهای ممکن بایستی در نظر گرفته و ساخته شود. الگوهای مکرر در حقیقت همان زیرمجموعه‌های مجموعه‌های L یا مجموعه اقلام مکرر می‌باشند [۱۴۷]–[۱۵۱].

در نهایت و پس از تعیین تمامی این الگوها، همانند مراحل ۷، ۸ و ۹ الگوریتم Apriori، به تعیین قوانین انجمنی با ارزش پرداخته می‌شود. به طور خلاصه، فرآیند الگوریتم FP-Growth به صورت زیر می‌باشد [۱۴۷]–[۱۵۱]:

- ۱- تعیین حداقل پشتیبان و حداقل اطمینان
- ۲- محاسبه پشتیبان تک‌تک اقلام از روی تراکنش‌ها موجود
- ۳- تشکیل جدول سرآیند و مرتب کردن تراکنش‌ها بر اساس پشتیبان آیت‌م‌ها
- ۴- تشکیل درخت FP-tree
- ۵- تعیین الگوهای شرطی پایه برای تمامی آیت‌م‌های موجود در جدول سرآیند
- ۶- تعیین درخت‌های FP-tree شرطی برای تمامی آیت‌م‌های موجود در جدول سرآیند
- ۷- تعیین تمامی الگوهای مکرر برای تمامی آیت‌م‌های موجود در جدول سرآیند
- ۸- تقسیم تمامی الگوهای مکرر تولیدشده به دو قسمت برای $K > 1$ و تشکیل مجموعه قوانین کاندید
- ۹- محاسبه اطمینان برای تمامی قوانین کاندید شده
- ۱۰- تعیین قوانین انجمنی با ارزش بر اساس حداقل اطمینان تعریف شده

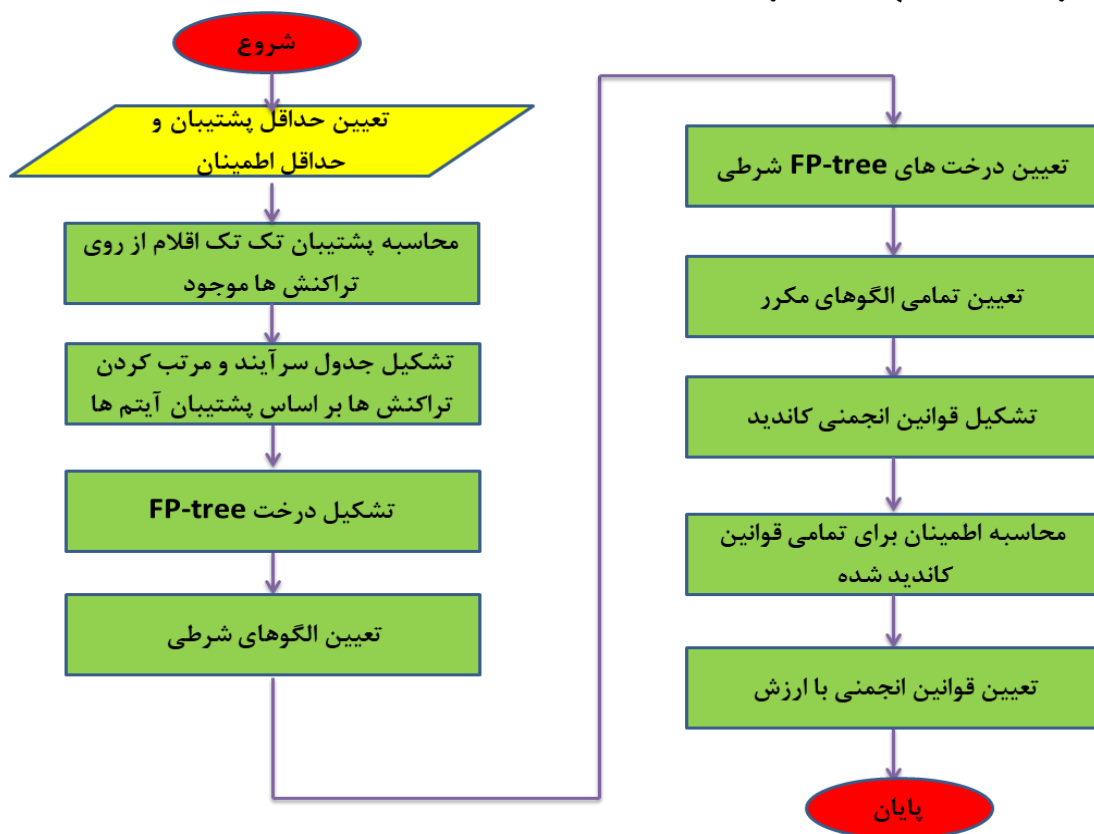
در شکل ۱۶-۵ روندنمای الگوریتم FP-Growth نشان داده شده است. همچنین مزایا و معایب الگوریتم FP-Growth عبارت است از [۱۵۲]–[۱۵۴]:

مزایا:

- سرعت بالاتر نسبت به الگوریتم Apriori به جهت کاهش فضای جستجو
- عدم تولید مجموعه اقلام کاندید C_k
- مراجعه صرفاً دوبار، به پایگاه داده

معایب:

- هزینه بالای ساختن درخت FP-tree
- نیاز به حافظه بالا جهت ساخت درخت FP-tree



شکل ۱۶-۵: روندنمای الگوریتم FP-Growth [۱۵۲]–[۱۵۴]

۵-۵- تکنیک کاهش ابعاد

در یادگیری ماشین و آمار، کاهش بعد یا کاهش ابعاد، روند کاهش تعداد ویژگی‌ها از طریق به دست آوردن یک مجموعه از ویژگی‌ها و ابعاد اصلی می‌باشد. کاهش ابعاد را می‌توان به دو دسته انتخاب ویژگی و استخراج ویژگی تقسیم کرد. انتخاب ویژگی روشی است که برای پیدا کردن یک زیر مجموعه از متغیرهای اصلی با همان ویژگی‌ها تلاش می‌کند. استخراج ویژگی نیز داده‌ها را در فضای با ابعاد بزرگ به یک فضای با ابعاد کمتر تبدیل می‌کند. لذا بهره‌گیری از الگوریتم‌هایی که در زمره تکنیک‌های کاهش ابعاد قرار می‌گیرند کمک خواهند کرد تا بدون از دست دادن مقدار زیادی از اطلاعات با ارزش، یک پایگاه داده با ابعاد بالا به مجموعه داده‌هایی با ابعاد پایین‌تر تبدیل شود. این روند تاثیر به سزایی در سرعت بخشیدن به الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین که با داده‌های بسیار حجیم سر و کار دارند، خواهد داشت. الگوریتم‌های مختلفی در زمینه کاهش ابعاد وجود دارند که دو مورد از پرکاربردترین و پایه‌ای‌ترین آن‌ها عبارت است از [۱۵۵]–[۱۵۸]:

➤ تجزیه مقادیر منفرد^۱ (SVD)

➤ تجزیه و تحلیل مولفه اساسی^۲ (PCA)

در ادامه به معرفی این دو الگوریتم پرداخته می‌شود.

۱-۵-۵- تجزیه مقادیر منفرد

همان طور که می‌توان هر عدد را به صورت حاصل ضرب اعداد اول نوشت، می‌توان همین کار را برای یک ماتریس انجام داد؛ یعنی یک ماتریس را به عوامل سازنده آن تجزیه کرد. یکی از روش‌های این تجزیه استفاده از مقادیر منفرد است. ماتریس E با ابعاد $n \times m$ ، به صورت زیر قابل تجزیه به حاصل ضرب سه ماتریس است [۱۵۵]، [۱۵۶]، [۱۵۸]–[۱۶۱].

$$[E]_{n \times m} = [U]_{n \times m} [S]_{m \times m} [V]^T_{m \times m} \quad (5-23)$$

که در آن:

$$U^T U = V V^T = I \quad (5-24)$$

I ماتریس همانی با ابعاد $m \times m$ است. ستون‌های U بردارهای منفرد چپ و ستون‌های V بردارهای منفرد راست نامیده می‌شوند. اندازه ماتریس S برابر رتبه ماتریس E است؛ لذا اگر رتبه ماتریس E کامل نباشد، اندازه S دیگر $m \times m$ نخواهد بود. برای مثال اگر رتبه ماتریس E برابر r باشد، داریم:

$$[E]_{n \times m} = [U]_{n \times r} [S]_{r \times r} [V]^T_{r \times m} \quad (5-25)$$

ماتریس‌های موجود در تجزیه مقادیر منفرد در صورت رتبه کامل بودن E ، با اعمال تجزیه مقادیر ویژه^۳ (EVD) بر روی $E^T \times E$ قابل محاسبه هستند. در این حالت:

$$E^T E = V S^2 V^T \quad (5-26)$$

¹ Singular Value Decomposition (SVD)

² Principal Component Analysis (PCA)

³ Eigen Value Decomposition (EVD)

توجه داریم که ماتریس $E^T \times E$ متقارن است. با فرض اینکه پایگاه داده شامل N داده M بعدی باشد؛ لذا این پایگاه داده در قالب یک ماتریس $n \times m$ به نام E قابل بیان است. برای این ماتریس تجزیه مقادیر منفرد به کار گرفته می‌شود. در این تجزیه، مقادیر منفرد در ماتریس S به صورت نزولی مرتب می‌شوند. در این روش به دنبال محورهایی در فضای m بعدی هستیم که با تصویر داده‌های پایگاه داده روی آن‌ها، ضمن کاهش ابعاد، حجم غالب داده‌ها و روابط با ارزش حفظ شوند. در روش تجزیه مقادیر منفرد، ستون‌های سمت چپ ماتریس V همان محورهای مورد نظر است. این ستون‌ها در حقیقت اجزا و محورهای اصلی ماتریس E پایگاه داده هستند. از آن‌جا که مقادیر تکین به صورت نزولی مرتب شده و هر چه مقدار تکین بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده ارزش بیشتر مولفه و محور مربوط به آن است، لذا در صورتی که بخواهیم ابعاد پایگاه داده را به k تقلیل بدهیم، بایستی k ستون سمت چپ ماتریس V را به عنوان محورهای جدید انتخاب کنیم. این محورها دقیقاً نشان می‌دهند تا تغییرات اساسی جهت حصول به ابعاد پایین‌تر، چگونه باید باشند. عمدتاً تعداد محورهای انتخاب شده به صورتی انتخاب می‌شوند تا پس از کاهش ابعاد، حد معینی از انرژی پایگاه داده اولیه، مثلاً ۹۰٪ حفظ شود. این نسبت را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۱۵۵]، [۱۵۶]، [۱۵۸]–[۱۶۱]:

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2} \quad (5-27)$$

σ_i نشان دهنده i امین مقدار تکین در ماتریس S است. پس از یافتن محورهای اساسی مورد نیاز جهت کاهش ابعاد که k ستون سمت چپ ماتریس V بوده و به صورت ماتریس V' نشان داده می‌شود، بایستی پایگاه داده تغییر یافته $n \times k$ که با E' نمایش داده می‌شود را به دست آوریم. این پایگاه داده جدید عبارت است از:

$$E' = EV' \quad (5-28)$$

لذا با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد می‌توان پایگاه داده E که داده‌های آن n بعدی بودند را به پایگاه داده E' با تعداد k ویژگی برای عناصر آن تبدیل کرد. به طور خلاصه، فرآیند الگوریتم تجزیه مقادیر منفرد به صورت زیر است [۱۵۵]، [۱۵۶]، [۱۵۸]–[۱۶۱]:

۱- دریافت اطلاعات پایگاه داده و تعداد بعد مورد نظر

۲- تشکیل ماتریس پایگاه داده E

۳- اعمال تجزیه مقادیر منفرد روی E

۴- تعیین محورهای اصلی جهت کاهش ابعاد از روی بردارهای منفرد راست V

۵- محاسبه پایگاه داده جدید E'

در شکل ۱۷-۵ روندنمای الگوریتم تجزیه مقادیر منفرد قابل مشاهده است. مزایا و معایب این الگوریتم عبارت است از:

مزایا:

- ✓ سادگی مفهوم
- ✓ کاهش ابعاد بهینه برای تصویرسازی‌های خطی

معایب:

- ✓ حساس به نویز و ویژگی‌های غیر خطی

✓ هزینه محاسباتی بالا



شکل ۱۷-۵: روندنمای الگوریتم تجزیه مقادیر منفرد [۱۵۵], [۱۵۶], [۱۵۸]–[۱۶۱]

۲-۵-۵- تجزیه و تحلیل مولفه اساسی

این روش می‌تواند مولفه‌های اصلی را شناسایی کرده و به ما کمک می‌کند تا به جای اینکه تمامی ویژگی‌ها را بررسی نماییم، یک سری ویژگی‌هایی را که ارزش بیشتری دارند، تحلیل کنیم. در واقع تجزیه و تحلیل مولفه اساسی آن ویژگی‌هایی را که ارزش بیشتری فراهم می‌کنند استخراج می‌کند. تجزیه و تحلیل مولفه اساسی قصد دارد همبستگی^۱ بین متغیرها را شناسایی کند. اگر یک همبستگی قوی بین متغیرها وجود داشت، تلاش‌ها برای کاهش ابعاد معنادار خواهد بود. به طور کلی، آنچه در تجزیه و تحلیل مولفه اساسی رخ می‌دهد، پیدا کردن جهت واریانس بیشینه در پایگاه داده با ابعاد بالا و طرح‌ریزی کردن آن در زیرفضایی با ابعاد کمتر، به طوری که بیشترین اطلاعات حفظ شوند. برای معرفی این الگوریتم، ماتریس E که معرف پایگاه داده بوده و دارای اندازه $n \times m$ است را در نظر بگیرید. ابتدا مقدار میانگین هر ستون ماتریس E

¹ Correlation

را ستون مربوطه کم می‌کنیم. ماتریس حاصل را X می‌نامیم. الگوریتم مزبور محاسبات را روی ماتریس کواریانس پایگاه داده مربوطه انجام می‌دهد، برای محاسبه ماتریس کواریانس داریم [۱۶۲]–[۱۶۷]:

$$\Sigma = \frac{X^T X}{n-1} = \frac{(E - \bar{E})^T (E - \bar{E})}{n-1} \quad (5-29)$$

که $\bar{E}$ برابر ماتریس میانگین ستون‌های ماتریس E است. مشابه تجزیه مقادیر منفرد، تجزیه مقادیر ویژه را به صورت زیر بر روی ماتریس Σ با اندازه $m \times m$ اعمال می‌نماییم.

$$\Sigma = U \Lambda U^{-1} \quad (5-30)$$

که Λ ماتریس قطری حاوی مقادیر ویژه ماتریس کواریانس داده‌ها است. مقادیر ویژه در Λ را نیز به صورت نزولی مرتب می‌نماییم. طبیعی است سطر و ستون‌های U نیز بر اساس مقادیر ویژه مربوطه مرتب می‌شوند، لذا برداری‌های ویژه ماتریس Σ به صورت ستونی از چپ به راست متناظر با مقادیر ویژه بزرگ‌تر مرتب خواهند شد. حال همانند الگوریتم تجزیه مقادیر منفرد، برای تقلیل فضای ویژگی از m به k ستون سمت چپ ماتریس U که تشکیل ماتریس U' را می‌دهند، محورهای مختصات فضای ویژگی جدید مورد نظر ما هستند. شایان ذکر است U همان ماتریس حاوی بردارهای ویژه ماتریس Σ است. حال با تصویر پایگاه داده اولیه روی این محورهای حاصله، پایگاه داده جدید E' در فضای ویژگی k بعدی به دست می‌آید [۱۶۲]–[۱۶۷].

$$E' = EU' \quad (5-31)$$

که E' حاوی n داده k بعدی می‌باشد. به طور خلاصه، فرآیند الگوریتم تجزیه و تحلیل مولفه اساسی به صورت زیر است [۱۶۲]–[۱۶۷]:

- ۱- دریافت اطلاعات پایگاه داده و تعداد بعد مورد نظر
 - ۲- تشکیل ماتریس کواریانس Σ
 - ۳- اعمال تجزیه مقادیر ویژه روی Σ
 - ۴- تعیین محورهای اصلی جهت کاهش ابعاد از روی ماتریس بردارهای ویژه U
 - ۵- محاسبه پایگاه داده جدید E'
- در شکل ۵-۱۸ الگوریتم تجزیه و تحلیل مولفه اساسی نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۵: روندنمای الگوریتم تجزیه و تحلیل مولفه اساسی [۱۶۲]–[۱۶۷]

مزایا و معایب این الگوریتم نیز عبارت است از [۱۶۲]–[۱۶۷]:

مزایا:

- ❖ حساسیت پایین نسبت به نویز
- ❖ کاهش نیاز به حافظه
- ❖ عدم افزودگی داده‌ها

معایب:

- ❖ دشواری محاسبه ماتریس کواریانس به صورت دقیق
- ❖ عدم تشخیص تغییرناپذیری‌ها

فصل ۶- یادگیری تقویتی

۶-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی روش‌های یادگیری تقویتی پرداخته می‌شود. بدین منظور در ابتدا اصول یادگیری تقویتی شرح داده شده و سپس انواع روش‌های یادگیری ماشین که در این دسته قرار می‌گیرند معرفی می‌گردد. در این بین توجه به اینکه لازم است که روش‌های بسیار متعددی تاکنون ارائه شده و همواره روش‌های جدیدتری در حال ابداع هستند که عمدتاً از ترکیب و یا بهبود روش‌های اصلی نشأت می‌گیرند. به همین دلیل در این فصل، مبانی روش‌های اصلی یادگیری تقویتی ارائه می‌شود.

۶-۲- مبانی یادگیری تقویتی

یادگیری تقویتی یکی دیگر از تکنیک‌های یادگیری ماشین است که از روانشناسی رفتارگرایی الهام می‌گیرد. این روش بر رفتارهایی تمرکز دارد که ماشین باید برای بیشینه‌کردن پاداشش انجام دهد. در یادگیری ماشین مبتنی بر یادگیری تقویتی، با توجه به این که بسیاری از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی از تکنیک‌های برنامه‌نویسی پویا استفاده می‌کنند، معمولاً مسئله تحت عنوان یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف مدل می‌شود. در یادگیری تقویتی، هدف اصلی از یادگیری، انجام دادن کاری یا رسیدن به هدفی است، بدون آنکه عامل یادگیرنده، با اطلاعات مستقیم بیرونی تغذیه شود. در یادگیری تقویتی وقتی عامل کاری را انجام می‌دهد که او را به هدفش نزدیک‌تر می‌سازد، پاداش می‌گیرد و هدف او این است که اقداماتی را انجام دهد تا در درازمدت پاداش او را حداکثر سازند. اگرچه هم یادگیری با نظارت و هم یادگیری تقویتی از نداشت بین ورودی و خروجی استفاده می‌کنند، اما در یادگیری تقویتی بر خلاف یادگیری با نظارت از پاداش‌ها و تنبیه‌ها به‌عنوان سیگنال‌هایی برای بهبود عملکرد نهایی سیستم استفاده می‌شود. تفاوت اصلی بین روش‌های سنتی و الگوریتم‌های موجود یادگیری تقویتی این است که در یادگیری تقویتی نیازی به داشتن اطلاعات راجع به فرآیند تصمیم‌گیری ندارد ضمن اینکه این روش بر روی فرآیندهای مارکوف بسیار بزرگ نیز قابل اعمال است در حالی که روش‌های سنتی در این شرایط ناکارآمد هستند.

این روش، با توجه به گستردگی‌اش، در زمینه‌های گوناگونی بررسی می‌شود، مانند نظریه بازی‌ها، نظریه کنترل، تحقیق در عملیات، نظریه اطلاعات، سامانه چندعامله، هوش ازدحامی، آمار، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی. در مبحث تحقیق در عملیات و در ادبیات کنترل، حوزه‌ای که در آن روش یادگیری تقویتی مطالعه می‌شود برنامه‌نویسی تخمینی پویا^۱ خوانده می‌شود. این مسئله در تئوری کنترل بهینه نیز مطالعه شده است.

یادگیری تقویتی با یادگیری با نظارت معمول دو تفاوت عمده دارد که عبارتند از:

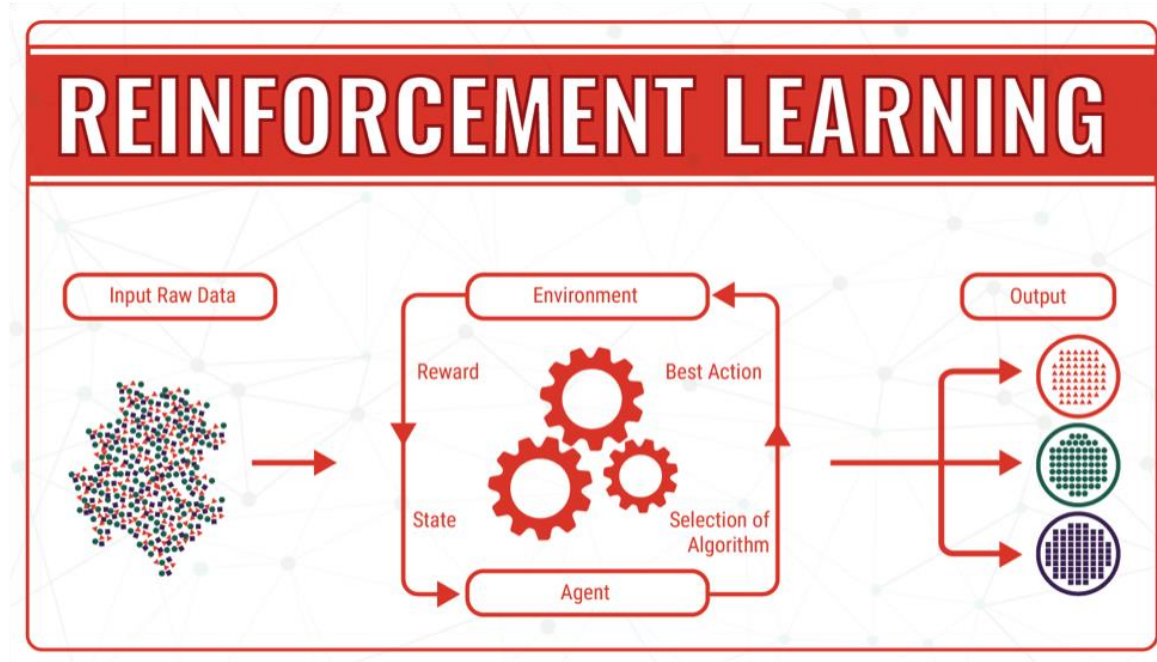
الف) در یادگیری تقویتی، زوج‌های صحیح ورودی و خروجی در کار نیست و رفتارهای ناکارآمد نیز از بیرون اصلاح نمی‌شوند. به عبارت دیگر، عامل هیچ گونه اطلاعی در مورد اینکه در هر حالت بهترین عمل چیست را ندارد. بلکه این وظیفه عامل است که در طول زمان تجربه کافی در مورد حالت‌ها، عمل‌های ممکن، انتقال و پاداش جمع‌آوری نموده و عملکرد بهینه را یاد بگیرد.

ب) تمرکز زیادی روی کارایی برخط وجود دارد که نیازمند پیدا کردن یک تعادل مناسب بین اکتشاف چیزهای جدید و بهره‌برداری از دانش اندوخته شده دارد.

در یادگیری تقویتی، هیچ‌گاه به عامل گفته نمی‌شود که کار درست در هر وضعیت کدام است (یعنی داده‌ها برچسب‌گذاری نمی‌شوند) و فقط به وسیله معیاری، به عامل فهمانده می‌شود که یک عمل به چه میزان خوب یا به چه میزان بد است. این وظیفه عامل یادگیرنده است که با در

¹ Approximate dynamic programming

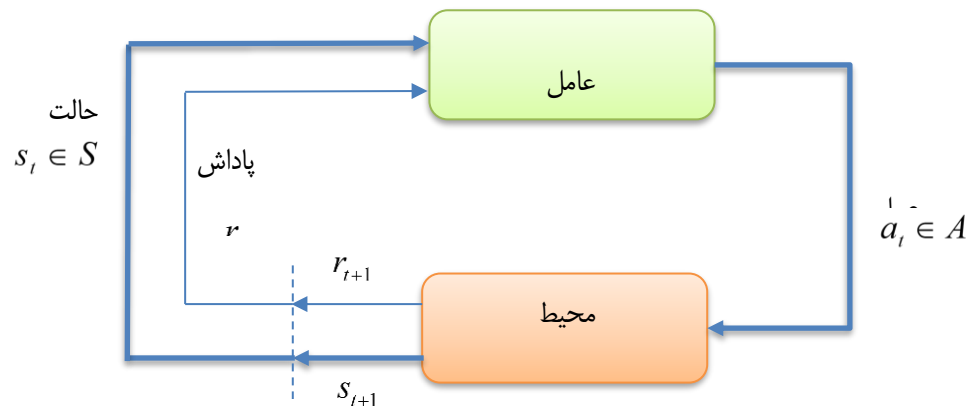
دست داشتن این اطلاعات، یاد بگیرد که بهترین عمل در هر وضعیت کدام است. این موضوع، بخشی از نقاط قوت خاص یادگیری تقویتی است. از این طریق، مسائل پیچیده تصمیم‌گیری در اغلب اوقات می‌توانند با فراهم کردن کمترین میزان اطلاعات مورد نیاز حل شوند. در شکل ۶-۱ ساختار این نوع یادگیری نشان داده شده است [۱۶۸]–[۱۷۳].



شکل ۶-۱: ساختار یادگیری تقویتی [۱۶۸]

۱-۲-۶- اجزای یادگیری تقویتی

شکل ۶-۲ اجزای مدل‌سازی یادگیری تقویتی را نشان می‌دهد. در هر لحظه t ، عامل حالت‌ها را به احتمال انتخاب هر کدام از عمل‌های ممکن در آن حالت نگاشت می‌کند. این نگاشت سیاست نامیده می‌شود و با π_t نشان داده می‌شود. $\pi_t(t, a)$ احتمال انتخاب عمل a در حالت S در لحظه t است. عامل با توجه به حالت فعلی و پاداش، عمل را در محیط انجام می‌دهد. در هر لحظه t ، عامل مجموعه مشاهدات را دریافت می‌کند که معمولاً شامل پاداش r_t نیز می‌شود و پس از آن یک واکنش a_t از بین واکنش‌های ممکن از خود نشان می‌دهد که به محیط ارسال می‌شود. سپس وضعیت به حالت S_{t+1} تغییر می‌کند و پاداش r_{t+1} نیز محاسبه می‌شود. این پاداش قبل از انجام حرکت بعدی عامل همراه با مجموعه مشاهدات به عامل داده می‌شود تا بر اساس آن واکنش بعدی a_{t+1} را انتخاب کند. هدف عامل این است که بیشترین پاداش ممکن را دراز مدت کسب کند [۱۶۸]–[۱۷۳].



شکل ۲-۶: اجزای مدل‌سازی یادگیری تقویتی [۱۶۸]–[۱۷۳]

با توجه به توضیحات فوق‌الذکر، اجزای یادگیری تقویتی عبارتند از:

- S : یک مجموعه از حالات مختلف در مسئله است.
- A : یک مجموعه از تصمیمات قابل اتخاذ (عمل‌های ممکن) برای عامل است.
- محیط^۱: جهان فیزیکی که عامل در آن عمل می‌کند.
- حالت s_t ^۲: حالت عامل در زمان t را گویند.
- عمل a_t ^۳: عمل عامل در زمان t است. هر عمل بیانگر رفتن از یک حالت به حالت دیگر است.
- سیاست^۴: روشی برای نگاشت حالت عامل به عمل است. سیاست نحوه برخورد با هر عمل و تصمیم‌گیری را تعیین می‌کند. در واقع سیاست تعیین‌کننده شیوه رفتار عامل است که عامل را به حالت‌های بهتر رهنمون می‌سازد. سیاست، هسته اصلی عامل یادگیری تقویتی است.
- پاداش^۵: بازخورد آنی از محیط را پس از انجام عمل، پاداش گویند.
- تابع پاداش: این تابع، هدف را در تابع یادگیرنده تعیین می‌کند. این تابع به ازای هر عمل عامل یک پاداش به آن می‌دهد. بنابراین هرچه عامل به هدفش نزدیک‌تر شود پاداش بیشتر می‌شود.
- ارزش^۶: پاداش آینده که یک عامل با اقدام به یک عمل در یک حالت خاص به آن دست می‌یابد را ارزش می‌گویند. در واقع، ارزش هر حالت برابر است با ارزش کل پاداشی که عامل می‌تواند انتظار داشته باشد در آینده با آغاز از آن حالت جمع‌آوری کند. بر خلاف پاداش‌ها که مطلوبیت حقیقی و لحظه‌ای حالت‌های محیط را نشان می‌دهند، ارزش‌ها مطلوبیت بلندمدت حالت‌ها را با درنظر گرفتن دنباله حالت‌ها از آن حالت تا حالت هدف و پاداش‌های حاصل از آن‌ها تعیین می‌کند.

¹ Environment

² State

³ Action

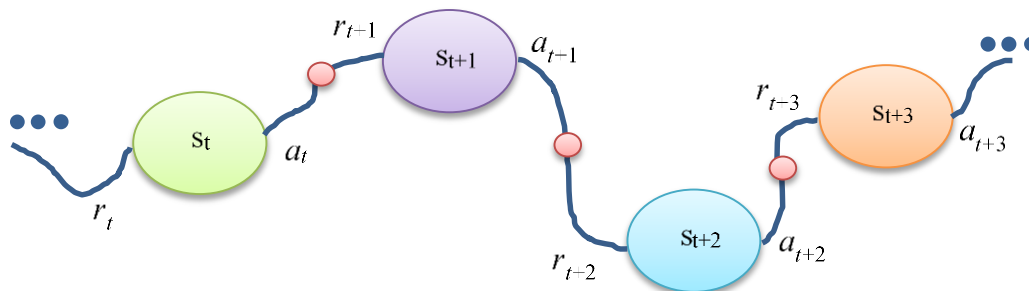
⁴ Policy

⁵ Reward

⁶ Value

- تابع ارزش: این تابع برای هر حالت یک مقدار تعیین می‌کند که هر چه بیشتر باشد یعنی عامل به هدف خود نزدیک‌تر شده است. بدین معنی که تابع ارزش پاداش بیشینه آینده را مشخص می‌کند که عامل در هر حالت دریافت می‌کند. برخلاف تابع پاداش که مشخص می‌کند چه چیزی در زمان فعلی مناسب است، تابع ارزش تعیین کننده آن است که در "بلند مدت" چه چیزی سودمند است.

هدف عامل بیشینه‌سازی پاداش در دراز مدت است. اگر فرض شود که دنباله پاداش‌های دریافتی از گام زمانی t مطابق شکل ۳-۶ به صورت $r_{t+1}, r_{t+2}, r_{t+3}, \dots$ باشد، آن‌گاه عامل تلاش می‌کند عملی را انتخاب بکند که «تابع بازگشت^۱» رابطه *Error! Reference source not found* را بیشینه نماید. این تابع، مقدار فعلی پاداش‌های آتی را تعیین می‌کند.



شکل ۳-۶: دنباله عمل‌ها و پاداش‌های عامل [۱۶۸]–[۱۷۳]

$$R_t = r_{t+1} + \gamma r_{t+2} + \gamma^2 r_{t+3} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+(k+1)} \quad (۶-۱)$$

γ فاکتور تخفیف نام دارد و مقدار آن در $0 \leq \gamma < 1$ قرار دارد.

۲-۲-۶- ویژگی مارکوف در مسئله یادگیری تقویتی

خاصیت مارکوف در مبحث فرآیندهای تصادفی، ویژگی فرآیندهایی است که احتمال شرطی رخداد آینده فقط به آخرین رخداد موجود یعنی رخداد کنونی وابسته باشد و نه به گذشته‌های دیگر. ایده‌آل این است که حالت به صورت فشرده، دنباله‌ای از ادارک‌های گذشته را در خود داشته باشد به گونه‌ای همه اطلاعات مرتبط و مناسب همچنان حفظ شوند. حالتی که موفق به نگهداری همه اطلاعات مرتبط جهت تصمیم‌گیری می‌شود، دارای ویژگی مارکوف می‌گویند. در فرآیندهای با خاصیت مارکوفی، حالت آتی فرآیند فقط به حالت فعلی آن بستگی دارد و دانستن حالت‌های قبلی فرآیند اطلاعات اضافی در اختیار قرار نمی‌دهد.

¹ Return function

در بیان ویژگی مارکوف در قالب مسئله یادگیری تقویتی، می‌توان فرض کرد که در یک محیط گسسته تعداد محدودی از حالت‌ها و مقادیر پاداش وجود دارد. این امر کمک می‌کند برای ساده‌سازی مسئله به جای محاسبه انتگرال و چگالی احتمال، از جمع و احتمال گسسته استفاده شود. لازم به ذکر است که امکان بسط موضوع به مسائل به محیط پیوسته وجود دارد. اکنون می‌توان موقعیتی را فرض کرد که محیط در زمان $t+1$ به عمل انجام‌شده در زمان t پاسخ دهد. در حالت عام، این پاسخ می‌تواند وابسته بر هر آنچه قبلاً رخ داده است باشد. در این حالت دینامیک فقط با مشخص کردن توزیع احتمال کامل قابل تعریف است. لذا برای همه s' و r تمام مقادیر ممکن از حالت‌های گذشته $s_0, a_0, r_1, s_1, a_1, r_2, s_2, a_2, r_3, s_3, a_3, \dots, r_t, s_t, a_t, r_{t+1}, s_{t+1}, a_{t+1}$ رابطه (۶-۲) برقرار است [۱۷۱]–[۱۷۴].

$$\Pr\{s_{t+1} = s', r_{t+1} = r | s_t, a_t, r_t, s_{t-1}, a_{t-1}, r_{t-1}, \dots, r_1, s_1, a_1, r_0, s_0, a_0\} \quad (6-2)$$

اگر حالت دارای ویژگی مارکوف باشد، آن‌گاه پاسخ در زمان $t+1$ تنها به نمایش‌های حالت و عمل در زمان t بستگی دارد. لذا می‌توان دینامیک محیط برای تمام s', r, a_t و s_t به صورت زیر نوشت.

$$\Pr\{s_{t+1} = s', r_{t+1} = r | s_t, a_t\} \quad (6-3)$$

بنابراین یک حالت دارای ویژگی مارکوف است اگر و تنها اگر دو رابطه (۶-۲) و (۶-۳) برای تمام s', r و سوابق آن‌ها $s_0, a_0, r_1, s_1, a_1, r_2, s_2, a_2, r_3, s_3, a_3, \dots, r_t, s_t, a_t, r_{t+1}, s_{t+1}, a_{t+1}$ طبق رابطه زیر با هم برابر باشند.

$$\Pr\{s_{t+1} = s', r_{t+1} = r | s_t, a_t, r_t, s_{t-1}, a_{t-1}, r_{t-1}, \dots, r_1, s_1, a_1, r_0, s_0, a_0\} = \Pr\{s_{t+1} = s', r_{t+1} = r | s_t, a_t\} \quad (6-4)$$

با برقراری رابطه **Error! Reference source not found** محیط و عمل‌ها دارای ویژگی مارکوف هستند. می‌توان نشان داد با کمک تکرار رابطه **Error! Reference source not found** پیش‌بینی تمام حالت‌های آتی و پاداش‌های مورد انتظار آن‌ها با استفاده از دانش محفوظ در حالت فعلی امکان‌پذیر است، همان‌طور که این امکان با استفاده از کل سابقه موجود تا آن زمان برقرار است. بنابراین بهترین سیاست برای انتخاب عمل‌ها به عنوان تابعی از یک حالت مارکوف به خوبی بهترین سیاست برای انتخاب عمل‌ها به عنوان تابعی از سوابق کامل حالت‌های محیط است.

فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف^۱ در مسائل یادگیری تقویتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس با وجود هر حالت s و انجام عمل a ، احتمال هر حالت بعدی ممکن s' برابر با $P_{ss'}^a$ است که «احتمال انتقال^۲» نام دارد.

$$P_{ss'}^a = \Pr\{s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a\} \quad (6-5)$$

به همین ترتیب، با معین‌بودن هر حالت s و عمل a به همراه حالت بعدی ممکن s' ، مقدار پاداش بعدی مورد انتظار برابر است با:

$$R_{ss'}^a = E\{r_{t+1} | s_t = s, a_t = a, s_{t+1} = s'\} \quad (6-6)$$

دو پارامتر $P_{ss'}^a$ و $R_{ss'}^a$ مهم‌ترین ویژگی‌های دینامیکی یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف را مشخص می‌کنند.

۳-۲-۶- توابع ارزش

تقریباً همه الگوریتم‌های یادگیری تقویتی مبتنی بر تخمین توابع ارزش هستند. توابع ارزش، توابعی از حالت‌ها (یا جفت‌های عمل-حالت) هستند که مقدار خوب‌بودن قرارگرفتن عامل در یک حالت معین (یا میزان خوب‌بودن انجام یک عمل معین در یک حالت معین) را تخمین

¹ Markov decision programming (MDP)

² Transition probability

می‌زنند. منظور از خوب بودن در واقع همان امید دریافت پاداش‌های آتی و یا به طور دقیق‌تر، بازگشت مورد انتظار است. پاداش‌های آتی بستگی به عمل‌هایی دارد که عامل در آینده انجام می‌دهد.

ارزش حالت s تحت سیاست π با $V^\pi(s)$ نشان داده می‌شود و برابر است با مقدار بازگشت مورد انتظاری که از حالت s شروع شده و با پیروی از سیاست π حاصل می‌شود. $V^\pi(s)$ در مورد فرآیندهای تصمیم‌گیری مارکوف به صورت (۶-۷) نمایش داده می‌شود. تابع $V^\pi(s)$ ، تابع ارزش-حالت برای سیاست π نامیده می‌شود [۱۶۸]–[۱۷۱]، [۱۷۳]، [۱۷۴].

$$V^\pi(s) = E_\pi \{R_t | s_t = s\} = E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s \right\} \quad (۶-۷)$$

$E_\pi \{ \}$ مقدار مورد انتظار ارزش (امید ریاضی ارزش) را که عامل با پیروی از سیاست π به دست می‌آورد نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقدار ارزش حالت پایانی، اگر چنین حالتی وجود داشته باشد، برابر صفر است.

به طور مشابه، ارزش عمل a در حالت s تحت سیاست π با استفاده از $Q^\pi(s, a)$ نشان داده می‌شود. $Q^\pi(s, a)$ برابر است با مقدار بازگشت مورد انتظاری که از حالت s شروع شده و با انجام اقدام a و تحت سیاست π حاصل می‌شود [۱۶۸]–[۱۷۱]، [۱۷۳]، [۱۷۴].

$$Q^\pi(s, a) = E_\pi \{R_t | s_t = s, a_t = a\} = E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a \right\} \quad (۶-۸)$$

که $Q^\pi(s, a)$ تابع ارزش-عمل برای سیاست π نامیده می‌شود.

توابع ارزش V^π و Q^π با استفاده از تجربیات عامل تخمین زده می‌شوند. به عنوان مثال اگر عامل از سیاست π پیروی کند و به ازای هر حالت مواجه شده، میانگین بازگشت واقعی حاصل شده از شروع کار از هر حالت معین را حفظ نماید؛ آن‌گاه این مقدار میانگین به عنوان تعداد دفعاتی که با حالت موردنظر مواجه می‌شود، به مقدار ارزش آن حالت یعنی $V^\pi(s)$ همگرا خواهد شد به شرطی که تعداد این دفعات به سمت بی‌نهایت میل کند. اگر برای هر عملی که در یک حالت انجام می‌شود، میانگین‌های جداگانه‌ای نگهداری شود، آن‌گاه این میانگین‌ها به طور مشابه به مقدار ارزش عمل یعنی $Q^\pi(s, a)$ همگرا می‌شود. این روش تخمین، روش مونت کارلو نامیده می‌شود زیرا بر اساس میانگین‌گیری نمونه‌های تصادفی از مقادیر بازگشت‌های واقعی است.

ویژگی اساسی توابع ارزشی که در یادگیری تقویتی استفاده می‌شود این است که آن‌ها روابط خاصیت بازگشتی^۱ را برآورده می‌کنند. برای هر سیاست π و هر حالت s ، شرط سازگاری زیر بین مقدار s و مقدار حالت‌های جانشین احتمالی آن وجود دارد. رابطه (۶-۹) به معادله بلمن^۲ برای V^π معروف است. این معادله، رابطه بین ارزش یک حالت و ارزش حالت‌های پسین آن را نشان می‌دهد.

^۱ Recursive

^۲ Bellman

$$\begin{aligned}
V^\pi(s) &= E_\pi \{R_t | s_t = s\} \\
&= E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+(k+1)} | s_t = s \right\} \\
&= E_\pi \left\{ r_{t+1} + \gamma \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+2} | s_t = s \right\} \quad (6-9) \\
&= \sum_a \pi(s, a) \sum_{s'} P_{ss'}^a \left[R_{ss'}^a + \gamma E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+2} | s_{t+1} = s' \right\} \right] \\
&= \sum_a \pi(s, a) \sum_{s'} P_{ss'}^a [R_{ss'}^a + \gamma V^\pi(s')] \\
&\quad P_{ss'}^a \text{ و } R_{ss'}^a \text{ به ترتیب احتمال انتقال و مقدار مورد انتظار پاداش بعدی هستند.}
\end{aligned}$$

۴-۲-۶- توابع ارزش بهینه

حل یک مسئله یادگیری تقویتی به معنای یافتن سیاستی است که در دراز مدت پاداش بیشتری را حاصل می‌کند. برای مسائل مبتنی فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف با ابعاد متناهی می‌توان یک سیاست بهینه مطابق روش زیر به دست آورد. توابع ارزش یک ترتیب جزئی^۱ روی سیاست‌های تعریف می‌کنند. یک سیاست π نسبت به سیاست π' بهتر و یا حداقل مساوی است، اگر مقدار بازگشت مورد انتظار برای همه حالت‌ها در سیاست π نسبت به سیاست π' بزرگ‌تر و یا حداقل مساوی باشد. به بیان ریاضی: $\pi \geq \pi'$ اگر و فقط اگر برای همه حالت‌ها موجود رابطه $V^\pi(s) \geq V^{\pi'}(s)$ برقرار باشد. این امر بدین معنی است که همواره حداقل یک سیاست وجود دارد که بهتر و یا برابر دیگر سیاست‌ها است. اگرچه ممکن است که بیش از یک سیاست بهینه وجود داشته باشد اما همه آن‌ها π^* نمایش داده می‌شود. سیاست‌های بهینه یک تابع ارزش-حالت یکسان را که تابع ارزش-حالت بهینه^۲ نام دارد و با V^* نمایش داده می‌شود به اشتراک می‌گذارند. V^* به صورت زیر تعریف می‌شود $[168]-[171], [173], [174]$:

$$V^*(s) = \max_{\pi} V^\pi(s) \quad s \in S \quad (6-10)$$

همچنین سیاست بهینه، تابع ارزش-عمل بهینه^۳ Q^* را که به صورت زیر تعریف می‌شود به اشتراک می‌گذارد.

$$Q^*(s, a) = \max_{\pi} Q^\pi(s, a) \quad a \in A \quad (6-11)$$

برای هر جفت عمل-ارزش (s, a) ، تابع Q^* مقدار بازگشت مورد انتظار برای انجام عمل a در حالت s و پیروی از سیاست بهینه پس از آن را ارائه می‌دهد. با مقداری محاسبات، می‌توان Q^* را برحسب V^* به صورت زیر نوشت:

$$Q^*(s, a) = E \{r_{t+1} + \gamma V^*(s_{t+1}) | s_t = s, a_t = a\} \quad (6-12)$$

¹ Partial ordering

² Optimal state-value function

³ Optimal state-action function

از آنجا که V^* تابع ارزش-حالت برای یک سیاست است، بنابراین باید شرایط سازگاری خود را که توسط معادله بلمن در رابطه (۶-۹) برای ارزش حالت ارائه شده است، برآورده کند. از طرفی دیگر چون V^* تابع ارزش-حالت بهینه است، این شرط سازگاری می‌تواند به شکلی خاص و بدون اشاره به هرگونه سیاست خاصی نوشته شود. این شرط همان معادله بلمن برای V^* یا همان معادله بهینگی بلمن است. معادله بهینگی بلمن این واقعیت را بیان می‌کند که ارزش یک حالت تحت یک سیاست بهینه باید برابر با بازگشت مورد انتظار برای بهترین عمل در آن حالت باشد [۱۶۸]–[۱۷۱]، [۱۷۳]، [۱۷۴]:

$$\begin{aligned} V^*(s) &= \max_a Q^{\pi^*}(s, a) \\ &= \max_a E_{\pi^*} \{R_t | s_t = s, a_t = a\} \\ &= \max_a E_{\pi^*} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a \right\} \quad (۶-۱۳) \\ &= \max_a E_{\pi^*} \left\{ r_{t+1} + \gamma \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+2} | s_t = s, a_t = a \right\} \\ &= \max_a E_{\pi^*} \{r_{t+1} + \gamma V^*(s_{t+1}) | s_t = s, a_t = a\} \end{aligned}$$

رابطه (۶-۱۳) را با انجام مقداری محاسبات می‌توان به شکل زیر نوشت. هر دو رابطه (۶-۱۳) و (۶-۱۴) معادله بهینگی بلمن را برای V^* نشان می‌دهند.

$$V^*(s) = \max_a \sum_{s'} P_{ss'}^a [R_{ss'}^a + \gamma V^*(s')] \quad (۶-۱۴)$$

به همین ترتیب، معادله بهینگی بلمن برای Q^* عبارت است از:

$$\begin{aligned} Q^*(s, a) &= E \left\{ r_{t+1} + \gamma \max_{a'} Q^*(s_{t+1}, a') | s_t = s, a_t = a \right\} \\ &= \sum_{s'} P_{ss'}^a \left[R_{ss'}^a + \gamma \max_{a'} Q^*(s', a') \right] \quad (۶-۱۵) \end{aligned}$$

برای فرآیندهای تصمیم‌گیری مارکوف با ابعاد متناهی، معادله بهینگی بلمن (۶-۱۴) دارای یک جواب منحصر به فرد مستقل از سیاست است. معادله بهینگی بلمن در واقعیت یک دستگاه معادلات است که در آن برای هر یک از حالت‌ها، یک معادله وجود دارد. بنابراین با فرض وجود N حالت، یک دستگاه N معادله و N مجهول وجود دارد. اگر دینامیک‌های محیط $(R_{ss'}^a, P_{ss'}^a)$ کاملاً شناخته شده باشند، آن‌گاه می‌توان این دستگاه معادلات را برای V^* با استفاده از روش‌های حل دستگاه معادلات غیرخطی حل کرد. به طور مشابه، مجموعه‌ای از معادلات را نیز می‌توان برای Q^* حل نمود.

هنگامی که V^* معلوم باشد آن‌گاه تعیین یک سیاست بهینه تقریباً آسان است. برای هر حالت s ، یک یا چند عمل وجود دارد که در آن‌ها مقدار بیشینه در معادله بهینگی بلمن به دست می‌آید. هر سیاستی که احتمال غیر صفر را فقط به این عمل‌ها اختصاص دهد، سیاست بهینه می‌باشد. در این خصوص می‌توان یک جستجوی یک مرحله‌ای را تصور کرد. اگر تابع ارزش-حالت بهینه V^* معلوم باشد، عمل‌هایی که پس از جستجوی یک مرحله‌ای به بهترین شکل ظاهر می‌شوند، اقدامات بهینه خواهند بود. به عبارت دیگر، هر سیاستی که با توجه به تابع ارزش-حالت بهینه V به صورت حریصانه عمل کند، سیاست بهینه نامیده می‌شود. اصطلاح حریصانه در علوم کامپیوتر برای توصیف هر روش جستجو

یا تصمیم‌گیری است که گزینه‌ها را فقط براساس ملاحظات محلی و فوری انتخاب می‌کند، بدون در نظر گرفتن این احتمال که چنین انتخابی از دسترسی به گزینه‌های حتی بهتر در آینده جلوگیری کند. در نتیجه، سیاست‌هایی را توصیف می‌کند که اقدامات را تنها بر اساس پیامدهای کوتاه مدت آن‌ها انتخاب می‌کنند. اهمیت به دست آوردن V^* این است که استفاده از آن برای ارزیابی نتایج کوتاه مدت عمل‌ها، به طور خاص نتایج تک گامی، منجر به نتایج بهینه در دراز مدت می‌شود. زیرا V^* پاداش تمام رفتارهای احتمالی آینده را که برای هر حالت در دسترس است، در نظر می‌گیرد. با استفاده از V^* مقدار بازگشت بهینه مورد انتظار در دراز مدت به مقداری تبدیل می‌شود که به صورت محلی و بلافاصله برای هر حالت در دسترس است. از این رو، جستجوی تک گامی رو به جلو، اقدامات بهینه درازمدت را به همراه دارد [۱۶۸]–[۱۷۱]، [۱۷۳]، [۱۷۴]. آگاهی از مقدار Q^* باز هم انتخاب عمل‌های بهینه را آسان‌تر می‌کند. با دانستن Q^* ، عامل حتی نیازی به جستجوی تک گامی رو به جلو ندارد. برای هر حالت s ، به راحتی می‌توان هر عملی را که مقدار $Q^*(s, a)$ را بیشینه نماید نمود. تابع ارزش-عمل به طور موثر نتایج جستجوی تک گامی رو به جلو را در خود ذخیره می‌نماید. این امر بازگشت مورد انتظار بهینه در دراز مدت را فراهم می‌کند که به صورت محلی و بلافاصله برای هر جفت عمل-حالت در دسترس باشد. بنابراین تابع ارزش-عمل اجازه می‌دهد که عمل‌های بهینه بدون نیاز به دانش در خصوص حالت‌های جانشین آینده و ارزش آن‌ها (دانش در خصوص دینامیک سیستم) انتخاب شوند. رابطه زیر نحوه محاسبه سیاست بهینه را با استفاده از تابع ارزش-عمل Q^* نشان می‌دهد.

$$\pi^*(s) = \arg \max_a Q^*(s, a) \quad (۱۶-۶)$$

۵-۲-۶- روش‌های انتخاب عمل

یکی از چالش‌هایی که در یادگیری تقویتی وجود دارد و در سایر انواع یادگیری وجود ندارد مصالحه یا تعاملی است که میان کاوش^۱ و بهره‌گیری از تجربه^۲ وجود دارد. کاوش موارد جدید یعنی اجازه داده شود که عامل خود کشف کند و یاد بگیرد و بهره‌گیری از تجربه یعنی عامل از دانش قبلی استفاده نماید. برای به دست آوردن پاداش زیاد عامل عمل‌هایی که قبلاً امتحان کرده و آن‌ها را در تولید پاداش موثر دیده ترجیح می‌دهد. ولی برای کشف این، عامل‌ها باید عمل‌هایی که قبلاً انتخاب نکرده را امتحان کند. یعنی باید از آنچه می‌داند استفاده کند تا پاداش بگیرد ولی مجبور است برای انتخاب اعمالی بهتر کاوش هم انجام دهد. مشکل اینجاست که نه کاوش و نه بهره‌گیری از تجربه از دانش قبلی بدون شکست خوردن نمی‌تواند دنبال شود. عامل باید انواع مختلفی از عمل‌ها را امتحان کند و آن‌هایی را که بهتر بوده اند بیشتر در نظر بگیرد [۱۶۸]–[۱۷۱]، [۱۷۳]، [۱۷۴].

به طور کلی دو نوع روش کاوش وجود دارد که عبارتند از کاوش مستقیم و کاوش غیر مستقیم. در روش‌های کاوش مستقیم نیاز به دانستن تابع احتمال انتقال حالت و تابع پاداش است. در مسائل یادگیری تقویتی معمولاً تابع احتمال انتقال حالت در دسترس نیست و به همین دلیل روش‌های کاوش مستقیم کاربرد چندانی ندارد. اما در روش‌های کاوش غیر مستقیم بر اساس ویژگی‌های "تصادفی بودن کاوش" و "انتخاب عمل بر مبنای توزیع‌های تصادفی" به انتخاب عمل می‌پردازند و همین امر آن‌ها را از روش‌های کاوش مستقیم متمایز و پرکاربردتر کرده است. در ادامه پرکاربردترین روش‌های انتخاب عمل غیر مستقیم توضیح داده می‌شود [۱۷۴].

❖ روش حریصانه^۳

^۱ Exploration

^۲ Exploitation

^۳ Greedy algorithm

این روش، ساده‌ترین روش انتخاب عمل است. در این روش، در هر حالت فقط عملی انتخاب می‌شود که دارای بیش‌ترین ارزش عمل در آن حالت است. بنابراین احتمال انتخاب عمل به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷۴]:

$$P(s, a) = \begin{cases} 1 & a = \arg \max_{a'} Q(s, a') \quad a' \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۶-۱۷)$$

گیر افتادن در نقاط بهینه محلی از معایب این روش است و زیرا روش حریصانه تنها بر اساس تجربیات حاصل شده به انتخاب عمل می‌پردازد.

❖ روش شبه‌حریصانه^۱

این روش، مشکل روش حریصانه را برطرف کرده است و پرترفدارترین روش انتخاب عمل در مسائل یادگیری تقویتی است. در روش شبه‌حریصانه با احتمال $1 - \varepsilon$ (ε یک عدد حقیقی بین صفر و یک است) عملی انتخاب می‌شود که بیش‌ترین ارزش عمل را دارد و با احتمال ε یک عمل تصادفی دیگر می‌تواند انتخاب شود [۱۷۴]:

$$P(s, a) = \begin{cases} 1 - \varepsilon & a = \arg \max_{a'} Q(s, a') \quad a' \in A \\ \varepsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۶-۱۸)$$

با استفاده از این روش، اگر $\varepsilon = 0$ انتخاب شود آن‌گاه دقیقاً مشابه روش حریصانه می‌شود. اگر $\varepsilon = 1$ باشد آن‌گاه انتخاب عمل به صورت کاملاً تصادفی و بدون استفاده از دانش قبلی انجام می‌شود. انتخاب مقدار ε تأثیر به‌سزایی در عملکرد الگوریتم و سرعت همگرایی به بهینه سراسری دارد، زیرا این پارامتر تعادل میان کاوش و بهره‌گیری از تجربه را به طور مستقیم تعیین می‌کند. ضعف دیگر الگوریتم شبه‌حریصانه این است که احتمال انتخاب عمل یک توزیع احتمالی گسسته است و این چالش در مسائل با فضای پیوسته خود را بیش‌تر نشان می‌دهد. همچنین احتمال انتخاب هریک از عمل‌های به غیر از عمل با بیش‌ترین ارزش، با هم برابر با مقدار ε است. بنابراین بین آن‌ها هیچ‌گونه تفاوتی قائل نمی‌شود هرچند که دارای ارزش عمل متفاوتی باشند.

یک روش ابتکاری برای بهبود عملکرد روش شبه‌حریصانه این است که در اوایل یادگیری مقدار ε را نزدیک به عدد یک تنظیم نمود است و سپس هرچه یادگیری افزون می‌شود با یک مکانیزمی مقدار آن کاهش یابد. با استفاده از این مکانیزم، جستجوی حداکثری در ابتدای یادگیری برای انتخاب عمل‌ها انجام می‌شود و سپس با افزایش یادگیری و کسب دانش، احتمال انتخاب عمل‌های با ارزش بیش‌تر افزایش می‌یابد.

❖ روش بیشینه نرم^۲

در این روش از یک تابع توزیع احتمال انتخاب عمل پیوسته استفاده می‌شود. همچنین مقدار احتمال انتخاب عمل‌ها به مقدار ارزش عمل‌ها وابسته است. بنابراین به جای مقدار ارزش عمل، تفاضل بین آن‌ها در احتمال اثر می‌گذارد [۱۷۴].

^۱ ε -greedy algorithm

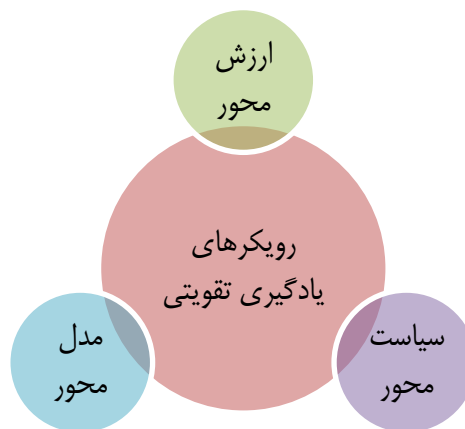
^۲ Soft-max algorithm

$$P(s, a) = \frac{e^{\left(\frac{Q(s, a)}{\tau}\right)}}{\sum_{a' \in A} e^{\left(\frac{Q(s, a')}{\tau}\right)}} \quad a' \in A \quad (6-19)$$

در رابطه‌ی فوق τ ضریب دما نام دارد و پارامتری مثبت است. ضریب دما میزان تصادفی بودن جستجو را تعیین می‌کند. هنگامی که $\tau \rightarrow 0$ روش بیشینه نرم دقیقاً همانند روش حریصانه می‌شود. از سویی دیگر هنگامی که $\tau \rightarrow \infty$ انتخاب عمل کاملاً به صورت تصادفی صورت می‌گیرد. برای ایجاد تعادل بین کاوش و بهره‌گیری از تجربه، در ابتدای فرآیند معمولاً یادگیری مقدار τ بزرگ انتخاب می‌شود و در طول فرآیند مقدار آن به تدریج با استفاده از مکانیزم‌های مطلوب کاهش می‌یابد. برای پیاده‌سازی این روش می‌توان از «چرخ رولت»^۱ استفاده کرد. بدین منظور با ایجاد یک عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ و بررسی موقعیت آن در چرخ رولت، عمل انتخاب‌شده را تعیین نمود.

۶-۲-۶- رویکردهای یادگیری تقویتی

به طور کلی سه رویکرد در یادگیری تقویتی وجود دارد که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



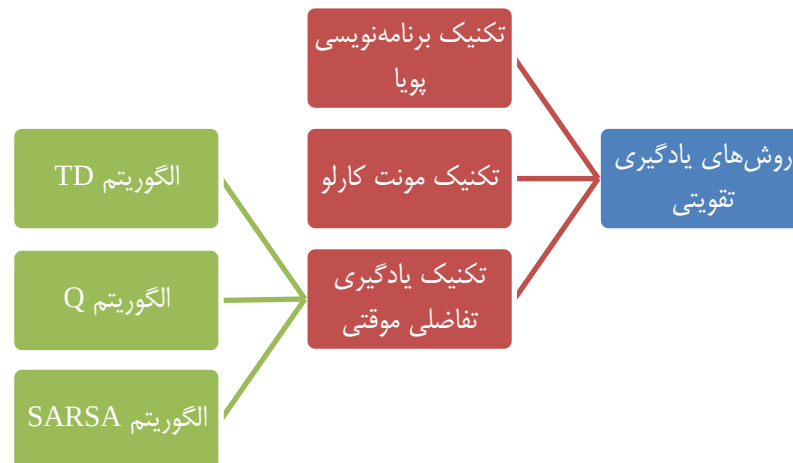
شکل ۴-۶: رویکردهای مختلف یادگیری تقویتی

در رویکرد ارزش محور، هدف بهینه‌سازی تابع ارزش است. در یادگیری تقویتی سیاست‌محور، قصد بهینه‌سازی تابع سیاست بدون استفاده از تابع ارزش است. سیاست چیزی است که رفتار عامل را در یک زمان تعیین می‌کند. عامل یک تابع سیاست را می‌آموزد که به او کمک می‌کند تا هر حالت را به بهترین عمل ممکن نگاشت کند. در یادگیری تقویتی مدل محور، محیط مدل می‌شود. این یعنی مدلی از رفتار محیط ساخته می‌شود. کاربرد این رویکرد بسیار محدود است زیرا در اکثر مسائل واقعی نمی‌توان درک کاملی از محیط داشت و لذا عامل هیچ شناخت قبلی از مدل محیط ندارد. مدل در الگوریتم‌های تقویتی مبتنی بر مدل فهمی از رفتار محیط وجود دارد به این گونه که عامل می‌داند که احتمال رفتن از یک حالت به حالت دیگر چیست. به عبارتی بدون آنکه آزمایش و تجربه کرده باشد از آینده حالت‌ها خبر دارد. اما مدل‌هایی که مبتنی

¹ Roulette wheel

بر مدل نیستند به وسیله آزمایش و خطا پیش می‌روند. به دلیل آنکه برای اکثر محیط‌های واقعی نمی‌توان مدل ساخت لذا بیشتر الگوریتم‌های کاربردی مبتنی بر الگوریتم‌هایی هستند که هیچ پیش‌فرضی در خصوص محیط ندارند. مساله مهم در این رویکرد نیاز به مدل متفاوت برای ارائه هر محیط است [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی یادگیری تقویتی وجود دارد که مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها در شکل ۵–۶ نشان داده شده است. در ادامه نحوه مدل‌سازی این روش‌ها توضیح داده می‌شود. لازم به ذکر است اگرچه در ادامه تکنیک‌های برنامه‌نویسی پویا و مونت کارلو توضیح داده شده‌اند اما کاربرد آن‌ها محدود است و تکنیک «یادگیری تفاضلی»^۱ موقت است که در حل مسائل واقعی بسیار پرکاربرد است.



شکل ۵–۶: روش‌های مختلف پیاده‌سازی یادگیری تقویتی

۶–۳- تکنیک برنامه‌نویسی پویا

در علوم ریاضیات، برنامه‌ریزی پویا روشی سودمند برای حل مسائل جستجو و بهینه‌سازی است. برخلاف برنامه‌ریزی خطی، چارچوب استاندارد برای مسائل برنامه‌ریزی پویا وجود ندارد. در واقع، آنچه برنامه‌ریزی پویا انجام می‌دهد ارائه روش برخورد کلی جهت حل این نوع مسائل است.

برنامه‌نویسی پویا شبیه روش تقسیم و حل، مسائل را با استفاده از ترکیب کردن جواب زیرمسئله‌ها حل می‌کند. الگوریتم تقسیم و حل، مسئله را به زیرمسئله‌های مستقل تقسیم می‌کند و پس از حل زیرمسئله‌ها به صورت بازگشتی، نتایج را با هم ترکیب کرده و جواب مسئله اصلی را بدست می‌آورد. بنابراین، برنامه‌نویسی پویا در مواردی قابل استفاده است که زیرمسئله‌ها مستقل نیستند. یک الگوریتم برنامه‌نویسی پویا، زیرمسئله‌ها را یک بار حل و جواب آن‌ها را در یک جدول ذخیره می‌کند و با این کار از تکرار اجرای زیرمسئله‌ها در زمانی که مجدداً به جواب آن‌ها نیاز است جلوگیری می‌کند. این عمل را تکنیک «به خاطر سپاری»^۲ می‌گویند. به طور کلی، ایده اصلی برنامه‌نویسی پویا در مسائل یادگیری تقویتی، استفاده از توابع ارزش برای سازمان‌دهی و ساختار جستجوی سیاست‌های خوب است [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

¹ Temporal difference learning

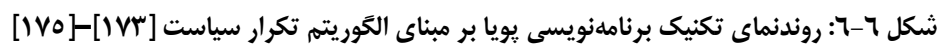
² Memorization

به طور کلی دو روش برای پیاده‌سازی تکنیک برنامه‌نویسی پویا وجود دارد که عبارتند از رویکرد «تکرار سیاست»^۱ و رویکرد «تکرار ارزش»^۲. در رویکرد تکرار سیاست، دو سیاست متوالی با هم مقایسه می‌شوند اگر متفاوت بود، دوباره مراحل تکرار می‌شوند و در غیر این صورت الگوریتم پایان می‌یابد. هنگامی که یک سیاست π ، با استفاده از تابع ارزش-حالت V^π بهبود یابد تا سیاست بهتر π' حاصل شود، آن‌گاه می‌توان سیاست $V^{\pi'}$ را محاسبه کرده و مجدداً سیاست موجود را بهبود داده تا سیاست بهتری مانند π'' به دست آید. بنابراین یک توالی سیاست‌ها و توابع ارزشی به دست می‌آید که با روندی یکنواخت بهبود می‌یابند [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵]:

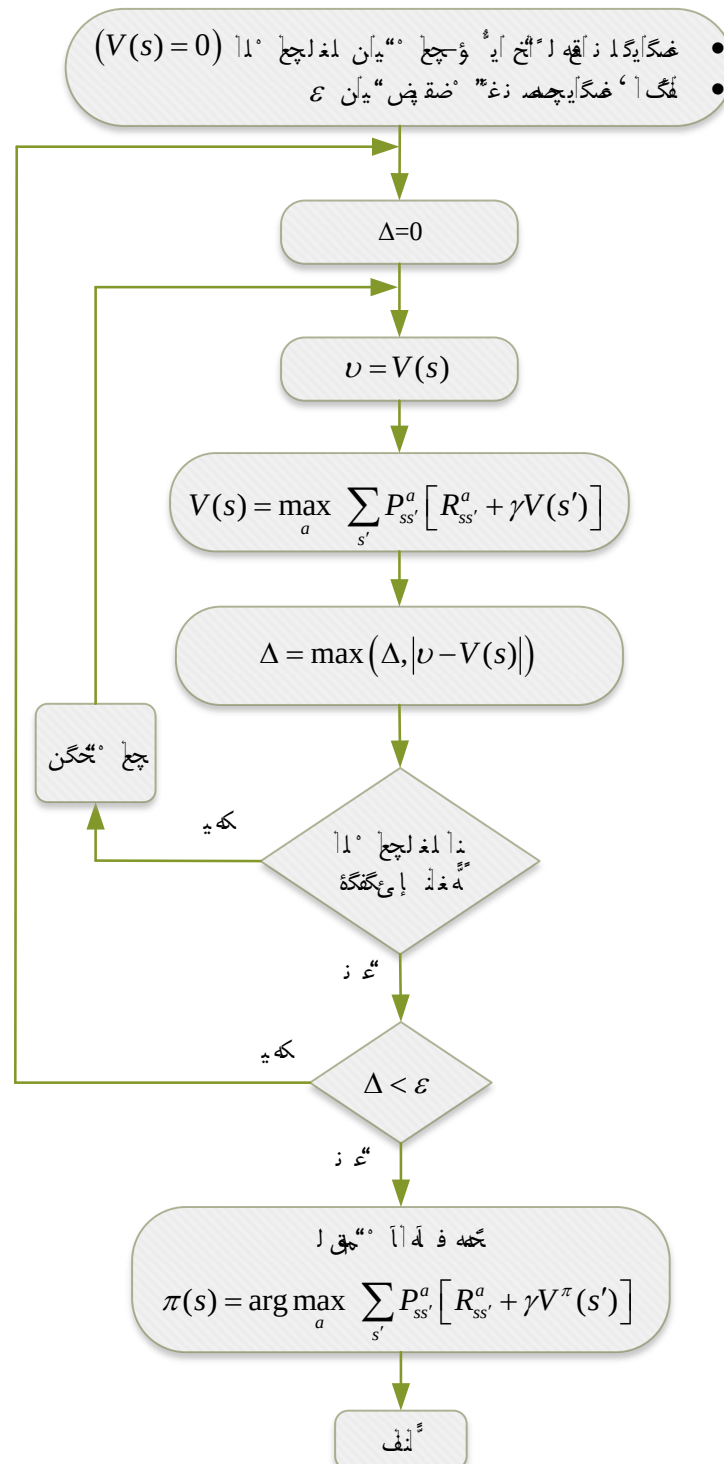
$$\xrightarrow{1.1} V^{\pi_0} \xrightarrow{\text{بهبود}} \pi_1 \xrightarrow{\text{ارزیابی}} V^{\pi_1} \xrightarrow{\text{بهبود}} \pi_2 \xrightarrow{\text{ارزیابی}} \dots \xrightarrow{\text{بهبود}} \pi^* \xrightarrow{\text{ارزیابی}} V^*$$

در این دنباله تضمین می‌شود که هر سیاست به مقدارش در مرحله قبل اکیداً بهبود یابد، مگر اینکه سیاست مرحله قبلی بهینه باشد. از آنجا که یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف فقط تعداد محدودی از سیاست‌ها را دارد، بنابراین این روند در یک تعداد محدود از تکرارها به یک سیاست بهینه و تابع ارزش-حالت بهینه همگرا می‌شود. الگوریتم تکرار سیاست معمولاً در چند تکرار همگرا می‌شود. در روندنمای شکل ۶-۶ الگوریتم تکرار سیاست در تکنیک برنامه‌نویسی پویا برای مسئله یادگیری تقویتی نشان داده شده است. $\arg \max_a$ مقداری از a را به دست می‌آورد که تابع هدف را بیشینه می‌نماید. به همین دلیل، الگوریتم بر اساس روش انتخاب عمل حریصانه، عملی را انتخاب می‌کند که در کوتاه مدت بهترین عمل به نظر می‌رسد. بنابراین سیاست به دست آمده $\pi(s)$ همواره بهتر و یا حداقل به خوبی سیاست اولیه است.

¹ Policy iteration² Value iteration



174



شکل ۶-۷: روندنمای تکنیک برنامه‌نویسی پویا بر مبنای الگوریتم تکرار ارزش [۱۷۳]–[۱۷۵]

یکی از مشکلات عمده هر دو الگوریتم معرفی شده (به طور کلی الگوریتم‌های برنامه‌سازی پویا) این است که در سرتاسر مجموعه حالت‌های یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف باید عملیات پیمایش شود و به همین دلیل نیاز به حجم سنگین محاسباتی دارند. تکنیک برنامه‌نویسی پویا برای محاسبه سیاست‌های بهینه به شناسایی کامل مدل محیطی که عامل در آن حضور دارد نیازمند است. این مدل معمولاً به صورت فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف ارائه می‌شود. به هر حال، تکنیک برنامه‌نویسی پویا به دلایل زیر در مسائل یادگیری تقویتی کاربرد بسیار محدودی دارد [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵]:

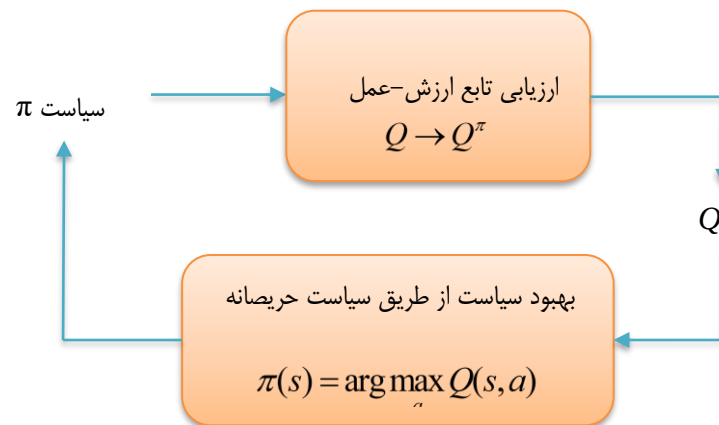
- تکنیک برنامه‌نویسی پویا یک روش مدل محور است؛ در حالی که معمولاً در مسائل یادگیری تقویتی مدل دقیقی از محیط در دسترس نیست و عامل دانش کافی از محیط ندارد و می‌خواهد با کسب تجربه، سیاست خود را بهینه نموده و بهترین عمل را انجام دهد.
- محاسبات تکنیک برنامه‌نویسی پویا زیاد است.

۴-۶- تکنیک مونت کارلو

این تکنیک، یک روش یادگیری تقویتی بدون نیاز به مدل محیط است. روش مونت کارلو به عنوان یکی از راه‌حل‌های مسئله یادگیری تقویتی از میانگین‌گیری بازگشت‌های نمونه‌برداری شده، استفاده می‌کند. این روش جهت تخمین تابع ارزش و به دست آوردن سیاست‌های بهینه به کار می‌رود. در این روش، بر خلاف روش‌های برنامه‌نویسی پویا در یادگیری تقویتی، عامل دانش کاملی از محیط ندارد. در روش‌های مونت کارلو تنها «تجربه‌های نمونه»^۱ در دسترس است، یعنی به دنباله نمونه‌های حالت‌ها، اعمال و پاداش متناظر با آن‌ها که توسط تعامل با محیط به دست می‌آیند، نیاز است. با وجود تفاوت‌های موجود میان روش مونت کارلو و برنامه‌نویسی پویا، بسیاری از ایده‌های مهم این روش از همان روش برنامه‌نویسی پویا گرفته شده‌اند. تشابه زیادی در زمینه محاسبه تابع ارزش و در نحوه تعامل برای رسیدن به بهینگی بین این دو روش وجود دارد. همچنین این روش با روش یادگیری تفاوت زمانی نیز مشابهت‌های زیادی دارد. هر دو روش الگوریتم مونت کارلو و یادگیری تفاوت زمانی از تجربه برای حل مسئله پیش‌بینی استفاده می‌کنند [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

روش مونت کارلو برای تخمین تابع ارزش-حالت V^π و تابع ارزش-عمل Q^π از تجربه‌ها استفاده می‌کند. در واقع این مقادیر با استفاده از میانگین‌گیری بازگشت‌های مشاهده‌شده پس از ملاقات با آن حالت و همچنین جفت عمل-حالت محاسبه می‌شوند. مسلماً هر چه قدر که بازگشت‌های بیشتری مشاهده شود آن‌گاه متوسط‌گیری انجام‌شده به مقدار ارزش مورد انتظار نزدیک‌تر می‌شود. این امر ایده روش مونت کارلو است. مطابق شکل ۸-۶ در هر لحظه یک تقریب از سیاست و همچنین یک تقریب از تابع ارزش-عمل حفظ می‌شود. تابع ارزش-عمل به منظور تقریب تابع ارزش سیاست فعلی همواره به‌روزرسانی می‌شود و سیاست با توجه به تابع ارزش-عمل فعلی بهبود می‌یابد. در نهایت، این تغییرات متوالی باعث می‌شود سیاست و تابع ارزش-عمل بهینه به دست آیند.

¹ Sample experience



شکل ۸-۶: روند تکرار سیاست تعمیم‌یافته [۱۷۳]–[۱۷۵]

بهبود سیاست از طریق سیاست حریصانه با توجه مقدار فعلی تابع ارزش انجام می‌شود. در این حالت یک تابع ارزش-عمل وجود دارد و بنابراین برای اتخاذ یک تصمیم حریصانه نیاز به هیچ مدلی نیست. برای هر تابع ارزش-عمل، سیاست حریصانه سیاستی است که بر هر حالت s عملی را انتخاب نماید که مقدار تابع ارزش-عمل Q را بیشینه نماید. بدین ترتیب هر سیاست π_{k+1} نسبت به سیاست π_k بهتر بوده و یا حداقل به اندازه آن خوب است. بنابراین در نهایت الگوریتم به یک سیاست بهینه و تابع ارزش بهینه متناظر با آن همگرا می‌شود. با توجه به این توضیحات، روش مونت کارلو می‌تواند در زمانی که تنها مرحله‌های نمونه موجود است و عامل دانشی از محیط ندارد، برای یافتن سیاست بهینه استفاده شوند [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

برای اطمینان از اینکه بازگشت‌هایی خوش تعریف در دسترس هستند، در اینجا تنها تکنیک‌های مونت کارلو برای «وظایف مرحله‌ای^۱» تعریف می‌شوند. بنابراین فرض می‌شود که تجربه به چندین مرحله تقسیم شده است و همه مراحل صرف نظر از اینکه چه عمل‌هایی انتخاب شده پایان می‌یابند. با توجه به این مطالب، ساختار تکنیک مونت کارلو به شرح زیر است [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵]:

- در مرحله اول، برخی از تجربیات ایجاد می‌شود. سپس دنباله‌ای از اقدامات و حالت‌ها تا رسیدن به حالت پایانی طی می‌شود. این یک توالی مرحله‌ای است. پاداش فقط در انتهای یک مرحله اهدا می‌شود. ارزش هر حالتی که از آن عبور شده متناسب با آن مطابقت داده می‌شود.
- در مرحله دوم، براساس تجربه حاصل شده برای حالت، سیاست به‌روزرسانی می‌شود. این به‌روزرسانی تنها در انتهای هر مرحله انجام می‌شود.

دو رویکرد «بر سیاست^۲» و «برون سیاست^۳» در پیاده‌سازی الگوریتم مونت کارلو وجود دارد. رویکرد بر سیاست تلاش می‌کند که سیاستی که برای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود ارزیابی کرده و بهبود بخشد.

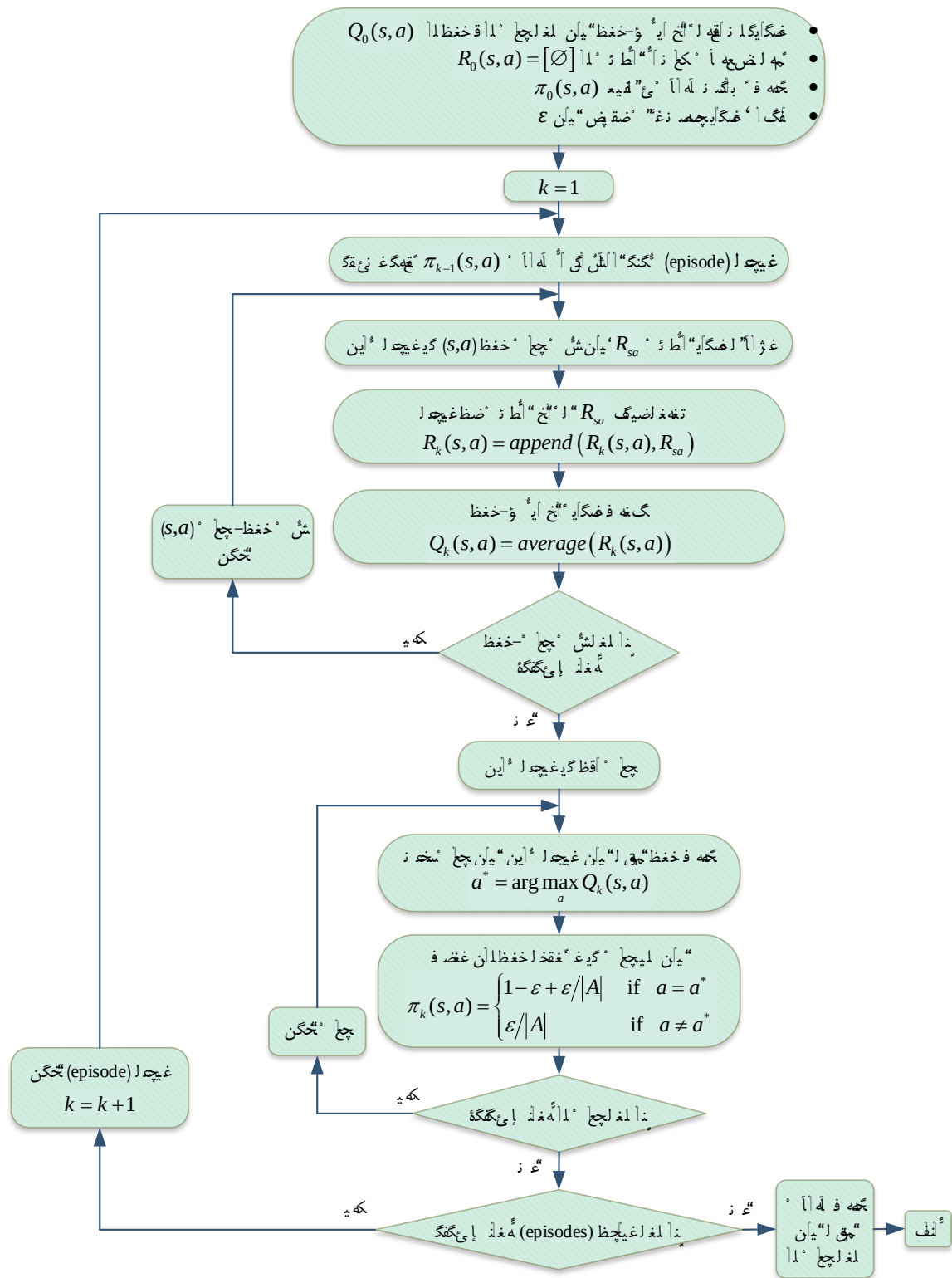
^۱ Episodic task

^۲ On-policy

^۳ Off-policy

در رویکرد بر سیاست، سیاست عموماً به صورت یک سیاست نرم است، بدین معنی که برای همه حالت‌ها و برای همه عمل‌ها شرط $\pi(s, a) > 0$ برقرار است. روش‌های متعددی برای پیاده‌سازی این سیاست وجود دارد. در اینجا از روش شبه‌حریصانه به صورت شبه‌نرم^۱ استفاده می‌شود. بدین منظور احتمال عمل‌های غیر حریصانه دارای احتمال $\frac{\varepsilon}{|A(s)|}$ و احتمال انتخاب عمل حریصانه به صورت $1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{|A(s)|}$ است. یادآوری می‌شود که ε یک مقدار حقیقی کوچک در بازه صفر و یک است. در این روش، هر سیاست شبه‌حریصانه متناظر با Q^π بهبودی بر روی سیاست شبه‌نرم π است. بنابراین اگر $\pi' \geq \pi$ باشد آن‌گاه برای همه حالت رابطه $V^{\pi'}(s) \geq V^\pi(s)$ برقرار است. حالت مساوی زمانی برقرار است که سیاست‌های π و π' هر دو بهینه باشند؛ بدین معنی که نسبت با سایر سیاست‌های شبه‌نرم بهتر بوده و یا حداقل به اندازه آن‌ها خوب باشند. با توجه به این توضیحات، شکل ۹-۶ الگوریتم بر سیاست شبه‌نرم در تکنیک مونت کارلو برای مسئله یادگیری تقویتی را به تصویر می‌کشد [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

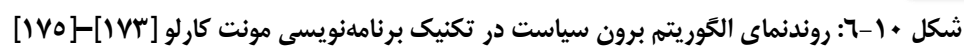
^۱ ε -soft



شکل ۹-۶: روندنمای الگوریتم بر سیاست شبه‌نرم در تکنیک برنامه‌نویسی مونت کارلو [۱۷۳]–[۱۷۵]

در الگوریتم بر سیاست، یک سیاست معین و در حضور تعداد زیادی مرحله تولیدشده توسط آن سیاست بررسی می‌شود. حال اگر فرض شود که فقط مرحله‌های تولیدشده توسط پیگیری یک سیاست متفاوت با سیاست تحت ارزیابی در دسترس باشد. هدف تخمین V^π و Q^π است ولی تنها اطلاعات موجود مرحله‌هایی هستند که با پیگیری سیاست π' به دست آمده و $\pi' \neq \pi$ است. همچنان می‌توان فرآیند یادگیری تابع ارزش-عمل را برای یک سیاست با داشتن تجربه‌های حاصل شده از یک سیاست دیگر (برون سیاست) انجام داد. در این روش لازم است که برای تخمین ارزش‌های سیاست π با استفاده از مرحله‌هایی که با پیگیری π' حاصل شده، هر عمل که احتمال دارد تحت سیاست π انتخاب شود، حداقل گاهی مواقع تحت سیاست π' انتخاب شده باشد. به عبارتی دیگر رابطه $\pi'(s, a) > 0 \rightarrow \pi(s, a) > 0$ در الگوریتم برون سیاست، سیاستی که رفتار عامل را تولید می‌کند (این سیاست، «سیاست رفتاری^۱» نامیده می‌شود) با سیاستی که در حال ارزیابی و بهبود است (این سیاست، «سیاست تخمینی^۲» نام دارد)، هیچ‌گونه ارتباطی با یکدیگر ندارند. لذا با پیگیری سیاست رفتاری، به بهبود و آموزش سیاست تخمینی پرداخته می‌شود. برای این منظور باید برای همه عمل‌هایی که ممکن است در سیاست تخمینی انتخاب شوند، احتمالی غیر صفر در نظر گرفته شود. در این شبه کد، سیاست رفتاری π' به صورت یک سیاست نرم دلخواه است و سیاست تخمینی π نسبت به Q که تخمینی از Q^π است یک سیاست حریصانه است. این سیاست رفتاری هرگونه سیاستی می‌تواند باشد اما برای همگرایی سیاست تخمینی π به سیاست بهینه لازم است که تعداد بازگشت‌ها برای هر جفت عمل-حالت به سمت بی‌نهایت میل کند. به هر حال در واقعیت با انتخاب صحیح و هوشمندانه سیاست رفتاری، پس از یک حد از تکرار سیاست تخمینی به یک سیاست بهینه همگرا می‌شود. مهم‌ترین ضعف این روش این است که اگر عمل‌های غیرحریصانه به صورت مکرر انتخاب شوند آن‌گاه سرعت همگرایی به سیاست بهینه به طور چشم‌گیری کند خواهد شد؛ مخصوصاً اگر انتخاب عمل‌های غیرحریصانه در بخش‌های آغازین دنباله مرحله‌ها رخ دهد. با توجه به توضیحات فوق‌الذکر، شکل ۱۰-۶ الگوریتم برون سیاست در تکنیک مونت کارلو برای مسئله یادگیری تقویتی را نشان می‌دهد [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

^۱ Behavior policy^۲ Estimation policy



۵-۶- تکنیک یادگیری تفاضلی موقتی

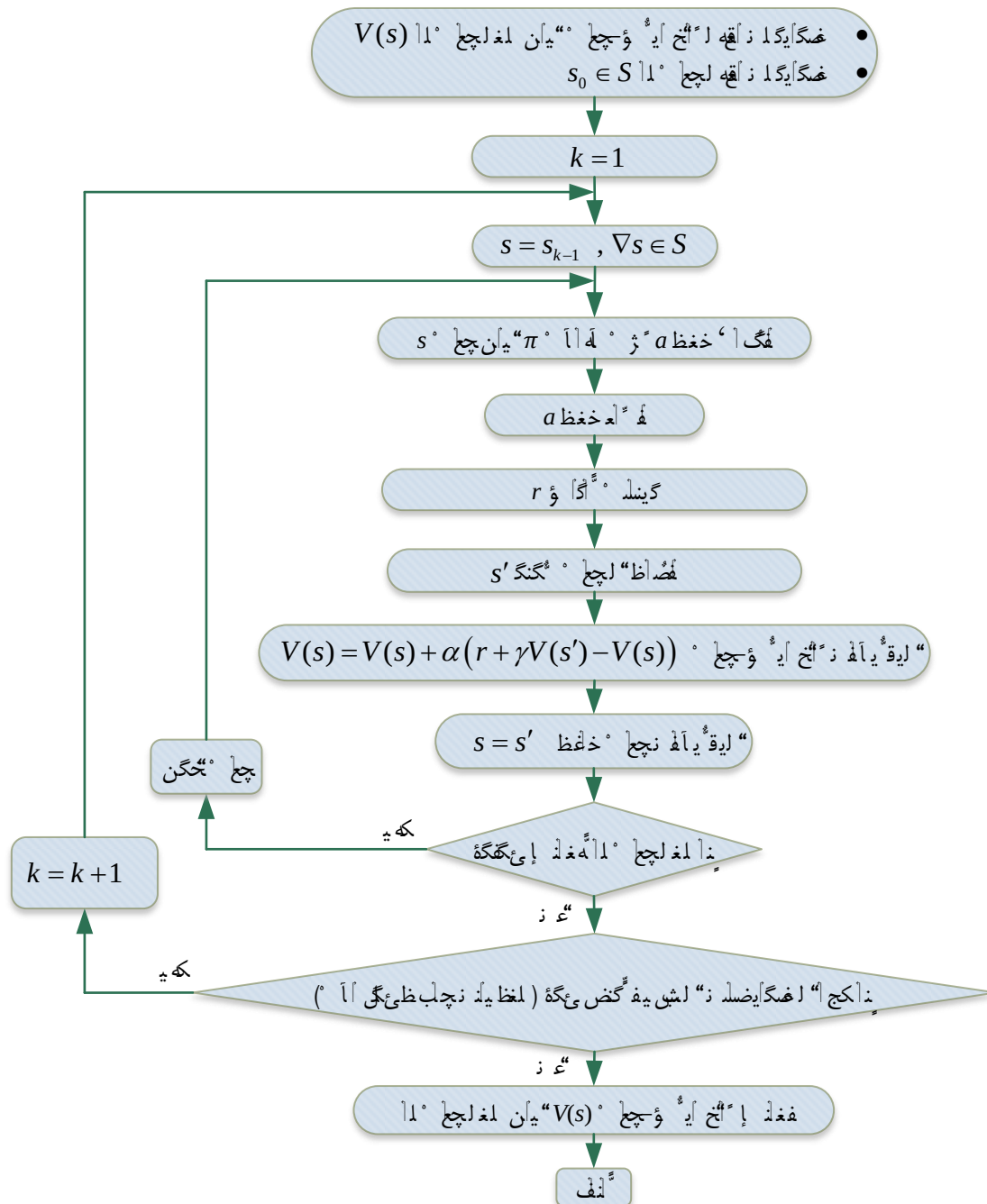
تکنیک‌های یادگیری تفاضلی موقت از ترکیب مزایای دو روش مونت کارلو و برنامه‌نویسی پویا استفاده می‌کنند. این تکنیک همانند روش مونت کارلو از روش‌های بدون نیاز به مدل است و به همین دلیل تنها بر اساس تجربه‌های عامل به یادگیری تابع ارزش می‌پردازد. از طرفی دیگر، همانند روش برنامه‌نویسی پویا، تخمین ارزش هر حالت بر اساس ارزش‌های تخمین زده شده در فرآیند یادگیری برای سایر حالت‌ها به‌روزرسانی می‌شود. مزیت این تکنیک نسبت به تکنیک مونت کارلو این است که به‌روزرسانی توابع ارزش و ارزش-عمل در هر نمونه زمانی t به‌روزرسانی می‌شوند، در صورتی که این به‌روزرسانی در تکنیک مونت کارلو در پایان هر مرحله (episode) انجام می‌شود. این تکنیک، متداول‌ترین و پرکاربردترین تکنیک در مسائل یادگیری تقویتی است. تکنیک یادگیری تفاضلی موقتی به سه دسته اصلی الگوریتم $TD(0)$ ، الگوریتم Q و الگوریتم SARSA تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

❖ الگوریتم $TD(0)$

شکل ۱۱-۶ الگوریتم $TD(0)$ را برای ارزیابی یک سیاست موجود π نشان می‌دهد. در آغاز هر مرحله، ارزش اولیه برای همه حالت‌ها مقداردهی شده و شرط خاتمه یک مرحله رسیدن به حالت پایانی است. یک عمل با توجه به سیاست و حالت فعلی انتخاب می‌گردد و به محیط اعمال می‌شود. در پی آن، حالت بعدی s' که عامل در آن قرار می‌گیرد و همچنین مقدار پاداش r به عامل بر گردانده می‌شود. در نهایت، تابع ارزش-حالت $V(s)$ به‌روزرسانی شده و حالت فعلی s به حالت s' تغییر می‌یابد. خروجی الگوریتم $TD(0)$ تابع ارزش-حالت $V(s)$ است. پارامتر α نرخ یادگیری نام دارد و مقداری در بازه $[0,1]$ دارد. این متغیر تعیین می‌کند که تا چه میزان اطلاعات به‌دست آمده جدید بر اطلاعات قدیمی ترجیح داده می‌شود. مقدار صفر باعث می‌شود که عامل چیزی یاد نگیرد و مقدار یک باعث می‌شود که عامل فقط اطلاعات جدید را ملاک قرار دهد. خطای موقتی در الگوریتم $TD(0)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta_t = r_t + \gamma V(s') - V(s_t) \quad (۶-۲۰)$$

این خطا به ازای یک مشاهده محاسبه می‌شود. یعنی وقتی عامل در زمان t موقعیت s قرار دارد. به ازای یک مشاهده، محاسبه می‌شود که چه پاداشی دریافت می‌شود و عامل به کدام حالت جدید s' می‌رود. سپس تفاوت این مقدار با تخمین تابع ارزش-حالت در مرحله قبل به عنوان خطا محاسبه و به تخمین تابع ارزش-حالت اضافه می‌شود. اگر مقدار خطا به سمت صفر نزدیک شود، یادگیری به پایان می‌رسد. در ابتدای یادگیری مقدار خطا زیاد است. ولی هر چه در روند یادگیری افزایش می‌یابد، مقدار خطا به سمت صفر نزدیک می‌شود و در نتیجه، نقش پاداش لحظه‌ای کم می‌شود. در این روش از تک مشاهده بهره گرفته می‌شود و به همین دلیل به این روش $TD(0)$ گفته می‌شود [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].



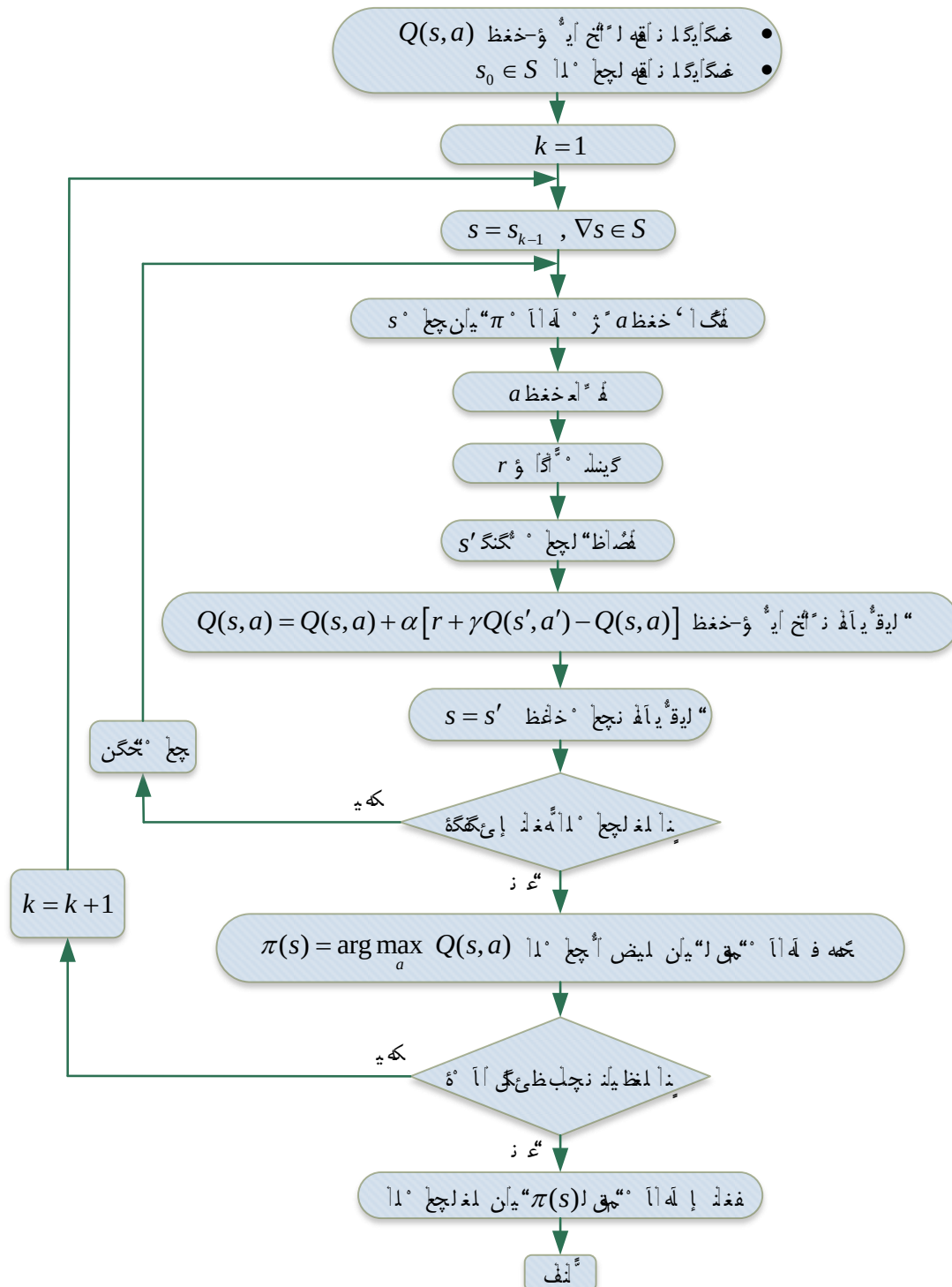
در تکنیک تفاضلی موقت [۱۷۳]–[۱۷۵] TD(0) شکل ۱۱–۶: روندنمای الگوریتم

❖ الگوریتم SARSA

الگوریتم SARSA یک روش بدون نیاز به مدل و مبتنی بر سیاست محسوب می‌شود که در آن ارزش‌ها را براساس عمل کنونی a که از سیاست کنونی آن مشتق شده می‌آموزد. نام SARSA نمایشی از کاربرد عناصر پنج‌تایی $(s_t, a_t, r_t, s_{t+1}, a_{t+1})$ معادل با (حالت، عمل، پاداش، حالت، عمل) است. محاسبه تابع ارزش-عمل و به‌روزرسانی آن مطابق رابطه (۶–۲۱) است [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)] \quad (6-21)$$

این به‌روزرسانی پس از هر حالت غیرپایانی s_t انجام می‌شود. اگر مقدار مقدار s_{t+1} حالت پایانی باشد آن‌گاه مقدار $Q(s_{t+1}, a_{t+1})$ برابر صفر قرار داده می‌شود. شکل ۶-۱۲ روندنمای الگوریتم SARSA در یادگیری تقویتی را نشان می‌دهد. در آغاز هر مرحله، ارزش اولیه برای همه حالت‌ها مقداردهی شده و شرط خاتمه یک مرحله رسیدن به حالت پایانی است. یک عمل با توجه به تابع ارزش-عمل Q و حالت فعلی انتخاب می‌گردد و به محیط اعمال می‌شود. در پی آن، حالت بعدی s' که عامل در آن قرار می‌گیرد و همچنین مقدار پاداش r به عامل بر گردانده می‌شود. مقدار تابع ارزش-عمل Q به‌روزرسانی شده و حالت فعلی s به حالت s' تغییر می‌یابد. فاکتور تخفیف γ اهمیت پاداش‌های آینده را تعیین می‌کند. مقدار صفر باعث می‌شود عامل ماهیت فرصت‌طلبانه گرفته و فقط پاداش‌های فعلی را مد نظر قرار می‌دهد. در حالی که مقدار یک عامل را ترغیب می‌کند برای یک دوره زمانی طولانی برای کسب پاداش تلاش کند. پارامتر α تعیین می‌کند که تا چه میزان اطلاعات به‌دست‌آمده جدید بر اطلاعات قدیمی ترجیح داده می‌شود. مقدار صفر باعث می‌شود که عامل چیزی یاد نگیرد و مقدار یک باعث می‌شود که عامل فقط اطلاعات جدید را ملاک قرار دهد. خروجی الگوریتم SARSA تابع سیاست بهینه π است که توسط الگوریتم حریصانه بر روی تابع ارزش-عمل $Q(s, a)$ به دست می‌آید. در این الگوریتم هیچ تابعی به عنوان تابع سیاست به صورت صریح ذخیره نمی‌شود. بنابراین تابع سیاست، یک تابع ضمنی است که از طریق انتخاب عمل مشخص می‌شود. به عنوان مثال، یکی از روش‌های معمول انتخاب عمل در الگوریتم SARSA، روش انتخاب عمل شبه‌حریصانه است که به طور ضمنی باعث ایجاد یک تابع سیاست تصادفی می‌شود، به گونه‌ای که با تغییر مقدار تابع ارزش-عمل در هر حالت، احتمال انتخاب عمل‌ها در هر حالت و در نتیجه سیاست انتخاب عمل تغییر می‌کند. شرط همگرایی الگوریتم به سیاست بهینه این است که همه زوج‌های حالت-عمل به طور پیوسته و نامحدود به‌روزرسانی شوند. اما در عمل، با انتخاب k به اندازه کافی بزرگ، پس از تعداد کافی تکرار، الگوریتم همگرا می‌شود. بدین معنی که به عنوان مثال، قدرمطلق اختلاف $Q(s, a)$ در دو مرحله متوالی از یک مقدار آستانه کوچک‌تر شده است [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].



در تکنیک تفاضلی موقتی [۱۷۳]–[۱۷۵] SARSA شکل ۱۲–۶: روندنمای الگوریتم

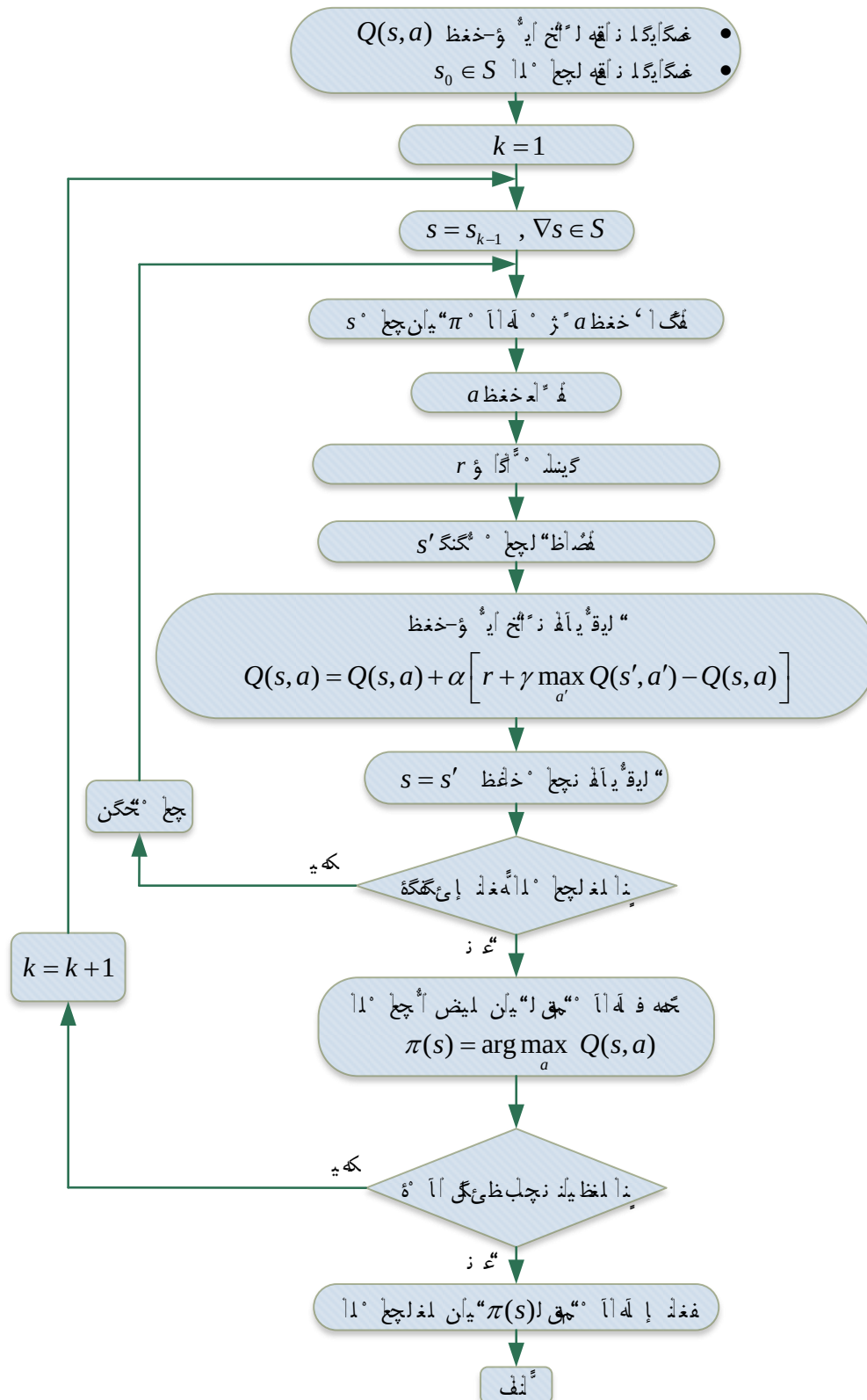
❖ الگوریتم Q

الگوریتم Q بسیار شبیه به الگوریتم SARSA است. این الگوریتم یک روش بدون نیاز به مدل و برون سیاست است که در آن عامل ارزش‌ها را بر اساس عمل بهینه a^* که از سیاست دیگری مشتق شده می‌آموزد. در هر حالت (موقعیت) توسط سیاست شبه‌حریصانه عمل انتخاب می‌شود. ولی مقدار تابع ارزش-عمل بر اساس سیاست حریصانه به‌روزرسانی می‌شود. الگوریتم Q مشهورترین و کاربردی‌ترین تکنیک تفاضلی موقتی است. در ساده‌ترین شکل آن، قاعده به‌روزرسانی تابع ارزش-عمل در «یادگیری Q تک‌گامی»^۱ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \right] \quad (۶-۲۲)$$

در این حالت، تابع ارزش-عمل آموخته‌شده Q به طور مستقیم، تابع ارزش-عمل بهینه Q^* را مستقل از سیاست دنبال‌شده، تقریب می‌زند. شکل ۶-۱۳ روندنمای الگوریتم Q در یادگیری تقویتی را نشان می‌دهد. در آغاز هر مرحله، ارزش اولیه برای همه حالت‌ها مقداردهی شده و شرط خاتمه یک مرحله رسیدن به حالت پایانی است. یک عمل با توجه به تابع ارزش-عمل Q و حالت فعلی انتخاب می‌گردد و به محیط اعمال می‌شود. در پی آن، حالت بعدی s' که عامل در آن قرار می‌گیرد و همچنین مقدار پاداش r به عامل برگردانده می‌شود. مقدار تابع ارزش-عمل به‌روزرسانی شده و حالت فعلی s به حالت s' تغییر می‌یابد. خروجی الگوریتم Q تابع سیاست بهینه π است که توسط الگوریتم حریصانه بر روی تابع ارزش-عمل $Q(s, a)$ به دست می‌آید. شرط همگرایی الگوریتم به سیاست بهینه این است که همه زوج‌های حالت-عمل به طور پیوسته و نامحدود به‌روزرسانی شوند. اما در عمل، با انتخاب k به اندازه کافی بزرگ پس از تعداد کافی تکرار، الگوریتم همگرا می‌شود. بدین معنی که به عنوان مثال، قدرمطلق اختلاف $Q(s, a)$ در دو مرحله متوالی از یک مقدار آستانه کوچک‌تر شده است. در این الگوریتم هیچ تابعی به عنوان تابع سیاست به صورت صریح ذخیره نمی‌شود. استفاده از عبارت $\max_a Q(s_{t+1}, a)$ به جای عبارت $Q(s_{t+1}, a)$ در رابطه به‌روزرسانی تابع ارزش-عمل تنها تفاوت در الگوریتم SARSA و Q است که منجر شده است الگوریتم SARSA از نوع مبتنی بر سیاست و الگوریتم Q از نوع برون سیاست باشد. از آنجایی که الگوریتم Q، برای به‌روزرسانی تابع ارزش-عمل نیازی به یک سیاست معین از قبل تعیین شده نیست که عمل بعدی a_{t+1} را برای هر حالت بعدی s_{t+1} مشخص کند، لذا معمولاً (نه حتماً) سریع‌تر از الگوریتم SARSA به همگرایی می‌رسد [۱۷۱]، [۱۷۳]–[۱۷۵].

¹ One-step Q-learning



در تکنیک تفاضلی موقت [۱۷۳]–[۱۷۵] Q شکل ۱۳–۶: روندنمای الگوریتم

فصل ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

امروزه فناوری یادگیری ماشین که بخش عظیمی از حوزه هوش مصنوعی را تشکیل داده شده است، کاربردهای بسیار زیادی در صنعت پیدا کرده است. این امر با گسترش سنسورهای مختلف اندازه‌گیری، افزایش قدرت محاسباتی پردازنده‌ها و بالابردن سرعت محاسبات و همچنین توسعه الگوریتم‌های نرم‌افزاری قدرتمند میسر شده است.

در صنعت برق با گسترش زیرساخت‌های شبکه هوشمند که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های وسیع در سطح شبکه و اقدامات کنترلی هوشمند با استفاده از ابزارها و الگوریتم‌های محاسباتی پیشرفته است، دروازه‌های زیادی برای استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین در مدیریت، کنترل و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت پدید آمده است. بر اساس ویژگی‌های هر کدام از تکنیک‌های یادگیری ماشین که در این گزارش به طور مفصل بحث شد، می‌توان از آن‌ها در هر حوزه خاص از مطالعات سیستم قدرت استفاده نمود. در تکنیک‌های یادگیری با نظارت باید ورودی و خروجی برای فرایند آموزش کاملاً مشخص باشد. به همین دلیل این نوع تکنیک‌ها عمدتاً برای کاربردهای پیش‌بینی و شناسایی در سیستم قدرت می‌توانند استفاده شوند. تکنیک‌های بدون نظارت فقط نیاز به داده ورودی دارند و به همین کاربردهای آن‌ها در سیستم‌های قدرت به نسبت محدود است و عمدتاً برای کشف الگوهای موجود در میان داده‌ها و محاسبات آماری استفاده می‌شوند. تکنیک‌های یادگیری تقویتی یک گزینه بسیار مناسب برای کنترل و مدیریت شبکه برق هستند زیرا از تجربیات به دست آمده استفاده می‌کنند تا در آینده بتوانند بهترین تصمیم را بگیرند. به همین دلیل در فرایند بهینه‌سازی و اقدامات کنترلی در فضای رقابتی با وجود بازیگران مستقل (عامل‌های مستقل) که هر کدام هدف مخصوص به خود را دارند کاربرد بسیار زیادی پیدا کرده‌اند. امروزه با گسترش ریزشبکه و انواع بازیگران مختلف در سیستم‌های قدرت مانند منابع انرژی توزیع شده، بارهای هوشمند، ریزشبکه و نانوشبکه‌ها، ادوات کنترلی هوشمند در هر سه سطح تولید، انتقال و توزیع و ... زمینه به کارگیری این تکنیک‌ها کاملاً فراهم گردیده است. اما در هر صورت لازم به ذکر است که کارایی همه تکنیک‌های یادگیری ماشین مستلزم وجود داده‌ها است. به عبارتی دیگر، این تکنیک‌ها داده-محور هستند. اگر داده‌ای برای آموزش وجود نداشته باشد مسلماً هیچ‌یک از تکنیک‌های یادگیری ماشین کاربردی نخواهند داشت.

جدول ۷-۱ یک دید کلی از کاربردهای فناوریانه تکنیک‌های یادگیری ماشین در شبکه‌های برق ارائه می‌دهد. این جدول یک شمای کلی است و بررسی‌های تفصیلی برای هر یک از محورهای پژوهشی گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت در گزارش فاز سوم پروژه ارائه می‌شود.

جدول ۱-۷: شمای کلی از کاربردهای فناوریانه تکنیک‌های یادگیری ماشین در شبکه‌های برق

تکنیک یادگیری	کاربردها
با نظارت	• رگرسیون و پیش‌بینی مانند: ✓ ارزیابی امنیت ✓ پیش‌بینی تولید، بار، قیمت برق، آب و هوا و ... ✓ پیش‌بینی تعمیرات ✓ شناسایی و پیش‌بینی برق‌دزدی ✓ پاسخگویی بار • کلاس‌بندی ✓ ارزیابی امنیت ✓ تشخیص وقوع و نوع خطا در سیستم ✓ مکان‌یابی خطا ✓ پایش بار مصرفی ✓ پیش‌بینی انواع ناپایداری‌های ولتاژ، فرکانس، زاویه‌ای و گذرای سیستم قدرت در هنگام رخداد خطا ✓ شناسایی داده‌های بد در اندازه‌گیری‌ها
بدون نظارت	• سناریوسازی • کاهش مرتبه سیستم برای انواع مطالعات ✓ کاهش مرتبه سیستم برای معادل‌سازی دینامیکی سیستم • خوشه‌بندی اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در سیستم • تشخیص ناهنجاری‌ها در سیستم
تقویتی	• کنترل بهینه • انتخاب و تعیین اقدام و استراتژی کنترلی و مدیریتی مانند: ✓ مدیریت دارایی ✓ مدیریت توان روی خطوط ✓ کنترل خودکار تولید ✓ کنترل ناحیه گسترده ✓ بازیابی سیستم ✓ کنترل ریز شبکه ✓ اقدامات کنترلی کنشگرایانه • تنظیم پارامترهای تجهیزات کنترلی ✓ برای بهبود پایداری ولتاژ ✓ برای بهبود پایداری زاویه‌ای ✓ برای بهبود پایداری فرکانس ✓ برای بهبود پایداری گذرا

تکنیک یادگیری	کاربردها
	✓ برای بهبود امنیت سیستم قدرت • فرآیند بهینه‌سازی در فضای رقابتی: ✓ عملیات بازار برق در حضور بازیگران (عامل‌های) مختلف با هدف‌های مستقل مربوط به خود ✓ مدیریت انرژی در ریزشبکه در حضور بازیگران (عامل‌های) مختلف: ▪ عدم قطعیت‌های بسیار زیاد منابع تجدیدپذیر ▪ منابع سنتی ▪ ذخیره‌سازها و تعیین استراتژی‌های بهینه شارژ و تخلیه انرژی ▪ بارهای مصرفی هوشمند ▪ استراتژی‌های بهینه استفاده از خوردوهای الکتریکی

۱-۷- مراجع

- [1] L. Cheng and T. Yu, "A new generation of AI: A review and perspective on machine learning technologies applied to smart energy and electric power systems," *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 6, pp. 1928–1973, 2019.
- [2] "No Title." [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/هوش_مصنوعی.
- [3] D. Crevier, *AI: the tumultuous history of the search for artificial intelligence*. Basic Books, Inc., 1993.
- [4] A. L. Samuel, "Some studies in machine learning using the game of checkers," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 3, no. 3, pp. 210–229, 1959.
- [5] A. L. Samuel, "Some studies in machine learning using the game of checkers. II—Recent progress," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 11, no. 6, pp. 601–617, 1967.
- [6] J. Schaeffer, "Didn't Samuel Solve That Game?," in *One Jump Ahead*, Springer, 2009, pp. 1–11.
- [7] S. Russell and P. Norvig, "Artificial intelligence: a modern approach," 2002.
- [8] D. Poole, A. Mackworth, and R. Goebel, "Computational Intelligence: a logical approach," 1998.
- [9] A. Mosavi, M. Salimi, S. Faizollahzadeh Ardabili, T. Rabczuk, S. Shamsirband, and A. R. Varkonyi-Koczy, "State of the art of machine learning models in energy systems, a systematic review," *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1301, 2019.
- [10] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/artificial-intelligence-knowledge-map/>.
- [11] [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2018/08/22/ai-knowledge-map-how-to-classify-ai-technologies/#14a34ae57773>.
- [12] [Online]. Available: <https://www.iotfig.com/article/تفاوت-میان-هوش-مصنوعی-یادگیری-ماشین-و>.
- [13] M. Aalabaf-Sabaghi, "An Introduction to Data, Everything You Need to Know About AI: Big Data and Data Science," *J. R. Stat. Soc. Ser. A*, vol. 183, no. 4, p. 1828, 2020.
- [14] A. Sehgal, H. La, S. Louis, and H. Nguyen, "Deep reinforcement learning using genetic algorithm for parameter optimization," in *2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, 2019, pp. 596–601.
- [15] D. S. Levine, *Introduction to neural and cognitive modeling*. Routledge, 2018.
- [16] H. B. Demuth, M. H. Beale, O. De Jess, and M. T. Hagan, *Neural network design*. Martin Hagan, 2014.
- [17] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.
- [18] J. Schmidhuber, "Deep learning in neural networks: An overview," *Neural networks*, vol. 61, pp. 85–117, 2015.
- [19] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/generative-adversarial-networks/>.
- [20] I. Goodfellow, "NIPS 2016 tutorial: Generative adversarial networks," *arXiv Prepr. arXiv1701.00160*, 2016.
- [21] [Online]. Available: <https://dataio.ir/مولد-تهاجمی-gan-qcuxcivar6i2>.
- [22] R. Szeliski, *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [23] C. Manning and H. Schutze, *Foundations of statistical natural language processing*. MIT press, 1999.
- [24] K. R. Chowdhary, "Natural language processing," in *Fundamentals of Artificial Intelligence*,

- Springer, 2020, pp. 603–649.
- [25] [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/پردازش_زبان‌های_طبیعی.
- [26] R. W. Picard, *Affective computing*. MIT press, 2000.
- [27] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/evolutionary-computation/>.
- [28] T. Bäck, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz, *Evolutionary computation 1: Basic algorithms and operators*. CRC press, 2018.
- [29] D. B. Fogel, *Evolutionary computation: toward a new philosophy of machine intelligence*, vol. 1. John Wiley & Sons, 2006.
- [30] T. Bäck, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz, “Handbook of evolutionary computation,” *Release*, vol. 97, no. 1, p. B1, 1997.
- [31] M. N. Huhns, *Distributed Artificial Intelligence: Volume I*, vol. 1. Elsevier, 2012.
- [32] R. Gasser and M. N. Huhns, *Distributed Artificial Intelligence: Volume II*, vol. 2. Morgan Kaufmann, 2014.
- [33] G. M. P. O’Hare and N. R. Jennings, *Foundations of distributed artificial intelligence*, vol. 9. John Wiley & Sons, 1996.
- [34] A. H. Bond and L. Gasser, *Readings in distributed artificial intelligence*. Morgan Kaufmann, 2014.
- [35] L. Julia and A. Cheyer, “Using a community of distributed electronic agents to support a highly mobile, ambient computing environment.” Google Patents, 25-Apr-2006.
- [36] [Online]. Available: <https://onlinebme.com/unit/difference-between-ai-machine-learning-and-deep-learning/>.
- [37] [Online]. Available: <https://fanology.ir/tag/machine-learning/>.
- [38] M. I. Jordan and T. M. Mitchell, “Machine learning: Trends, perspectives, and prospects,” *Science (80-.)*, vol. 349, no. 6245, pp. 255–260, 2015.
- [39] D. Michie, D. J. Spiegelhalter, and C. C. Taylor, “Machine learning,” *Neural Stat. Classif.*, vol. 13, no. 1994, pp. 1–298, 1994.
- [40] M. Mohri, A. Rostamizadeh, and A. Talwalkar, *Foundations of machine learning*. MIT press, 2018.
- [41] C. M. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*. springer, 2006.
- [42] E. Alpaydin, *Introduction to machine learning*. MIT press, 2020.
- [43] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/introduction-to-machine-learning/>.
- [44] P. Domingos, *The master algorithm: How the quest for the ultimate learning machine will remake our world*. Basic Books, 2015.
- [45] M. Şahin, Y. Kaya, M. Uyar, and S. Yıldırım, “Application of extreme learning machine for estimating solar radiation from satellite data,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 205–212, 2014.
- [46] J. C. Sousa, H. M. Jorge, and L. P. Neves, “Short-term load forecasting based on support vector regression and load profiling,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 38, no. 3, pp. 350–362, 2014.
- [47] [Online]. Available: <http://datastack.ir/machine-learning/> یادگیری-ماشین-با-استفاده-از-سکوی-آپاچی.
- [48] [Online]. Available: <https://www.shabakeh-mag.com/workshop/programming/10395/>-ویژه-برنامه‌نویسی-بهترین-زبان‌های-برنامه‌نویسی-ویژه-یادگیری-ماشینی-در-سال-۲۰۱۷.
- [49] A. C. Müller and S. Guido, *Introduction to machine learning with Python: a guide for data*

- scientists. “O’Reilly Media, Inc.,” 2016.
- [50] S. Raschka, *Python machine learning*. Packt publishing ltd, 2015.
- [51] P. R. Nicolas, *Scala for machine learning: data processing, ML algorithms, smart analytics, and more*. Packt Publishing Ltd, 2017.
- [52] K. Ramasubramanian and A. Singh, *Machine learning using R*, no. 1. Springer, 2017.
- [53] B. Bischl *et al.*, “mlr: Machine Learning in R,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 5938–5942, 2016.
- [54] K. Gao, G. Mei, F. Piccialli, S. Cuomo, J. Tu, and Z. Huo, “Julia language in machine learning: Algorithms, applications, and open issues,” *Comput. Sci. Rev.*, vol. 37, p. 100254, 2020.
- [55] [Online]. Available: <https://sokanacademy.com/blog/4797/یادگیری-ماشینی-چیست/>.
- [56] D. E. King, “Dlib-ml: A machine learning toolkit,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 10, pp. 1755–1758, 2009.
- [57] R. R. Curtin, M. Edel, M. Lozhnikov, Y. Mentekidis, S. Ghaisas, and S. Zhang, “mlpack 3: a fast, flexible machine learning library,” *J. Open Source Softw.*, vol. 3, no. 26, p. 726, 2018.
- [58] [Online]. Available: <https://shahaab-co.ir/mag/edu/ml/java-machine-learning-libraries/>.
- [59] B. Kaluza, *Machine Learning in Java*. Packt Publishing Ltd, 2016.
- [60] I. H. Witten and E. Frank, “Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations,” *Acm Sigmod Rec.*, vol. 31, no. 1, pp. 76–77, 2002.
- [61] [Online]. Available: <https://toplearn.com/blog/55/ai-بهترین-زبان-های-برنامه-نویسی-برای-توسعه/>.
- [62] [Online]. Available: <https://faceit.ir/news/6039/13-فریم-ورک-پیشرفته-برای-یادگیری-ماشین-6039/>.
- [63] [Online]. Available: <http://www.ai-man.ir/post/best-ai-machine-learning-tools-and-apis-for-developers/>.
- [64] [Online]. Available: <https://fanology.ir/framework-vs-library-vs-platform-vs-api-vs-sdk-vs-toolkits-vs-ide/>.
- [65] [Online]. Available: <https://www.idginsiderpro.com/article/3026262/13-frameworks-for-mastering-machine-learning.html>.
- [66] [Online]. Available: <https://fanology.ir/top-12-artificial-intelligence-tools/>.
- [67] [Online]. Available: <http://datastack.ir/machine-learning>.
- [68] [Online]. Available: <https://one-geek.net/open-source-artificial-intelligence-tools-software-linux/>.
- [69] [Online]. Available: <https://oxteam.ir/google-automl-cloud-یادگیری-ماشینی-گوگل/>.
- [70] M. Cord and P. Cunningham, “Machine Learning Techniques for Multimedia,” 2008, pp. 251–262, 2007.
- [71] A. Singh, N. Thakur, and A. Sharma, “A review of supervised machine learning algorithms,” in *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 2016, pp. 1310–1315.
- [72] A. Smola and S. V. N. Vishwanathan, “Introduction to machine learning,” *Cambridge Univ. UK*, vol. 32, no. 34, p. 2008, 2008.
- [73] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/supervised-learning-with-python/>.
- [74] [Online]. Available: <https://medium.com/@chisoftware/supervised-vs-unsupervised-machine-learning-7f26118d5ee6>.
- [75] [Online]. Available: <https://www.matlabdl.com/classification-and-classification-algorithms/>.
- [76] [Online]. Available: <https://shahaab-co.ir/mag/edu/ml/machine-learning-in-opencv-chapter-2>.

- [77] [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/الگوریتم_کی_نزدیکترین_همسایه.
- [78] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/introduction-k-neighbours-algorithm-clustering/>.
- [79] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/distance-functions/>.
- [80] M. Norouzi, D. J. Fleet, and R. R. Salakhutdinov, "Hamming distance metric learning," in *Advances in neural information processing systems*, 2012, pp. 1061–1069.
- [81] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/درخت-تصمیم-spss/>.
- [82] [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/درخت_تصمیم.
- [83] L. Rokach and O. Z. Maimon, *Data mining with decision trees: theory and applications*, vol. 69. World scientific, 2008.
- [84] "No Title." [Online]. Available: <https://behsanandish.com/learning/generalipmv/درخت-تصمیم/>.
- [85] "No Title." [Online]. Available: <https://www.dataacademy.ir/-انواع-درخت-تصمیم-و-الگوریتم-درخت-تصمیم-گیری>.
- [86] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/understaing-support-vector-machine-example-code/>.
- [87] [Online]. Available: <https://www.matlab1.ir/support-vector-machine-آشنایی-با-ماشین-بردار-پشتیبان-svm/>.
- [88] W. S. Noble, "What is a support vector machine?," *Nat. Biotechnol.*, vol. 24, no. 12, pp. 1565–1567, 2006.
- [89] Y. Ma and G. Guo, *Support vector machines applications*, vol. 649. Springer, 2014.
- [90] S. Suthaharan, "Support vector machine," in *Machine learning models and algorithms for big data classification*, Springer, 2016, pp. 207–235.
- [91] [Online]. Available: <http://www.bigdata.ir/1394/05/svm-یا-ماشین-بردار-پشتیبان-به-زبان-ساده-svm/>.
- [92] I. Rish, "An empirical study of the naive Bayes classifier," in *IJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence*, 2001, vol. 3, no. 22, pp. 41–46.
- [93] L. Jiang, S. Wang, C. Li, and L. Zhang, "Structure extended multinomial naive Bayes," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 329, pp. 346–356, 2016.
- [94] [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/دسته‌بندی_کننده_بیز_ساده.
- [95] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/naive-bayes-classifier/>.
- [96] [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/رگرسیون_لجستیک.
- [97] [Online]. Available: <https://behsanandish.com/learning/generalipmv/لر-رگرسیون-لجستیک/>.
- [98] C.-Y. J. Peng, K. L. Lee, and G. M. Ingersoll, "An introduction to logistic regression analysis and reporting," *J. Educ. Res.*, vol. 96, no. 1, pp. 3–14, 2002.
- [99] S. Menard, *Applied logistic regression analysis*, vol. 106. Sage, 2002.
- [100] [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/رگرسیون_خطی.
- [101] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/simple-linear-regression/>.
- [102] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to linear regression analysis*, vol. 821. John Wiley & Sons, 2012.
- [103] S. Weisberg, *Applied linear regression*, vol. 528. John Wiley & Sons, 2005.
- [104] G. A. F. Seber and A. J. Lee, *Linear regression analysis*, vol. 329. John Wiley & Sons, 2012.
- [105] H. Theil, "A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis," in *Henri Theil's*

- contributions to economics and econometrics*, Springer, 1992, pp. 345–381.
- [106] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/لرگرسیون-چند-جمله-ای/>.
- [107] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/multiple-linear-regression/>.
- [108] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/unsupervised-learning-with-python/>.
- [109] [Online]. Available: <https://bigdata-ir.com/یادگیری-ماشین-machine-learning-گام-به-گام-به-صورت-گام-به-گام-یادگیری-ماشین-لرنینگ-قسمت-اول/>.
- [110] [Online]. Available: <https://virgool.io/@alifallahi/auhv5fd6spp1>.
- [111] Z. Ghahramani, “Unsupervised learning,” in *Summer School on Machine Learning*, 2003, pp. 72–112.
- [112] D. H. Fisher, M. J. Pazzani, and P. Langley, *Concept formation: Knowledge and experience in unsupervised learning*. Morgan Kaufmann, 2014.
- [113] V. K. Ayyadevara, “Basics of machine learning,” in *Pro Machine Learning Algorithms*, Springer, 2018, pp. 1–15.
- [114] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, “Unsupervised learning,” in *The elements of statistical learning*, Springer, 2009, pp. 485–585.
- [115] [Online]. Available: <https://tik4.com/articles/machine-learning/data-mining/خوشه‌بندی-چیست.html>.
- [116] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/clustering-introduction/>.
- [117] [Online]. Available: <https://fa.wikipedia.org/wiki/خوشه‌بندی>.
- [118] J. Huang, Z. L. Yu, and Z. Gu, “A clustering method based on extreme learning machine,” *Neurocomputing*, vol. 277, pp. 108–119, 2018.
- [119] O. Nasraoui and C.-E. Ben N’Cir, *Clustering Methods for Big Data Analytics*. Springer, 2019.
- [120] [Online]. Available: <http://matlab24.ir/خوشه‌بندی-k-means>.
- [121] D. Arthur and S. Vassilvitskii, “k-means++: The advantages of careful seeding,” Stanford, 2006.
- [122] [Online]. Available: <https://medyarm.ir/lesson/k-means-algorithm>.
- [123] [Online]. Available: https://blog.faradars.org/k-means-clustering-algorithm/#مزاای_خوشه‌بندی_می-k-معایب_و_مزایای_خوشه‌بندی.
- [124] P. H. Ahmad and S. Dang, “Performance evaluation of clustering algorithm using different datasets,” *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Manag. Stud.*, vol. 3, pp. 167–173, 2015.
- [125] علی، زاده ده بالایی، علی باقری، حامد افشار “بررسی مشکلات الگوریتم خوشه بندی DBSCAN و مروری بر بهبودهای ارائه شده برای آن،” *مجله محاسبات نرم، دوره ۶، شماره ۱، صفحات ۲-۳۷، ۱۳۹۶*.
- [126] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_shift.
- [127] D. Comaniciu and P. Meer, “Mean shift: A robust approach toward feature space analysis,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 5, pp. 603–619, 2002.
- [128] K.-L. Wu and M.-S. Yang, “Mean shift-based clustering,” *Pattern Recognit.*, vol. 40, no. 11, pp. 3035–3052, 2007.
- [129] [Online]. Available: https://www.tutorialspoint.com/machine_learning_with_python/clustering_algorithms_mean_shift_algorithm.htm.
- [130] [Online]. Available: http://webpages.iust.ac.ir/yaghini/Courses/Data_Mining_882/DM_04_04_Hierachical-Methods.pdf.
- [131] [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/BIRCH>.
- [132] J. Han, J. Pei, and M. Kamber, *Data mining: concepts and techniques*. Elsevier, 2011.

- [133] T. Zhang, R. Ramakrishnan, and M. Livny, "BIRCH: an effective data clustering method for very large database [C]," in *The ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Montreal, Canada*, 1996.
- [134] T. Zhang, R. Ramakrishnan, and M. Livny, "BIRCH: A new data clustering algorithm and its applications," *Data Min. Knowl. Discov.*, vol. 1, no. 2, pp. 141–182, 1997.
- [135] [Online]. Available: <https://www.ques10.com/p/9298/explain-birch-algorithm-with-example/>.
- [136] [Online]. Available: <https://chistio.ir/با-بندی-خوشه-gaussian-mixture-model-الگوریتم-em/>.
- [137] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/gmm-and-clustering>.
- [138] C. Carson, S. Belongie, H. Greenspan, and J. Malik, "Blobworld: Image segmentation using expectation-maximization and its application to image querying," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 8, pp. 1026–1038, 2002.
- [139] M. Ouyang, W. J. Welsh, and P. Georgopoulos, "Gaussian mixture clustering and imputation of microarray data," *Bioinformatics*, vol. 20, no. 6, pp. 917–923, 2004.
- [140] [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/HouwLiong/chapter-11-cluster-advanced-han-kamber>.
- [141] C. Guestrin, "Unsupervised learning or Clustering—K-means Gaussian mixture models," *Apr*, vol. 4, p. 67, 2007.
- [142] M.-S. Yang, C.-Y. Lai, and C.-Y. Lin, "A robust EM clustering algorithm for Gaussian mixture models," *Pattern Recognit.*, vol. 45, no. 11, pp. 3950–3961, 2012.
- [143] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Association_rule_learning.
- [144] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/apriori-algorithm-tutorial/>.
- [145] R. Agarwal and R. Srikant, "Fast algorithms for mining association rules," in *Proc. of the 20th VLDB Conference*, 1994, pp. 487–499.
- [146] M. Al-Maolegi and B. Arkok, "An improved apriori algorithm for association rules," *arXiv Prepr. arXiv1403.3948*, 2014.
- [147] [Online]. Available: www.wiki.occc.ir/index.php?title=متمدها-وروش-های-داده-کاوی-برای-یافتن-مجموعه-اقلام-داده-تکرار-شونده-وبا-ارزش-در-پایگاه-داده-ها-بزرگ.
- [148] [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=imwcUX4YZN4>.
- [149] H. Li, Y. Wang, D. Zhang, M. Zhang, and E. Y. Chang, "Pfp: parallel fp-growth for query recommendation," in *Proceedings of the 2008 ACM conference on Recommender systems*, 2008, pp. 107–114.
- [150] C. Borgelt, "An Implementation of the FP-growth Algorithm," in *Proceedings of the 1st international workshop on open source data mining: frequent pattern mining implementations*, 2005, pp. 1–5.
- [151] K. Wang, L. Tang, J. Han, and J. Liu, "Top down fp-growth for association rule mining," in *Pacific-Asia conference on knowledge discovery and data mining*, 2002, pp. 334–340.
- [152] [Online]. Available: <http://www.lastnightstudy.com/Show?id=69/Fp-Growth-Algorithm>.
- [153] M. Kavitha and S. T. Selvi, "Comparative Study on Apriori Algorithm and Fp Growth Algorithm with Pros and Cons," *Int. J. Comput. Sci. Trends Technol. (I JCS T)–Volume*, vol. 4, 2016.
- [154] L. C. M. C. Annie and A. D. Kumar, "Market basket analysis for a supermarket based on frequent itemset mining," *Int. J. Comput. Sci. Issues*, vol. 9, no. 5, p. 257, 2012.
- [155] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/تجزیه-مقادیر-منفرد/>.

- [156] [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/microlife/4-pca-and-svr>.
- [157] [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/کاهش_ابعاد.
- [158] W. H. A. Schilders, H. A. Van der Vorst, and J. Rommes, *Model order reduction: theory, research aspects and applications*, vol. 13. Springer, 2008.
- [159] B. Sarwar, G. Karypis, J. Konstan, and J. Riedl, "Application of dimensionality reduction in recommender system-a case study," *Minnesota Univ Minneapolis Dept of Computer Science*, 2000.
- [160] B. Sarwar, G. Karypis, J. Konstan, and J. Riedl, "Incremental singular value decomposition algorithms for highly scalable recommender systems," in *Fifth international conference on computer and information science*, 2002, vol. 1, no. 012002, pp. 27–28.
- [161] G. W. Stewart, "On the early history of the singular value decomposition," *SIAM Rev.*, vol. 35, no. 4, pp. 551–566, 1993.
- [162] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/در-پایتون-pca-تحلیل-مولفه-اساسی/>.
- [163] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Principal_component_analysis.
- [164] S. Karamizadeh, S. M. Abdullah, A. A. Manaf, M. Zamani, and A. Hooman, "An overview of principal component analysis," *J. Signal Inf. Process.*, vol. 4, no. 3B, p. 173, 2013.
- [165] A. Ghodsi, "Dimensionality reduction a short tutorial," *Dep. Stat. Actuar. Sci. Univ. Waterloo, Ontario, Canada*, vol. 37, no. 38, p. 2006, 2006.
- [166] L. J. Cao, K. S. Chua, W. K. Chong, H. P. Lee, and Q. M. Gu, "A comparison of PCA, KPCA and ICA for dimensionality reduction in support vector machine," *Neurocomputing*, vol. 55, no. 1–2, pp. 321–336, 2003.
- [167] H. Abdi and L. J. Williams, "Principal component analysis," *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 2, no. 4, pp. 433–459, 2010.
- [168] [Online]. Available: <http://www.ronaldvanloon.com/machine-learning-explained-understanding-supervised-unsupervised-and-reinforcement-learning/>.
- [169] [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/یادگیری_تقویتی.
- [170] [Online]. Available: <http://iran-machinelearning.ir/چیسـت-reinforcement-learning-یادگیری-تقویتی/>.
- [171] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press, 2018.
- [172] Y. Li, "Deep reinforcement learning: An overview," *arXiv Prepr. arXiv1701.07274*, 2017.
- [173] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Introduction to reinforcement learning*, vol. 135. MIT press Cambridge, 1998.
- [174] ولی درهمی، فریناز اعلمیان هرنندی و محمدباقر دولت‌شاهی، *یادگیری تقویتی*. یزد: دانشگاه یزد، ۱۳۹۶.
- [175] [Online]. Available: <https://blog.faradars.org/an-introduction-to-reinforcement-learning/>.

بررسی کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه مطالعات سیستم‌های قدرت و استخراج موضوعات تحقیقاتی

فصل ۸- بررسی کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه مطالعات سیستم‌های قدرت و استخراج موضوعات تحقیقاتی

۱-۸- مقدمه

در این گزارش کاربرد فناورانه تکنیک‌های مختلف یادگیری ماشین در محورهای تخصصی گروه پژوهشی مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت بررسی خواهد شد. بدین منظور از دو تکنیک متن‌کاوی و تحلیل اثر روند، به کمک پایگاه علمی اسکوپوس و نمایه علم‌سنجی سایول، استفاده می‌شود. در این مطالعه، ابتدا کلیدواژه‌های مربوط به هر محور تخصصی تعیین شده و پس از یافتن مستندات علمی پیرامون آن به کمک اسکوپوس، با استفاده از سایول اطلاعات و روندهای مفید پیرامون این مجموعه مستندات ارائه می‌شوند.

- محورهای تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت از قرار زیر است:
- راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت
- برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت
- بازار برق در سیستم‌های قدرت
- پایایی سیستم‌های قدرت
- پایداری سیستم‌های قدرت
- حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق
- مطالعات ریزشبکه
- کیفیت توان سیستم‌های قدرت
- مدیریت پیک بار در سیستم‌های قدرت
- مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

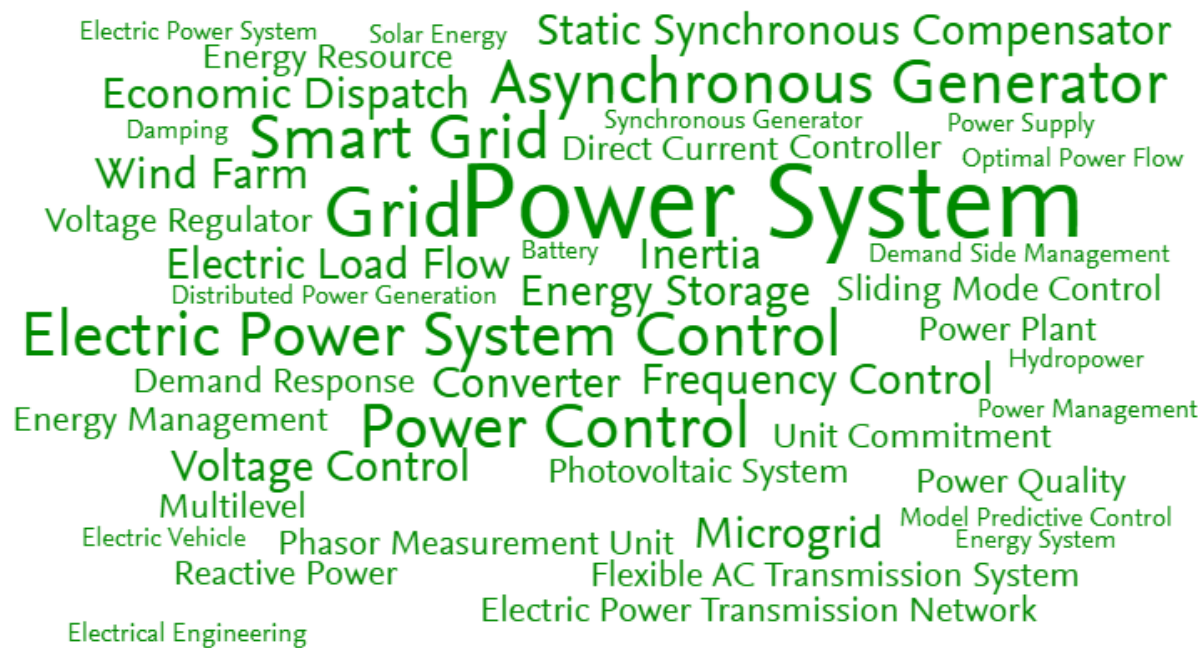
در ادامه، در ابتدا نتایج مطالعات مربوط به هر محور ارائه می‌شود. سپس کاربردهای یادگیری ماشین در محورهای تخصصی بیان شده و موضوعات تحقیقاتی نیز برای هر محور پیشنهاد خواهد شد.

۸-۲- متن‌کاوی در حوزه "راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت"

۸-۲-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت"

با توجه به ضرورت پایش، نظارت و کنترل شبکه‌های قدرت به منظور بهبود قابلیت اطمینان، بهره‌وری فنی و اقتصادی، امنیت و پایداری آنها، برخی از کاربردهای روش‌های مختلف یادگیری ماشین در مطالعات راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت معرفی می‌شوند. طبق گزارش پایگاه علمی Scopus، تعداد مستندات موجود در این زمینه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی در سه حوزه Energy, Engineering و Computer Science بیش از ۵۰۰۰۰ بوده است.

بر اساس جستجوی کلیدواژه محور (Power System Dispatching and Control) در پایگاه Scopus-SciVal، مهم‌ترین مفاهیم حوزه مطالعات راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت به صورت شکل ۸-۱ و جدول ۸-۱ به دست آمده است.



AA A relevance of keyphrase | declining AA A growing (2015-2019)

شکل ۸-۱: عبارات کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با محور راهبری و کنترل سیستم قدرت

جدول ۸-۱: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

موضوع	ردیف	موضوع	ردیف	موضوع	ردیف
Demand Response	۱۵	Static Synchronous Compensator	۸	Power System	۱
Energy Management System	۱۶	Electric Load Flow	۹	Smart Grid	۲
Power Quality	۱۷	Microgrid	۱۰	Asynchronous Generator	۳
Electric Load Dispatching	۱۸	Voltage Control	۱۱	Electric Power System Control	۴
Optimal Power Flow	۱۹	Unit Commitment	۱۲	Energy Storage	۵
Distributed Power Generation	۲۰	Phasor Measurement Unit	۱۳	Frequency Control	۶
Voltage Regulator	۲۱	Flexible AC Transmission System	۱۴	Economic Dispatch	۷

به عنوان مثال، ۱۰ مستند علمی برتر در زمینه راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول ۸-۲ نشان داده است.

جدول ۸-۲: پرارجاع‌ترین مراجع در زمینه راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems, 2020, Protection and Control of Modern Power Systems	۴۲
۲	Memory-Based Event-Triggering H ∞ Load Frequency Control for Power Systems under Deception Attacks, 2020, IEEE Transactions on Cybernetics	۱۸
۳	A comprehensive survey of the Grasshopper optimization algorithm: results, variants, and applications, 2020, Neural Computing and Applications	۱۳
۴	A Novel Multi-Agent DDQN-AD Method-Based Distributed Strategy for Automatic Generation Control of Integrated Energy Systems, 2020, IEEE Transactions on Sustainable Energy	۱۲
۵	False data injection attacks with complete stealthiness in cyber-physical systems: A self-generated approach, 2020, Automatica	۸
۶	A new optimized configuration for capacity and operation improvement of CCHP system based on developed owl search algorithm, 2020, Energy Reports	۸
۷	Short-term optimal scheduling of hydro-thermal power plants using artificial bee colony algorithm, 2020, Energy Reports	۸
۸	A Data-Driven Multi-Agent Autonomous Voltage Control Framework Using Deep Reinforcement Learning, 2020, IEEE Transactions on Power Systems	۷
۹	Secure and resilient demand side management engine using machine learning for IoT-enabled smart grid, 2020, Sustainable Cities and Society	۷

۷	A Real-Time Energy Management and Speed Controller for an Electric Vehicle Powered by a Hybrid Energy Storage System, 2020, IEEE Transactions on Industrial Informatics	۱۰

مطابق نتایج متن‌کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شده، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین مستندات دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

1. Frede Blaabjerg
2. Tomislav Dragičević
3. Bhim Singh
4. José R. Rodríguez
5. Jinyu Wen
6. Zhe Chen
7. Fusuo Liu
8. Peter Palensky
9. Di Shi
10. Bhim Singh

همچنین، مؤسسات زیر بیش‌ترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

1. State Grid Corporation of China
2. North China Electric Power University
3. Ministry of Education, China
4. Aalborg University
5. China Electric Power Research Institute
6. Tsinghua University
7. Southeast University, Nanjing
8. Technical University of Denmark
9. Huazhong University of Science and Technology
10. Zhejiang University

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

1. China
2. United States

3. India
4. Russian Federation
5. Denmark
6. Iran
7. United Kingdom
8. Germany
9. Italy
10. Canada

جهت متن‌کاوی متون علمی در پایگاه Scopus-SciVal، واژگان کلیدی مرتبط با حوزه راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت بر اساس مستندات علمی و زیرمجموعه‌های تخصصی مطالعات راهبری و کنترل شبکه‌های قدرت در پنج دسته به صورت زیر طبقه‌بندی شده‌اند:

❖ دسته اول

“Machine Learning” AND “Power System” AND (Dispatch OR Control)

❖ دسته دوم

“Machine Learning” AND “Power System” AND (Monitoring OR Observability OR (State Estimation) OR (Load Forecasting) OR (Load Estimation) OR (Demand Forecasting) OR (Power Flow) OR (Load Flow) OR (Advanced Metering Infrastructure) OR (Phasor Measurement Unit) OR (Remote Terminal Unit) OR (Smart Meter) OR (Geographical Information System))

❖ دسته سوم

“Machine Learning” AND “Power System” AND Cyber

❖ دسته چهارم

“Machine Learning” AND “Power System” AND ((Energy Management System) OR (Distribution Management System) OR (Outage Management) OR (Outage scheduling) OR (Switching Management) OR (Load Shedding) OR (Demand Response) OR (Demand-Side Management) OR (Congestion Management) OR Reconfiguration OR (Distribution Automation) OR (Power Loss Reduction) OR (Contingency Analysis))

❖ دسته پنجم

“Machine Learning” AND “Power System” AND ((Fault detection) OR (Fault location) OR (Fault Classification) OR (Fault Isolation) OR Protection OR Relay OR (Disturbance Analysis) OR (Short-

Circuit Analysis) OR (Remedial Action) OR (Special Protection Scheme) OR (Wide-Area Monitoring Control and Protection) OR WAMPAC OR (Event detection) OR Islanding OR Splitting OR Restoration)

در ادامه، نتایج علم‌سنجی تحت پایگاه Scopus و ابزار SciVal برای هر پنج دسته کلیدواژه‌های انتخابی محور ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که کلیه متن‌کاوی‌ها به سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و سه حوزه Energy, Engineering, Computer Science و محدود شده و جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه"های مستندات علمی موجود انجام شده است.

دسته اول کلیدواژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

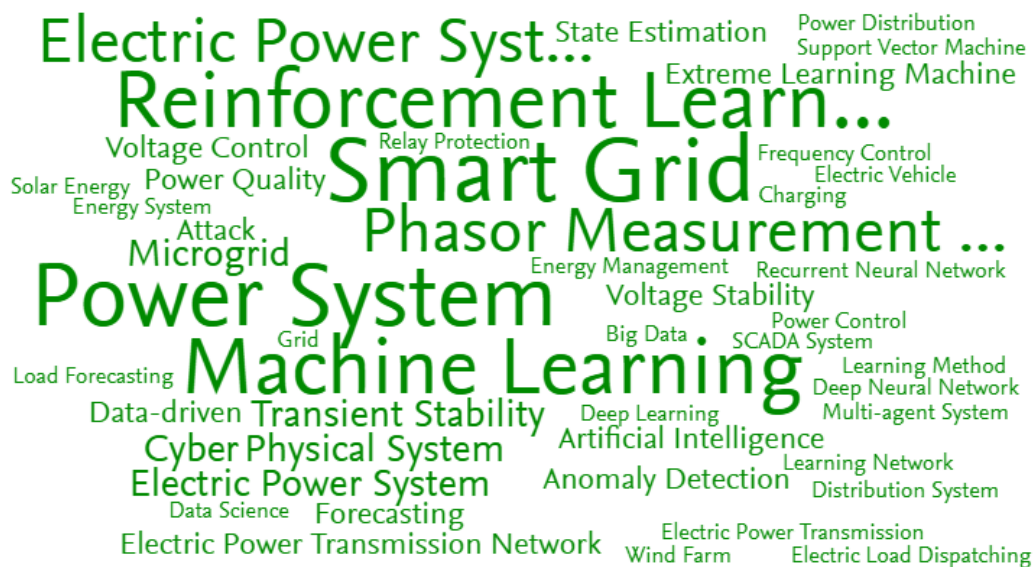
“Machine Learning” AND “Power System” AND (Dispatch OR Control)

با جستجوی کلیدواژگان دسته اول، تعداد ۳۹۰ مقاله (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. در جدول ۸-۳، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل ۲-۸ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول است. پراچ‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۴-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال برای دسته اول، در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.

جدول ۳-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	State Grid Corporation of China
۲	National Renewable Energy Laboratory
۳	South China University of Technology
۴	Huazhong University of Science and Technology
۵	RAS - Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch
۶	Zhejiang University
۷	China Electric Power Research Institute
۸	University of California at Berkeley
۹	Amrita Vishwa Vidyapeetham
۱۰	Nanyang Technological University
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Nikita V. Tomin, RAS - Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch

Linfei Yin, Guangxi University	۲
Tao T. Yu, South China University of Technology	۳
Victor G. Kurbatsky, RAS - Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch	۴
Yingchen Zhang, National Renewable Energy Laboratory	۵
Denis N. Sidorov, Irkutsk National Research Technical University	۶
Aleksei V. Zhukov, RAS - Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch	۷
Yan Xu, Nanyang Technological University	۸
Xiaoshun Zhang, Shantou University	۹
Lefeng Cheng, Guangzhou University	۱۰



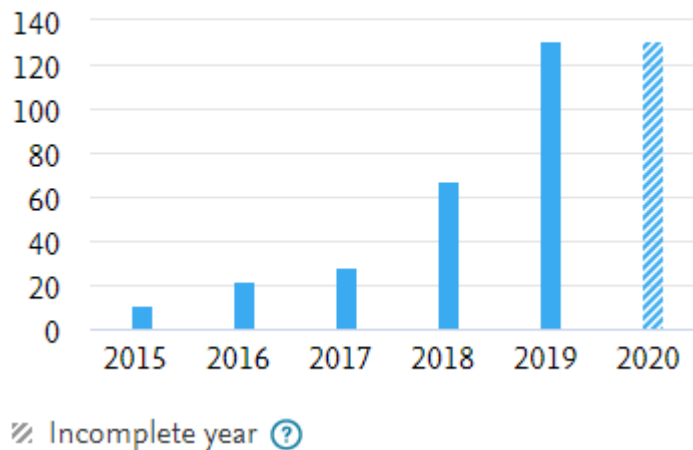
relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۲-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته اول در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

جدول ۴-۸: پراچ‌ترین مراجع در دسته اول واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Intelligent time-adaptive transient stability assessment system, 2018, IEEE Transactions on Power Systems	۹۲
۲	Short-term wind speed forecasting via stacked extreme learning machine with generalized correntropy, 2018, IEEE Transactions on Industrial Informatics	۸۵
۳	Two Machine Learning Approaches for Short-Term Wind Speed Time-Series Prediction, 2016, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems	۶۷
۴	Machine learning for solar irradiance forecasting of photovoltaic system, 2016, Renewable Energy	۴۹
۵	A smart home test bed for undergraduate education to bridge the curriculum gap from traditional power systems to modernized smart grids, 2015, IEEE Transactions on Education	۴۵
۶	Analysis and Prospect of Deep Learning Application in Smart Grid, 2019, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۴۳
۷	A prediction-based charging policy and interference mitigation approach in the wireless powered internet of things, 2019, IEEE Journal on Selected Areas in Communications	۳۷
۹۸	Time series wind power forecasting based on variant Gaussian Process and TLBO, 2016, Neurocomputing	۳۵
۹	Cyber-physical-social Systems Based Smart Energy Robotic Dispatcher and Its Knowledge Automation: Framework, Techniques and Challenges, 2018, Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering	۳۴
۱۰	A review and perspective on machine learning technologies applied to smart energy and electric power systems, 2019, International Journal of Energy Research	۳۲

Scholarly Output ①

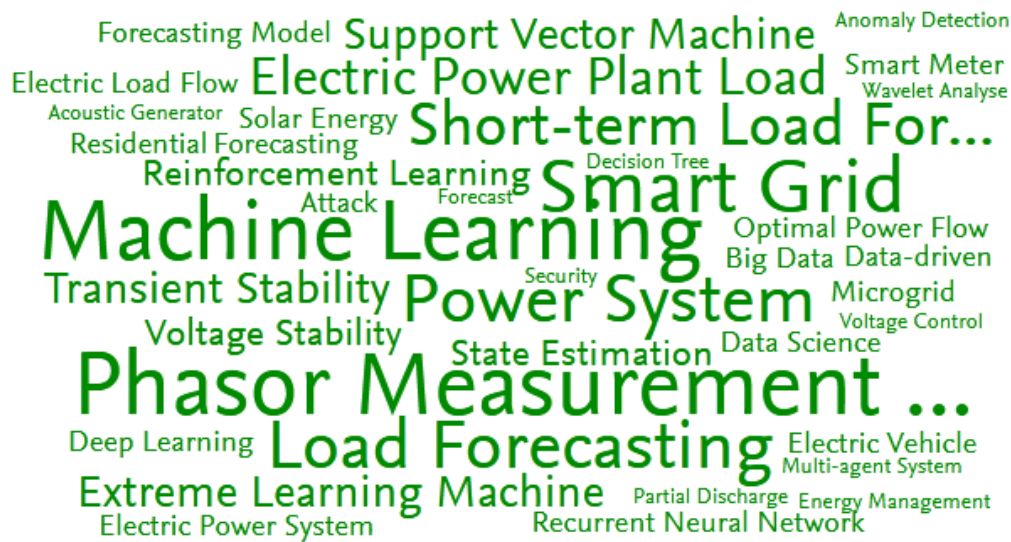


شکل ۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

❖ دسته دوم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

“Machine Learning” AND “Power System” AND (Monitoring OR Observability OR (State Estimation) OR (Load Forecasting) OR (Load Estimation) OR (Demand Forecasting) OR (Power Flow) OR (Load Flow) OR (Advanced Metering Infrastructure) OR (Phasor Measurement Unit) OR (Remote Terminal Unit) OR (Smart Meter) OR (Geographical Information System))

در مجموع ۴۶۶ مستند برای دسته دوم یافت شد. پنجاه کلیدواژه اصلی، تعداد مقالات به تفکیک سال و پراچ‌ترین مراجع در دسته دوم به صورت شکل ۴-۸ و شکل ۵-۸ و جدول ۵-۸ به دست آمده است.



A A A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

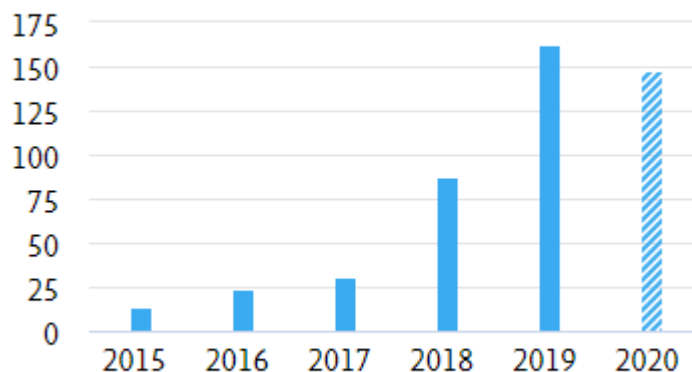
شکل ۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته دوم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

جدول ۵-۸: پراچ‌ترین مراجع در دسته دوم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A Novel RBF Training Algorithm for Short-Term Electric Load Forecasting and Comparative Studies, 2015, IEEE Transactions on Industrial Electronics	۱۲۴
۲	Detecting stealthy false data injection using machine learning in smart grid, 2017, IEEE Systems Journal	۱۱۹
۳	Wide and Deep Convolutional Neural Networks for Electricity-Theft Detection to Secure Smart Grids, 2018, IEEE Transactions on Industrial Informatics	۹۶
۴	Intelligent time-adaptive transient stability assessment system, 2018, IEEE Transactions on Power Systems	۹۲
۵	A switching delayed PSO optimized extreme learning machine for short-term load forecasting, 2017, Neurocomputing	۹۱
۶	A seasonal GM(1,1) model for forecasting the electricity consumption of the primary economic sectors, 2018, Energy	۷۴

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۷	Power system short-term load forecasting based on improved random forest with grey relation projection, 2015, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۷۰
۸	A deep learning model for short-term power load and probability density forecasting, 2018, Energy	۶۱
۹	A review of deep learning methods applied on load forecasting, 2017, Proceedings - 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2017	۵۶
۱۰	Application of Big Data and Machine Learning in Smart Grid, and Associated Security Concerns: A Review, 2019, IEEE Access	۵۱

Scholarly Output ①



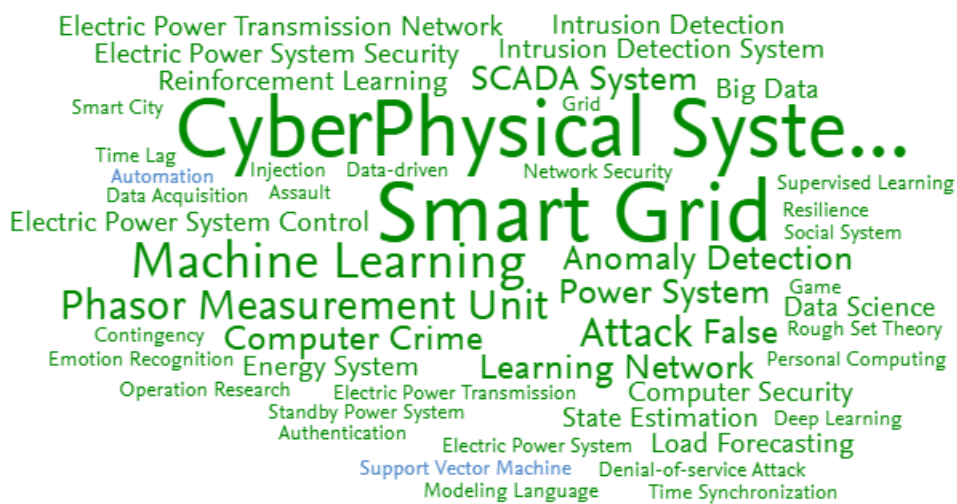
▨ Incomplete year ②

شکل ۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

❖ دسته سوم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

“Machine Learning” AND “Power System” AND Cyber

بر اساس جستجوی کلیدواژگان دسته سوم در پایگاه استنادی Scopus-SciVal، ۹۵ مقاله در سه حوزه Computer، Engineering و Science Energy بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ منتشر شده است. پنجاه کلیدواژه اصلی، تعداد مستندات منتشر شده در هر سال و پرارجاع‌ترین مراجع مرتبط با عبارات جستجو شده دسته سوم به ترتیب در شکل ۶-۸، شکل ۷-۸ و جدول ۶-۸ ارائه شده است.



AA A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

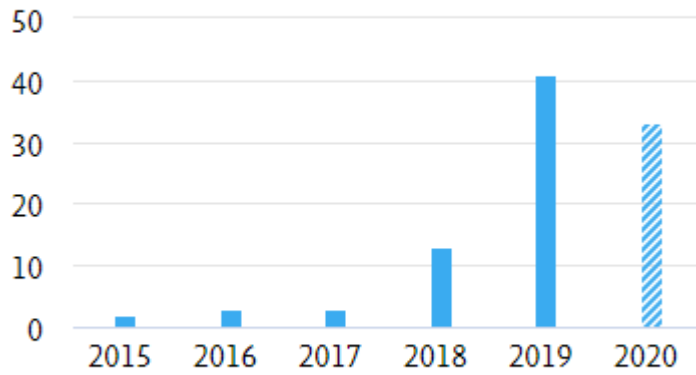
شکل ۶-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته سوم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

جدول ۶-۸: پراچ‌ترین مراجع در دسته سوم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Detecting stealthy false data injection using machine learning in smart grid, 2017, IEEE Systems Journal	۱۱۹
۲	Detection of false data injection attacks in smart grid communication systems, 2015, IEEE Signal Processing Letters	۸۲
۳	Application of Big Data and Machine Learning in Smart Grid, and Associated Security Concerns: A Review, 2019, IEEE Access	۵۱
۴	Analysis and Prospect of Deep Learning Application in Smart Grid, 2019, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۴۳
۵	Cyber-physical-social Systems Based Smart Energy Robotic Dispatcher and Its Knowledge Automation: Framework, Techniques	۳۴

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
	and Challenges, 2018, Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering	
۶	Novel Approach for Detecting Network Anomalies for Substation Automation based on IEC 61850, 2015, Multimedia Tools and Applications	۲۸
۷	Unsupervised Machine Learning-Based Detection of Covert Data Integrity Assault in Smart Grid Networks Utilizing Isolation Forest, 2019, IEEE Transactions on Information Forensics and Security	۲۳
۸	Feature Selection-Based Detection of Covert Cyber Deception Assaults in Smart Grid Communications Networks Using Machine Learning, 2018, IEEE Access	۲۰
۹	Applying non-nested generalized exemplars classification for cyber-power event and intrusion detection, 2018, IEEE Transactions on Smart Grid	۱۹
۱۰	Detection of false data injection attacks in smart grids using Recurrent Neural Networks, 2018, 2018 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2018	۱۹

Scholarly Output ⓘ

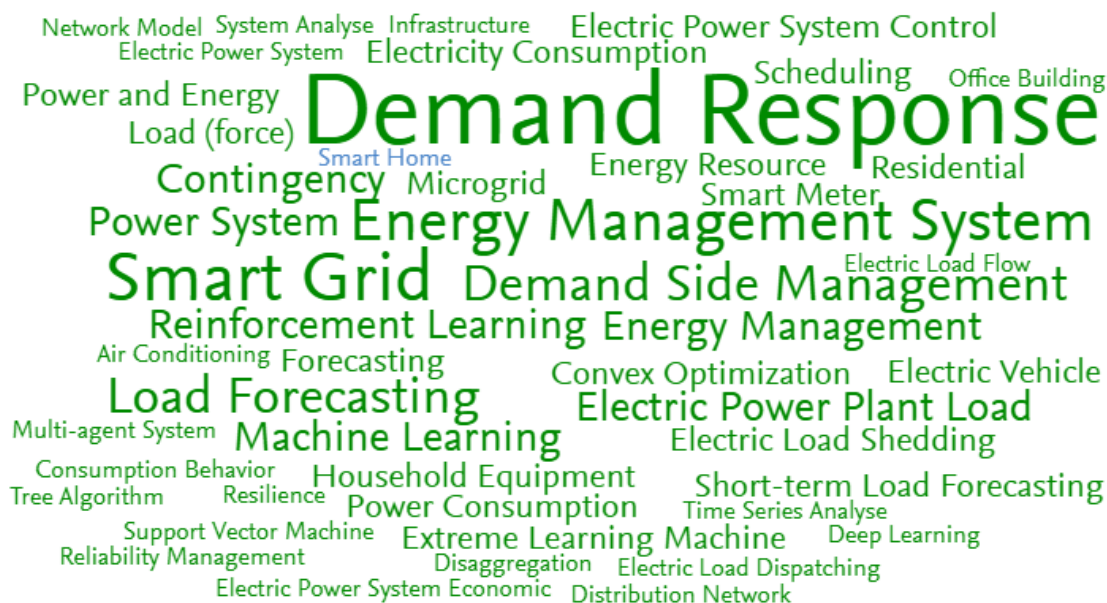


▨ Incomplete year ⓘ

شکل ۷-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته سوم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

“Machine Learning” AND “Power System” AND ((Energy Management System) OR (Distribution Management System) OR (Outage Management) OR (Outage scheduling) OR (Switching Management) OR (Load Shedding) OR (Demand Response) OR (Demand-Side Management) OR (Congestion Management) OR Reconfiguration OR (Distribution Automation) OR (Power Loss Reduction) OR (Contingency Analysis))

مستندات منتشر شده در هر سال به ترتیب در شکل ۸-۸، **source not found** و **Error! Reference** گزارش شده است.



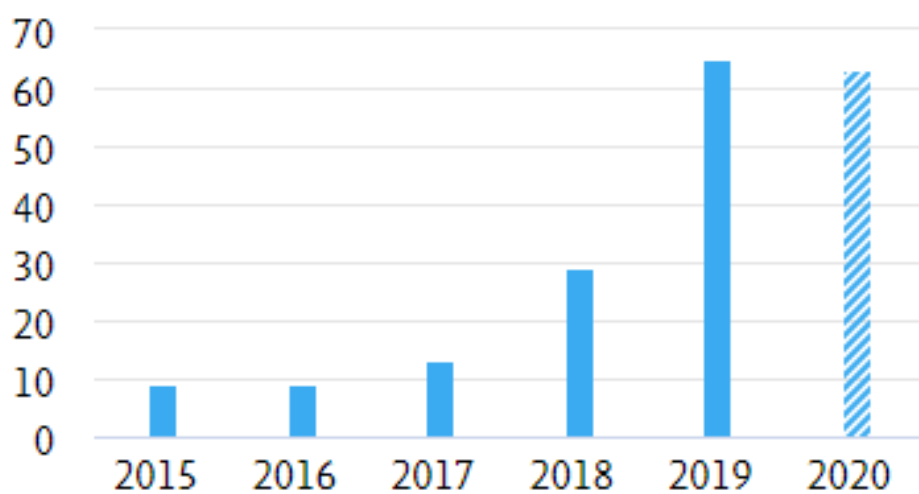
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۸-۸: پنجاه کلیدواژه مرتبط با دسته چهارم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

جدول ۷-۸: پراچای‌ترین مراجع در دسته چهارم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A review of deep learning for renewable energy forecasting, 2019, Energy Conversion and Management	۱۰۵
۲	Time-series prediction of wind speed using machine learning algorithms: A case study Osorio wind farm, Brazil, 2018, Applied Energy	۶۸
۳	Clustering based day-ahead and hour-ahead bus load forecasting models, 2016, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۴۸
۴	A smart home test bed for undergraduate education to bridge the curriculum gap from traditional power systems to modernized smart grids, 2015, IEEE Transactions on Education	۴۵
۵	Robust ensemble learning framework for day-ahead forecasting of household based energy consumption, 2018, Applied Energy	۴۴
۶	A novel hybrid system based on multi-objective optimization for wind speed forecasting, 2020, Renewable Energy	۳۵
۷	Demand Response for Home Energy Management Using Reinforcement Learning and Artificial Neural Network, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۳۵
۸	A Two-Layer Nonlinear Combination Method for Short-Term Wind Speed Prediction Based on ELM, ENN, and LSTM, 2019, IEEE Internet of Things Journal	۳۲
۹	A new generation of AI: A review and perspective on machine learning technologies applied to smart energy and electric power systems, 2019, International Journal of Energy Research	۳۲
۱۰	A reinforcement learning framework for optimal operation and maintenance of power grids, 2019, Applied Energy	۳۱

Scholarly Output ⓘ



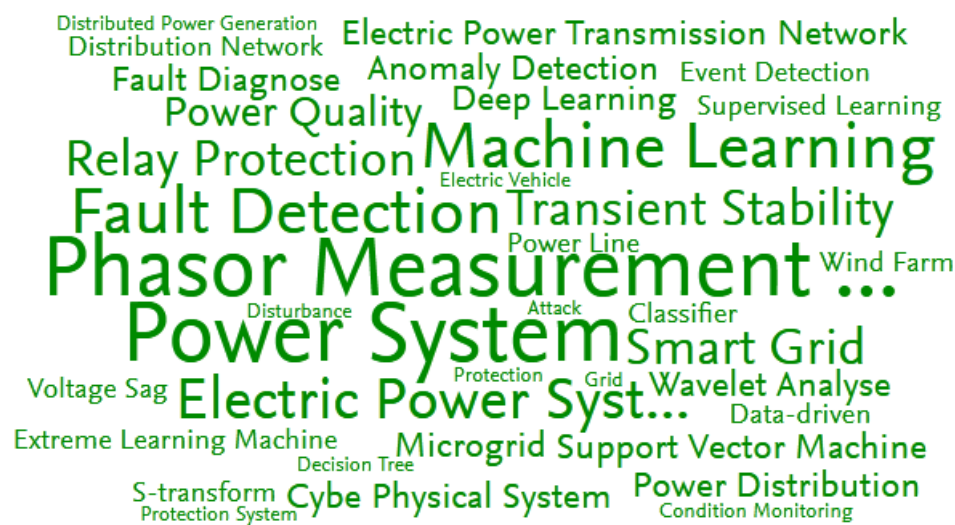
▨ Incomplete year ⓘ

شکل ۹-۸: تعداد مقالات به تفکیک سال در دسته چهارم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

❖ دسته پنجم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

“Machine Learning” AND “Power System” AND ((Fault detection) OR (Fault location) OR (Fault Classification) OR (Fault Isolation) OR Protection OR Relay OR (Disturbance Analysis) OR (Short-Circuit Analysis) OR (Remedial Action) OR (Special Protection Scheme) OR (Wide-Area Monitoring Control and Protection) OR WAMPAC OR (Event detection) OR Islanding OR Splitting OR Restoration)

برای دسته پنجم واژگان انتخابی، ۲۶۵ مرجع در پایگاه Scopus-SciVal در بازه زمانی ذکر شده و در سه حوزه انرژی، مهندسی، و علوم کامپیوتر یافت شد. مهم‌ترین کلیدواژه‌های مقالات یافت شده، تعداد و پرارجاع‌ترین آنها به ترتیب در شکل ۸-۱۰ و شکل ۸-۱۱ و جدول ۸-۸ نشان داده شده است.



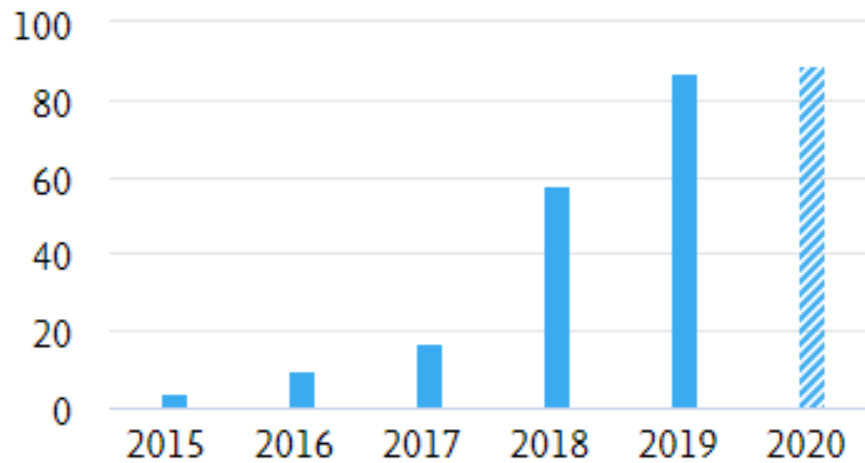
AA A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۸-۱۰: پنجاه کلیدواژه مرتبط با دسته پنجم در محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

جدول ۸-۸: پراچ‌ترین مراجع در دسته پنجم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Intelligent time-adaptive transient stability assessment system, 2018, IEEE Transactions on Power Systems	۹۲
۲	Application of Energy-Based Power System Features for Dynamic Security Assessment, 2015, IEEE Transactions on Power Systems	۶۹
۳	Deep-Learning-Based Earth Fault Detection Using Continuous Wavelet Transform and Convolutional Neural Network in Resonant Grounding Distribution Systems, 2018, IEEE Sensors Journal	۶۵
۴	Detection and classification of micro-grid faults based on HHT and machine learning techniques, 2018, IET Generation, Transmission and Distribution	۶۲
۵	Combined Fault Location and Classification for Power Transmission Lines Fault Diagnosis With Integrated Feature Extraction, 2018, IEEE Transactions on Industrial Electronics	۶۰
۶	Random forest based intelligent fault diagnosis for PV arrays using array voltage and string currents, 2018, Energy Conversion and Management	۴۷
۷	Diagnosis of series DC Arc faults - A machine learning approach, 2017, IEEE Transactions on Industrial Informatics	۴۳
۸	Analysis and Prospect of Deep Learning Application in Smart Grid, 2019, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۴۳
۹	Kriging Empirical Mode Decomposition via support vector machine learning technique for autonomous operation diagnosing of CHP in microgrid, 2018, Applied Thermal Engineering	۳۵
۱۰	Partial Knowledge Data-Driven Event Detection for Power Distribution Networks, 2018, IEEE Transactions on Smart Grid	۳۰

Scholarly Output ⓘ



▨ Incomplete year ⓘ

شکل ۱۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم واژگان محور راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

۸-۲-۲- معرفی موضوعات پژوهشی محور پژوهشی "راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت"

با توجه به مستندات به دست آمده در مرحله متن‌کاوی و همچنین بر اساس جستجوی کلیدواژه‌های مطرح شده در پایگاه استنادی Google Scholar، می‌توان برخی کاربردها و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با یادگیری ماشین در محور مطالعات راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت را به صورت جدول ۹-۸ خلاصه نمود.

جدول ۹-۸: کاربردها و موضوعات تحقیقاتی پیشنهادی در محور مطالعات راهبری و کنترل سیستم‌های قدرت

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
پیش‌بینی و تخمین	✓ پیش‌بینی و تفکیک^۱ بار ✓ پیش‌بینی قیمت برق ✓ پیش‌بینی تولید منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر باد و خورشید ✓ پیش‌بینی فرکانس سیستم قدرت در صورت بروز اختلال ✓ پیش‌بینی خروج‌ها^۲ ✓ پیش‌بینی ولتاژ شبکه‌های فشار ضعیف دارای توصیف‌کننده‌ها^۳ ✓ پیش‌بینی ظرفیت رزرو جهت کنترل فرکانس شبکه ✓ پیش‌بینی پایداری سیستم در صورت بازیابی یا وصل مجدد^۴ آن ✓ پیش‌بینی پایداری ولتاژ شبکه ✓ پیش‌بینی پایداری زاویه رتور ✓ تخمین بهینه پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت ✓ تعیین میزان مصرف برق لوازم خانگی^۵ به منظور زمان‌بندی استفاده از آنها جهت مشارکت در برنامه‌های مدیریت مصرف ✓ تعیین میزان تشویقی تخصیصی به مشارکت‌کنندگان در برنامه‌های مدیریت مصرف
تشخیص یا شناسایی	• تشخیص حملات سایبری در شبکه‌های هوشمند • تعیین مکان، نوع و دامنه حمله سایبری و هرگونه دستکاری و غیرعادی بودن داده‌های شبکه • پیش‌بینی تأثیر حمله بر سیستم‌های سایبر-فیزیکال^۶ (مدلسازی بازی بین مدافع و مهاجم جهت تاب‌آور نمودن سیستم در برابر حمله) • تشخیص گرفتگی^۷ در شبکه‌های توزیع • تشخیص و دسته‌بندی رخدادها و کیفیت توان (پایش هارمونیک شبکه) • تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا^۸ • تشخیص برق‌دزدی^۹ • تشخیص جزیره‌سازی

¹ Disaggregation² Power outage prediction³ Prosumers⁴ Restoration or reconnection⁵ Nonintrusive Devices Load Monitoring (NIDLM)⁶ Cyber-physical systems⁷ Congestion⁸ Fault detection, classification and location⁹ Electricity theft

• تشخیص خطای عملکرد ^۱ تجهیزات سیستم	
• تشخیص و مکان‌یابی تخلیه جزئی در تجهیزات شبکه	
• تشخیص منبع ناپایداری سیستم	

۸-۳- متن‌کاوی در حوزه "برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت"

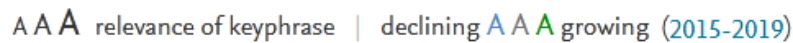
۸-۳-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت"

با توجه به آن‌که برنامه‌ریزی توسعه یکی از اصلی‌ترین و اساسی‌ترین چالش‌های پیش‌روی تصمیم‌گیرندگان سیستم قدرت است، مطالعات زیادی در حوزه سیستم‌های قدرت بر روی این موضوع متمرکز شده‌اند. با جستجو در نمایه استنادی Scopus می‌توان مشاهده نمود که بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی حدود ۱۴۰۰ مستند علمی (با محدود نمودن نتایج جستجوها در حوزه‌های Computer Engineering و Energy, Science) پیرامون موضوع برنامه‌ریزی توسعه در سیستم‌های قدرت انجام شده است. به‌منظور ایجاد دیدگاه اولیه نسبت به موضوعات مطالعاتی در زمینه محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت، عبارات کلیدی مربوط به تعدادی از مطالعات انجام‌شده در شکل ۸-۱۲ نمایش داده شده است. در جدول ۸-۱۰، تعدادی از عبارات پرکاربرد نشان داده‌شده در شکل ۸-۱۲ ارائه شده است. نتایج قابل مشاهده در شکل ۸-۱۲ و جدول ۸-۱۰ در نمایه استنادی Scopus با منطق جستجوی زیر به‌دست آمده است:

("Power system" AND (sizing OR siting OR expansion AND planning))

نکته قابل توجه آن‌که نتایج برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و در حوزه‌های Engineering و Energy, Computer Science محدود شده است. به‌عنوان نمونه، ۱۵ مستند علمی برتر از نظر تعداد استناد در زمینه برنامه‌ریزی توسعه که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول ۸-۱۱ ارائه شده است.

^۱ Failure



جدول ۱۰-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

جدول ۱۱-۸: پیراجاع‌ترین مراجع در حوزه برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

۲۲۴

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۳	Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control – A review	۱۸۴
۴	Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review	۱۸۰
۵	Near-Optimal Method for Siting and Sizing of Distributed Storage in a Transmission Network	۱۵۳
۶	The value of energy storage in decarbonizing the electricity sector	۱۴۳
۷	Robust transmission expansion planning	۱۲۲
۸	A multi-period, multi-regional generation expansion planning model incorporating unit commitment constraints	۱۱۸
۹	Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience	۱۱۷
۱۰	The new challenges to transmission expansion planning. Survey of recent practice and literature review	۱۱۰
۱۱	Multi-Stage Flexible Expansion Co-Planning Under Uncertainties in a Combined Electricity and Gas Market	۱۰۸
۱۲	A review of optimum DG placement based on minimization of power losses and voltage stability enhancement of distribution system	۱۰۴
۱۳	Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems	۱۰۴
۱۴	A simultaneous approach for optimal allocation of renewable energy sources and electric vehicle charging stations in smart grids based on improved GA-PSO algorithm	۹۷
۱۵	Optimal sizing of a wind/solar/battery hybrid grid-connected microgrid system	۹۶

مطابق نتایج متن کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شد، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین مستندات دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

- ❖ Dong, Zhao Yang.
- ❖ Conejo, Antonio J.
- ❖ Huang, Gordon.
- ❖ Kannan, Subramanian M.
- ❖ Qiu, Jing.
- ❖ Thangaraj, C.
- ❖ Valinejad, Jaber.
- ❖ Bent, Russel W.
- ❖ Catalao, Joao P. S.
- ❖ Cebulla, Felix.

همچنین، مؤسسات زیر بیشترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

- Islamic Azad University
- North China Electric Power University
- State Grid Corporation of China
- Tsinghua University
- University of Sydney
- Carnegie Mellon University
- Comillas Pontifical University
- Imperial College London
- Ministry of Education, China
- Xi'an Jiaotong University

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

- آمریکا
- چین
- ایران
- انگلستان
- اسپانیا
- استرالیا
- کانادا
- هند
- آلمان
- پرتغال

به‌منظور بررسی متون علمی و استخراج روند مطالعات انجام شده پیرامون محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت، در ادامه واژه‌های کلیدی انتخاب می‌شود. واضح است که نتایج بررسی‌ها با تغییر واژه‌های کلیدی به نتایج مختلفی منجر خواهد شد. به همین دلیل سعی شده که واژه‌های کلیدی انتخابی علاوه بر شناخته‌شده‌بودن در مستندات علمی، تا حد امکان، زیرمجموعه‌های تخصصی محور مورد نظر را پوشش دهند. واژه‌های کلیدی انتخابی برای محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت در شش دسته به صورت زیر تقسیم‌بندی شده است.

- ✓ "Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Generation.
- ✓ "Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Transmission.

- ✓ "Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Distribution.
- ✓ "Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Storage.
- ✓ "Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Forecasting.
- ✓ "Power system" AND "Machine learning" AND Regional expansion planning.

در ادامه به ارائه نتایج به‌دست آمده با استفاده از ابزار علم‌سنجی SciVal و به کمک متن‌کاوی انجام شده به‌وسیله نمایه استنادی Scopus برای واژه‌های کلیدی فوق پرداخته می‌شود. نکته قابل توجه آن که بازه زمانی مطالعات بین ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی انتخاب شده است. شایان ذکر است که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه" های مستندات علمی موجود انجام شده است. در ادامه نتایج حاصل از متن‌کاوی در حوزه محور پژوهشی مطالعات برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی به تفکیک کلیدواژه‌های انتخابی ارائه می‌شود.

❖ دسته اول:

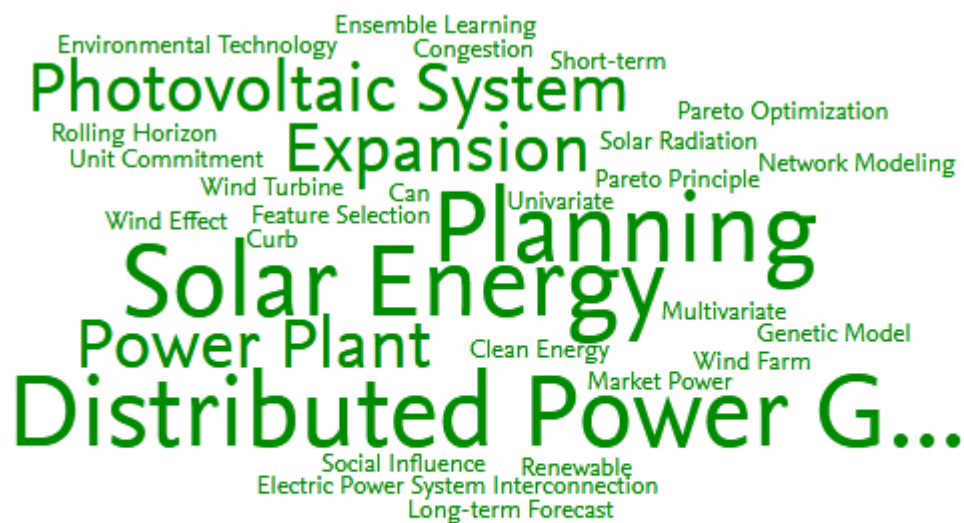
"Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Generation.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۸ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۸-۱۲، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده است. همچنین، شکل ۸-۱۳ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۸-۱۳ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در شکل ۸-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۸-۱۲: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته اول در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	RWTH Aachen University
۲	Birjand University of Technology
۳	Duy Tan University
۴	János Selye University
۵	Korea University
۶	London South Bank University
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Luck, Lara
۲	Moser, Albert

Ademola Idowu, Atinuke	۳
Agarwal, Varun	۴
Almaimouni, Abeer	۵
Bhakar, Rohit	۶
Choi, Sungyan	۷
Chou, Chiencheng	۸
Chung, Xianghong	۹
Eom, Haneul	۱۰



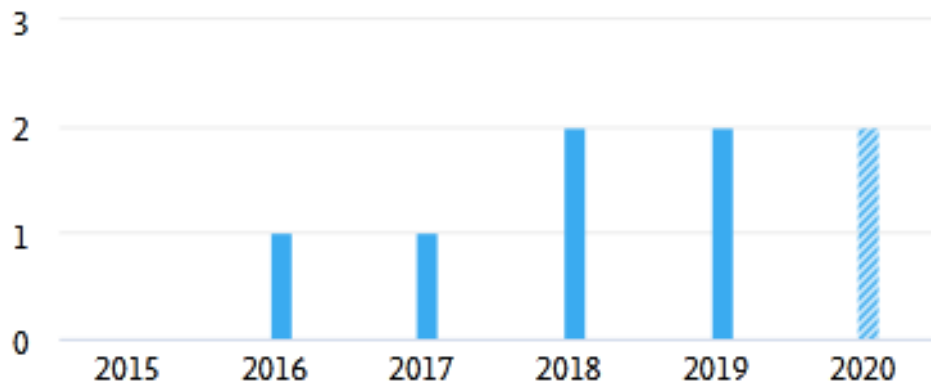
relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۱۳-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته اول در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

جدول ۱۳-۸: پراچ‌ترین مراجع دسته اول در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Selecting and evaluating representative days for generation expansion planning	۴
۲	Matrix based univariate and multivariate linear similar day approach towards short term solar radiation forecasting	۴
۳	Feature-selective ensemble learning-based long-term regional PV generation forecasting	۳

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۴	Generation expansion planning in the presence of wind power plants using a genetic algorithm model	۱
۵	Combining machine learning and multi criteria decision analysis modeling regulatory, economic and social influences on wind turbine allocation	۱
۶	Wind Turbine Integration - Can Current Allocation Policies Curb Transmission Grid Congestions Caused by Renewables Feed-In?	۰
۷	Artificial neural networks modeling photovoltaic power system allocation-Can artificial intelligence beat a fundamental approach?	۰
۸	Applying Climate Big-Data to Analysis of the Correlation between Regional Wind Speed and Wind Energy Generation	۰



شکل ۱۴-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته اول در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

❖ دسته دوم:

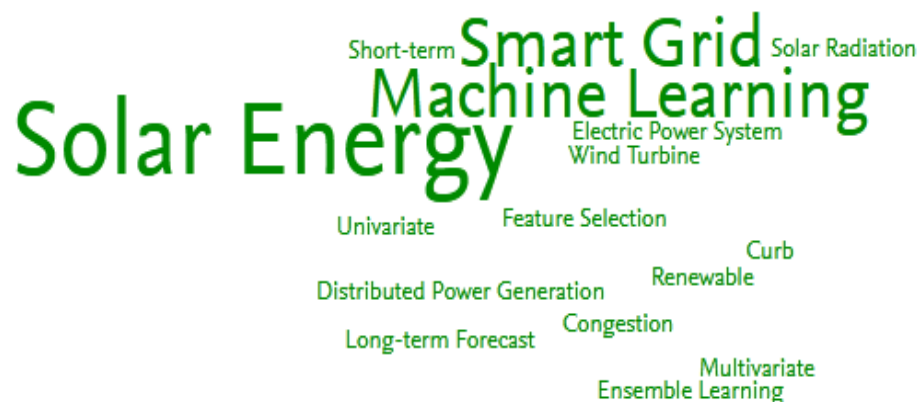
"Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Transmission.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۴ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۱۴-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص مربوط به این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۱۵-۸ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی در دسته دوم است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۱۵-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال برای دسته دوم در شکل ۱۶-۸ نشان داده شده است.

جدول ۱۴-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته دوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Korea University

Malaviya National Institute of Technology	۲
RWTH Aachen University	۳
Zhejiang University	۴
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Agrawal, Varun
۲	Bhakar, Rohit
۳	Choi, Sungyun
۴	Dong, Wei
۵	Eom, Haneul
۶	Gupta, Ayushi
۷	Ibrahim, Muhammad Sohail
۸	Luck, Lara
۹	Moser, Albert
۱۰	Son, Yongiu

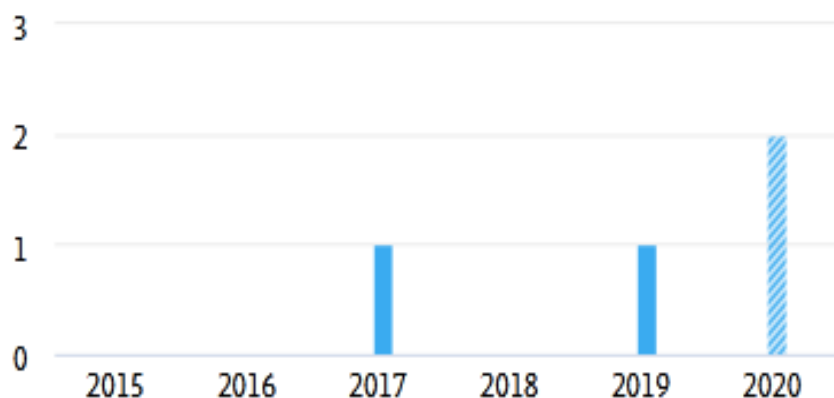


relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۱۵-۸: کلیدواژه‌های اصلی دسته دوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

جدول ۱۵-۸: پرارجاع‌ترین مراجع دسته دوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Machine learning driven smart electric power systems: Current trends and new perspectives	۷
۲	Matrix based univariate and multivariate linear similar day approach towards short term solar radiation forecasting	۴
۳	Feature-selective ensemble learning-based long-term regional PV generation forecasting	۳
۴	Wind Turbine Integration - Can Current Allocation Policies Curb Transmission Grid Congestions Caused by Renewables Feed-In?	۰



شکل ۱۶-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته دوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

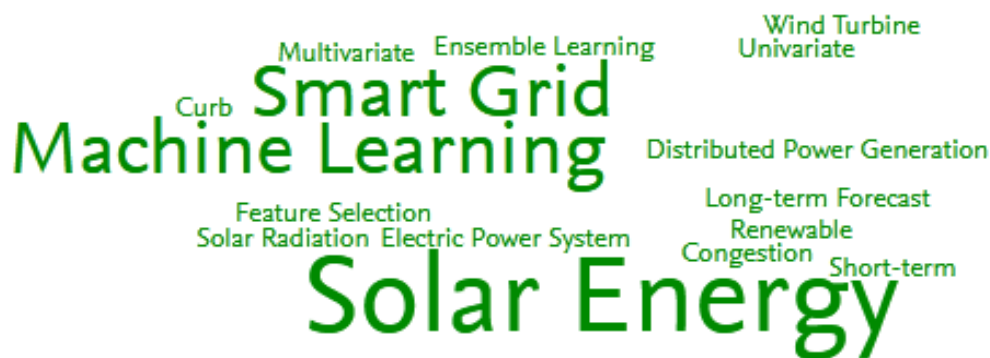
❖ دسته سوم

"Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Distribution.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۴ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۱۶-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۱۷-۸ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۱۷-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال مربوط به این دسته در شکل ۱۸-۸ نشان داده شده است.

جدول ۱۶-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته سوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر	
نام مؤسسه	ردیف
RWTH Aachen University	۱
Korea University	۲
National Kaohsiung University of Science and Technology	۳
مؤلفان برتر	
مؤلف	ردیف
Luck, Lara	۱
Moser, Albert	۲
Choi, Sungyun	۳
Chou, Chiencheng	۴
Chung, Xianghong	۵
Eom, Haneul	۶
Lee, Chunghong	۷
Son, Yongiu	۸
Zeng, Peiwen	۹

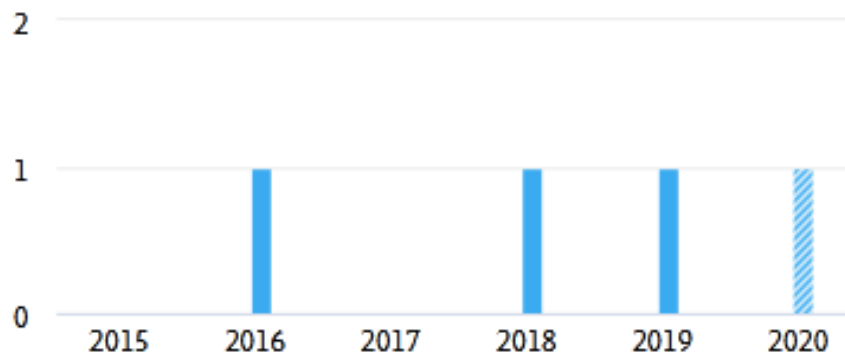


relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۱۷-۸: کلیدواژه‌های اصلی دسته سوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

جدول ۱۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع دسته سوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Feature-selective ensemble learning-based long-term regional PV generation forecasting	۳
۲	Combining machine learning and multi criteria decision analysis modeling regulatory, economic and social influences on wind turbine allocation	۱
۳	Artificial neural networks modeling photovoltaic power system allocation-Can artificial intelligence beat a fundamental approach?	۰
۴	Applying Climate Big-Data to Analysis of the Correlation between Regional Wind Speed and Wind Energy Generation	۰



شکل ۱۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته سوم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

❖ دسته چهارم

"Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Storage.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۱ مستند با عنوان زیر شناسایی می‌شود.

A knowledge discovery in databases approach for industrial microgrid planning

این مقاله در سال ۲۰۱۶ منتشر شده و ۱۸ بار ارجاع داده شده است.

❖ دسته پنجم

"Power system" AND "Machine learning" AND (Sizing OR Siting OR Expansion planning) AND Forecasting.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۳ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۱۸-۸، مؤسسات

برتر و مؤلفان شاخص در این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۱۹-۸ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی در

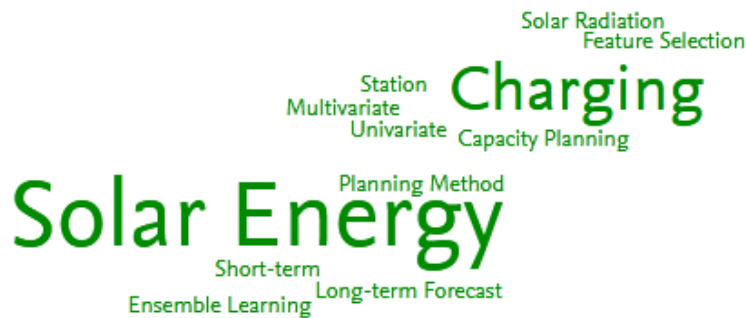
دسته پنجم است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۱۹-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد

مستندات به تفکیک سال مربوط به این دسته در شکل ۲۰-۸ نشان داده شده است.

جدول ۱۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته پنجم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Korea University
۲	Malaviya National Institute of Technology
۳	State Grid Corporation of China
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف

Agarwal, Varun	۱
Bhakar, Rohit	۲
Choi, Sungyan	۳
Eom, Haneul	۴
Gupta, Ayushi	۵
Hou, Xingzhe	۶
Li, Zhu	۷
Liu, Yongxiang	۸
Long, Yi	۹
Son, Yongju	۱۰

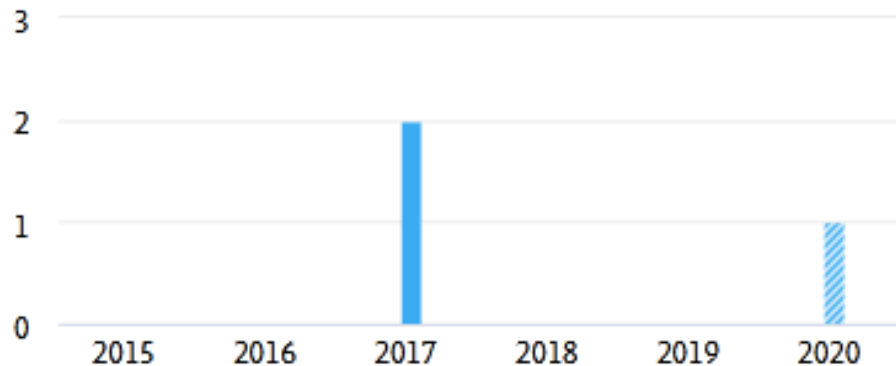


relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۱۹-۸: کلیدواژه‌های اصلی دسته پنجم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

جدول ۱۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع دسته پنجم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A capacity planning method of charging station based on depth learning	۷
۲	Matrix based univariate and multivariate linear similar day approach towards short term solar radiation forecasting	۴
۳	Feature-selective ensemble learning-based long-term regional PV generation forecasting	۳



شکل ۲۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته پنجم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

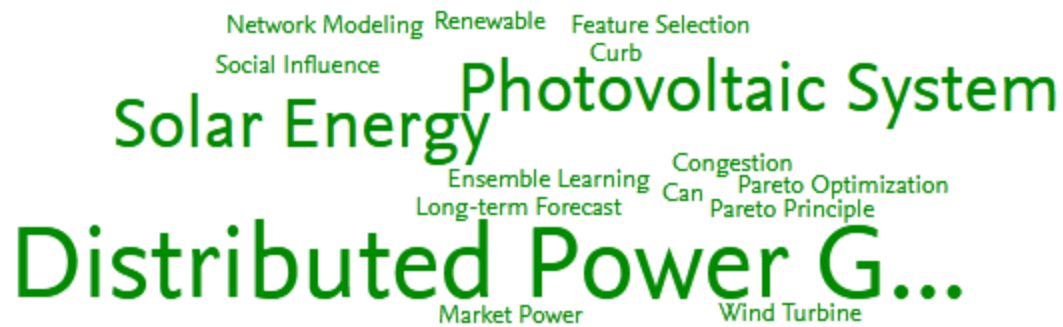
❖ دسته ششم

"Power system" AND "Machine learning" AND Regional expansion planning.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۴ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۲۰-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۲۰-۸ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی در دسته ششم است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۲۱-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال مربوط به این دسته در شکل ۲۲-۸ نشان داده شده است.

جدول ۲۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص دسته ششم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	RWTH Aachen University
۲	Korea University
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Luck, Lara
۲	Moser, Albert
۳	Choi, Sungyan
۴	Eom, Haneul
۵	Son, Yongju

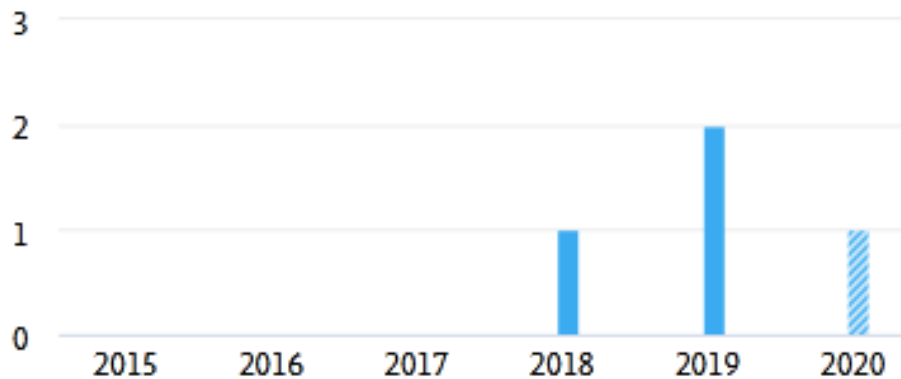


relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۲۱-۸: کلیدواژه‌های اصلی دسته ششم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

جدول ۲۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع دسته ششم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Feature-selective ensemble learning-based long-term regional PV generation forecasting	۳
۲	Combining machine learning and multi criteria decision analysis modeling regulatory, economic and social influences on wind turbine allocation	۱
۳	Wind Turbine Integration - Can Current Allocation Policies Curb Transmission Grid Congestions Caused by Renewables Feed-In?	.
۴	Artificial neural networks modeling photovoltaic power system allocation-Can artificial intelligence beat a fundamental approach?	.



شکل ۲۲-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال دسته ششم در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت

❖ دسته هفتم: واژه‌های کلیدی کار نشده با ابزار یادگیری ماشین

با جستجوهای انجام شده برای تعدادی از واژه‌های کلیدی مربوط به محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت، این نتیجه حاصل می‌شود که با ابزار یادگیری ماشین مطالعه‌ای در زمینه کلمات ذکر شده انجام نشده است. تعدادی از این واژه‌های کلیدی عبارتست از:

- ✓ Master plan
- ✓ Structural change
- ✓ architectural plan

۲-۳-۸- معرفی موضوعات پژوهشی محور پژوهشی "برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی سیستم‌های قدرت"

به منظور جمع‌بندی مطالعات انجام شده در این فصل، در جدول ۲۲-۸ کاربردها و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با حوزه برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت بر مبنای یادگیری ماشین ارائه شده است. قابل ذکر است که موارد ارائه شده در این جدول، از مراجع بررسی شده در این فصل استخراج شده است.

جدول ۲۲-۸: کاربردها و موضوعات تحقیقاتی در محور برنامه‌ریزی توسعه و مدرن‌سازی معماری سیستم‌های قدرت بر اساس یادگیری ماشین

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
پیش‌بینی	• پیش‌بینی تولید واحدهای خورشیدی (کوتاه‌مدت و بلندمدت) • پیش‌بینی بار (کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت) • پیش‌بینی قیمت برق • پیش‌بینی شدت تابش خورشید

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
	- پیش‌بینی شدت وزش باد - پیش‌بینی حالت‌های جزیره‌ای شبکه
مدل‌سازی	مدل‌سازی بار
آنالیز اطلاعات	- آنالیز حجم زیاد اطلاعات^۱ مربوط به شرایط آب و هوایی - تعیین همبستگی^۲ بین شرایط آب و هوایی و تولید نیروگاه بادی
برنامه‌ریزی توسعه	- جایابی منابع تولید پراکنده - سنجش مناسب‌بودن مکان برای تعبیه توربین‌های بادی - سنجش مناسب‌بودن مکان برای تعبیه نیروگاه‌های خورشیدی
برنامه‌ریزی بهره‌برداری	- توزیع اقتصادی بار^۳ - برنامه‌ریزی مشارکت واحدها^۴ - پخش توان بهینه^۵

۸-۴- متن کاوی در حوزه "بازار برق"

۸-۴-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "بازار برق"

گسترش و فراوانی مستندات علمی پیرامون بازار برق در سیستم‌های قدرت، شاهی بر اهمیت مطالعات این محور است. در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بیش از ۲۰۰۰۰ مستندات علمی (با محدود نمودن نتایج جستجوها در حوزه‌های Engineering, Energy و Computer Science) پیرامون بازار برق انتشار یافته است که بیان‌گر توجه بالای پژوهشگران به این حوزه است. حوزه‌ها و موضوعات متنوعی در ارتباط با بازار برق وجود دارد؛ بنابراین، زمانی که پیرامون بازار برق صحبت می‌شود، ممکن است هر یک از این حوزه‌ها و موضوعات مورد نظر باشد. جهت بسترسازی برای پرداختن به بررسی کاربردهای فناورانه یادگیری ماشین در مطالعات بازار برق، مهم‌ترین مفاهیم مرتبط به بازار برق در شکل ۸-۲۳ و جدول ۸-۲۳ آمده است:

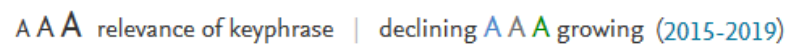
¹ Big Data

² Correlation

³ Economic Dispatch

⁴ Unit Commitment

⁵ Optimal Power Flow



جدول ۲۳-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با محور بازار برق در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت

موضوع	ردیف	موضوع	ردیف	موضوع	ردیف
Micro Grid	۱۳	Spot Market	۷	Demand Response	۱
Market Design	۱۴	Energy Trading	۸	Electricity Price	۲
Congestion Management	۱۵	Renewable Energy	۹	Market Power	۳
Demand side Management	۱۶	Smart Grid	۱۰	Energy Market	۴
Retail Marketing	۱۷	Price Forecasting	۱۱	Ancillary Service	۵
Distributed Power Generation	۱۸	Market Clearing	۱۲	Bidding Strategy	۶

نتایج بالا حاصل جستجوی محور موردنظر در Scopus-SciVal بوده که نحوه جستجوی منطقی مورد استفاده به صورت زیر است:

"market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)

دقت شود، نتایج برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و در حوزه Energy, Engineering و Computer Science محدود شده است. با توجه به محدودیت‌های SciVal، نتایج جستجو برای ۲۰۰۰ مستند اخیر تحلیل و حاصل شده است.

برای نمونه، ۱۰ مستند علمی برتر در زمینه بازار برق (در سال ۲۰۲۰) که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول ۲۴-۸ نشان داده است.

جدول ۲۴-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Forecast the Electricity Price of U.S. using a Wavelet Transform-based Hybrid Model, Energy 2020	۵۵
۲	Optimal Integration of Renewable Energy Sources, Diesel Generators, and Demand Response Program from Pollution, Financial, and Reliability Viewpoints: A Multi-objective Approach, Journal of Cleaner Production 2020	۳۹
۳	Risk-Constrained Stochastic Optimization of a Concentrating Solar Power Plant , IEEE Transaction on Sustainable Energy	۳۶
۴	An IGDT-based Risk-involved Optimal Bidding Strategy for Hydrogen Storage-based Intelligent Parking Lot of Electric Vehicles, Journal of Energy Storage 2020	۳۶
۵	Co-optimized Bidding Strategy of an Integrated Wind-thermal-photovoltaic System in Deregulated electricity market under Uncertainties, Journal of Cleaner Production 2020	۳۵
۶	A Novel Hybrid System based on Multi-objective Optimization for Wind Speed Forecasting, Renewable Energy	۳۳
۷	Coordinated Wind-thermal-energy Storage Offering Strategy in Energy and Spinning Reserve Markets using a multi-stage Model, Applied Energy 2020	۲۹
۸	Risk-constrained Optimal Operation of Fuel cell/ photovoltaic / battery /grid Hybrid Energy System using Downside Risk Constraints Method, International Journal of Hydrogen Energy 2020	۲۷
۹	Risk and Profit-based Bidding and Offering Strategies for Pumped Hydro Storage in the Energy Market, Journal of Cleaner Production 2020	۲۵
۱۰	Optimal Sizing and Power Schedule in PV Household-Prosumers for Improving PV Self-Consumption and Providing Frequency Containment Reserve, Energy 2020	۲۰

مطابق نتایج متن‌کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شده، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین مستندات دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

- ❖ J. P. Catalão;
- ❖ M. Shafie-khah;
- ❖ S Nojavan;
- ❖ Q. Chen;
- ❖ K. Zare;
- ❖ X. Xia;
- ❖ K. Jermisittiparsert;
- ❖ B. Mohammadi-Ivatloo;
- ❖ P. Siano;
- ❖ Z. Vale.

همچنین، مؤسسات زیر بیش‌ترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

- ❖ North China Electric Power University;
- ❖ State Grid Corporation of China;
- ❖ Tsinghua University;
- ❖ China Electric Power Research Institute;
- ❖ Guangdong Power Grid Corporation;
- ❖ Ministry of Education, China;
- ❖ University of Porto;
- ❖ Aalborg University;
- ❖ Southeast University, Nanjing;
- ❖ University of Tabriz;

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

- چین
- آمریکا
- آلمان
- ایران
- بریتانیا
- هند
- ایتالیا
- استرالیا
- اسپانیا

- دانمارک

طبق رویه انتخاب شده جهت متن کاوی متون علمی و استخراج روند مطالعات انجام شده پیرامون مطالعات بازار برق در ابتدا بایستی واژگان کلیدی مورد نظر جهت انجام متن کاوی انتخاب و معرفی شود. طبیعی است با تغییر واژگان کلیدی نتایج ارائه شده نیز متفاوت خواهد بود، اما سعی شده که واژگان کلیدی انتخابی علاوه بر اینکه در مستندات علمی شناخته شده باشند، تا حد امکان با زیرمجموعه‌های محور تخصصی بازار برق نیز متناظر و مرتبط بوده باشند. واژگان کلیدی انتخابی برای محور بازار برق در نه دسته به صورت زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market))
- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("electricity price" OR "price forecasting")
- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("smart grid" OR "micro grid")
- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("demand response" OR "demand side management" OR "energy management")
- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND "bidding strategy"
- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("Double Auction" OR "Energy Trading")
- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("distributed generation" OR "distributed power generation")
- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("market power" OR "negotiation Strategy")
- ✓ (Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND "ancillary services"

در ادامه به ارائه نتایج به‌دست آمده با استفاده از ابزار علم‌سنجی SciVal می‌پردازیم؛ که در آن متن کاوی در نمایه استنادی Scopus، برای واژگان و عبارات کلیدی انتخابی، انجام شده است. مقیاس زمانی مورد مطالعه در این تحقیق بازه زمانی ۲۰۱۵ تا

۲۰۲۰ میلادی بوده است. همچنین جهت استخراج تحقیقات علمی پیرامون کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در حوزه محور تخصصی بازار برق، واژه "یادگیری ماشین" به صورت منطقی با واژه کلیدی مد نظر AND شده است. یادآور می‌شود که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه"های مستندات علمی موجود انجام شده است.

۸-۴-۲- نتایج حاصل از متن کاوی در حوزه محور پژوهشی بازار برق

در این قسمت نتایج حاصل از متن کاوری در حوزه محور پژوهشی بازار برق به تفکیک کلیدواژه‌های انتخابی ارائه می‌شوند.

❖ دسته اول: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

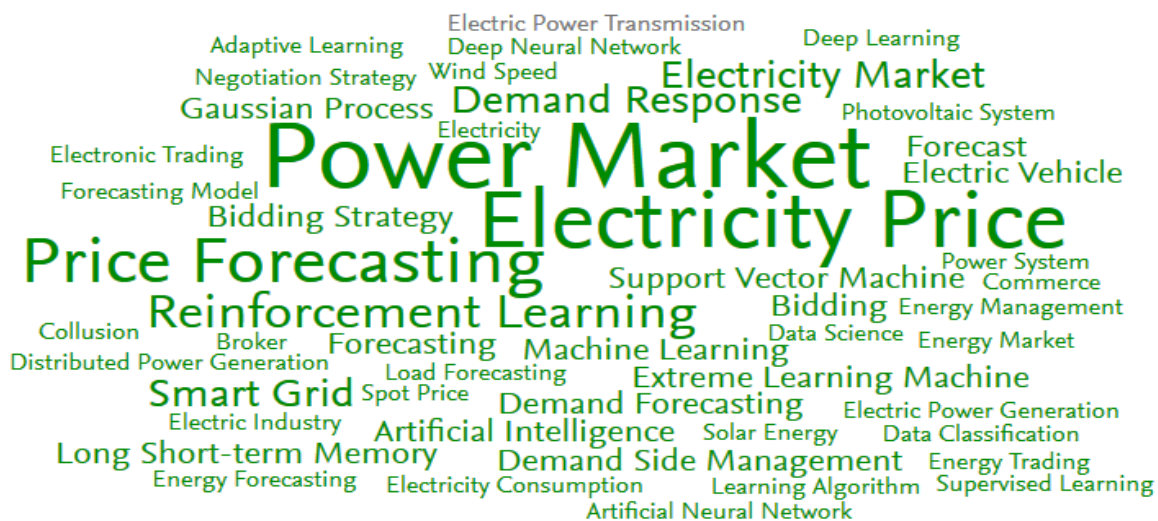
(Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market))

با محدود نمودن مطالعات حوزه بازار برق در زمینه یادگیری ماشین، تعداد ۲۱۹ مستند (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. در جدول ۸-۲۵، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل ۸-۲۴ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۲۶ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در شکل ۸-۲۵ نشان داده شده است.

جدول ۸-۲۵: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور بازار برق

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Institute of Engineering of Porto
۲	Polytechnic Institute of Porto
۳	RWTH Aachen University
۴	COMSATS University Islamabad
۵	North China Electric Power University
۶	Polytechnic University of Turin
۷	University of Porto
۸	Anna University
۹	Arizona State University
۱۰	CSIRO
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	T. Pinto, Institute of Engineering of Porto
۲	Z. Vale, Institute of Engineering of Porto
۳	I. Parca, Institute of Engineering of Porto

T. Huang, Polytechnic University of Turin	۴
L. Luck, RWTH Aachen University	۵
A. Moser, RWTH Aachen University	۶
F. Silva, Institute of Engineering of Porto	۷
M. S. Al-Musaylh, Southern Technical University, Iraq	۸
M. Alamaniotis, Purdue University	۹
S. Baltaoglu, Cornell University	۱۰



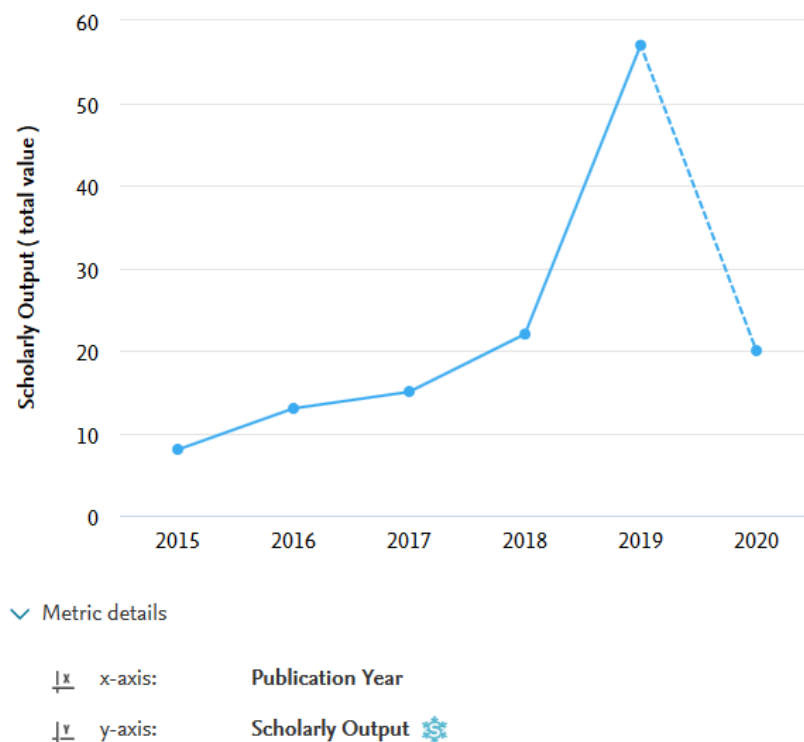
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۲۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول محور بازار برق

جدول ۲۶-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول محور بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Short-term electricity demand forecasting with MARS, SVR and ARIMA models using aggregated demand data in Queensland, Australia, 2018 Advanced Engineering Informatics	۷۳
۲	A seasonal GM(1,1) model for forecasting the electricity consumption of the primary economic sectors, 2018, Energy	۷۰
۳	Two Machine Learning Approaches for Short-Term Wind Speed Time-Series Prediction, 2016, IEEE Transaction on Neural Network and Learning System	۶۶

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۴	An electricity price forecasting model by hybrid structured deep neural networks, 2018 ,Sustainability (Switzerland)	۵۶
۵	Machine learning for solar irradiance forecasting of photovoltaic system, 2016, Renewable Energy	۴۹
۶	Electricity price forecasting using recurrent neural networks, 2018, Energies	۴۷
۷	Experience curve development and cost reduction disaggregation for fuel cell markets in Japan and the US, 2017, Applied Energy	۳۶
۸	A novel hybrid system based on multi-objective optimization for wind speed forecasting, 2020, Renewable Energy	۳۳
۹	Demand Response for Home Energy Management Using Reinforcement Learning and Artificial Neural Network, 2019, IEEE Transaction on Smart Grid	۳۲
۱۰	Multi-step short-term power consumption forecasting with a hybrid deep learning strategy, 2018, Energies	۳۲

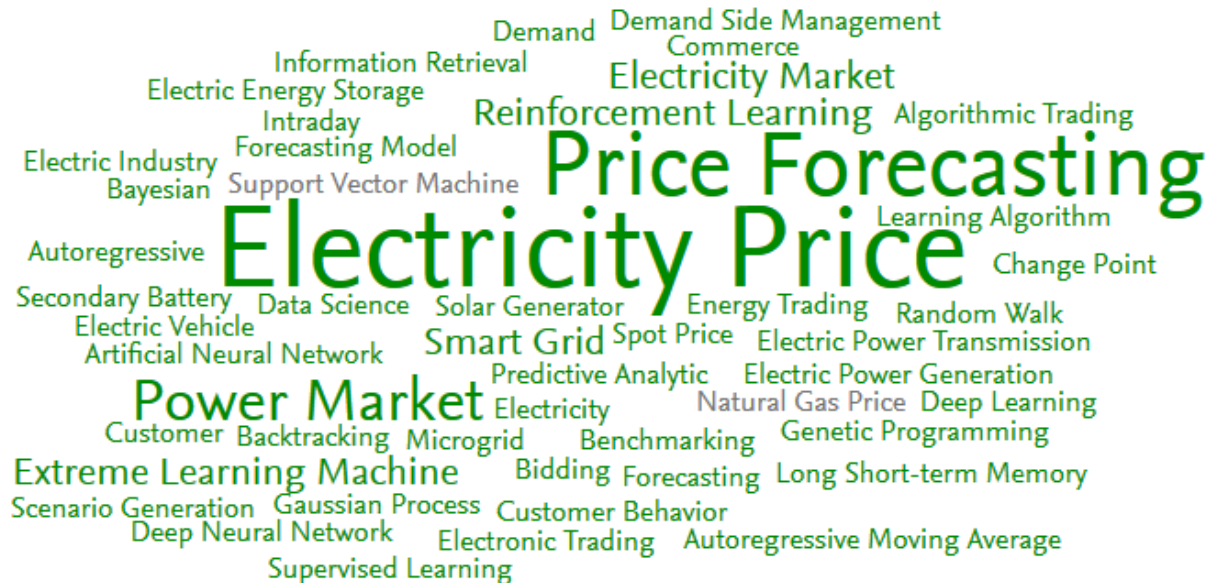


شکل ۲۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول محور بازار برق

❖ دسته دوم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND "electricity price"

در شکل ۸-۲۶ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم نشان داده شده است. پراچ‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۲۷ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۲۷ نشان داده شده است.



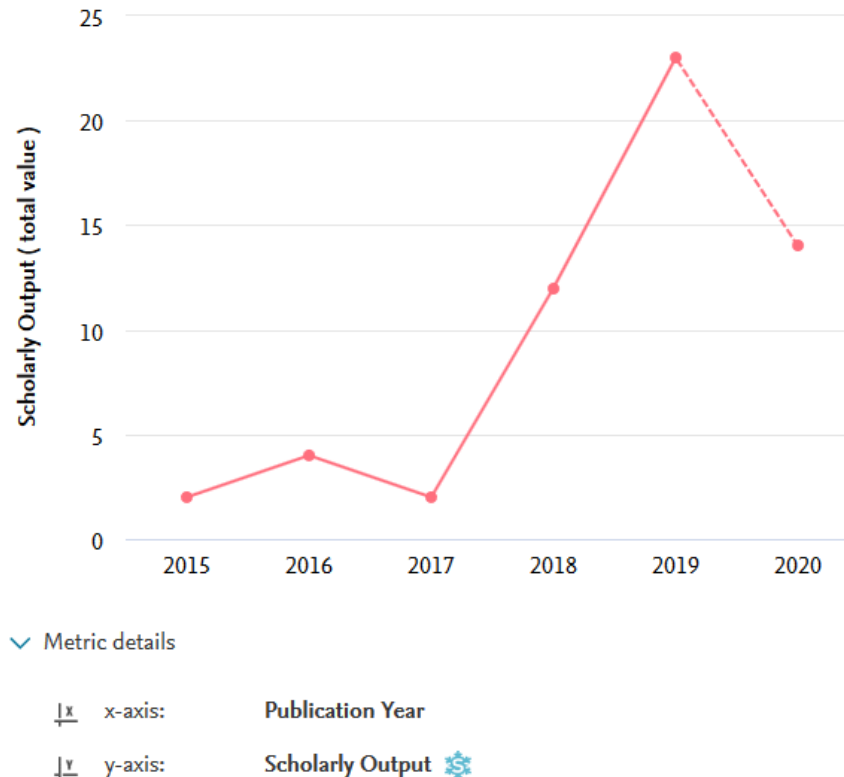
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015–2019)

شکل ۸-۲۶: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم محور بازار برق

جدول ۸-۲۷: پراچ‌ترین مراجع در دسته دوم محور بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Forecasting spot electricity prices: Deep learning approaches and empirical comparison of traditional algorithms, 2018, Applied Energy	۱۵۳
۲	Electricity price forecasting by a hybrid model, combining wavelet transform, ARMA and kernel-based extreme learning machine methods, 2017, Applied Energy	۱۴۴
۳	An electricity price forecasting model by hybrid structured deep neural networks, 2018, Sustainability (Switzerland)	۵۶
۴	Electricity price forecasting using recurrent neural networks, 2018, Energies	۴۷
۵	Electricity price forecasting using Support Vector Machines by considering oil and natural gas price impacts, 2015, International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2015	۱۶
۶	ESAENARX and DE-RELM: Novel schemes for big data predictive analytics of electricity load and price, 2019, Sustainable Cities and Society	۱۵
۷	A two-stage supervised learning approach for electricity price forecasting by leveraging different data sources, 2019, Applied Energy	۱۳

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۸	Short-Term Electricity Price Forecasting via Hybrid Backtracking Search Algorithm and ANFIS Approach, 2019, IEEE Access	۱۲
۹	A comparative study of different machine learning methods for electricity prices forecasting of an electricity market, 2015 North American Power Symposium, NAPS 2015	۱۱
۱۰	The evolution model of electricity market on the stable development in China and its dynamic analysis, 2016, Energy	۱۰

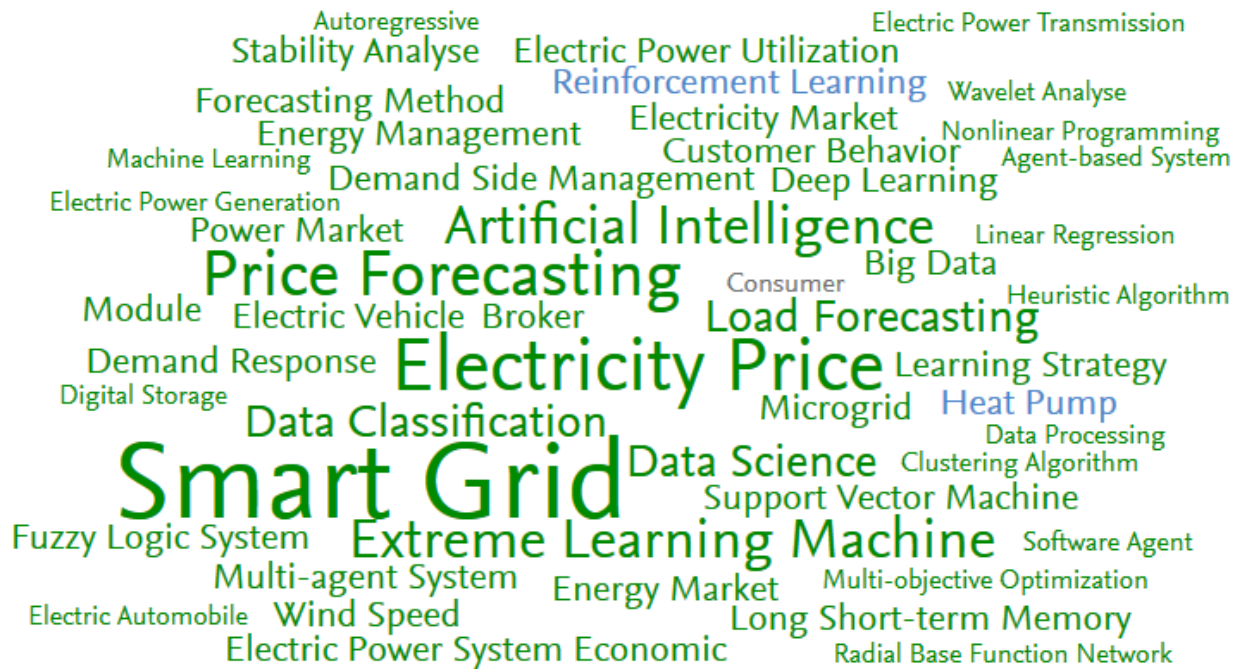


شکل ۲۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم محور بازار برق

❖ دسته سوم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND "market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("smart grid" OR "micro grid")

در این دسته ۴۵ عدد مقاله پیدا شد. در شکل ۲۸-۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۲۸-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۲۹-۸ نشان داده شده است.



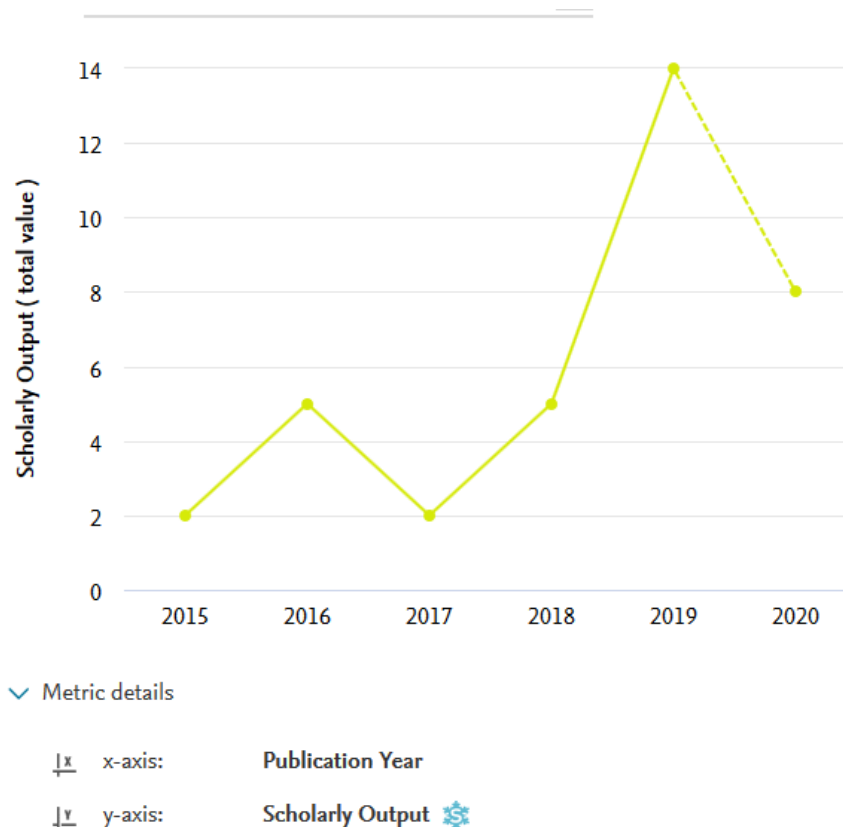
AAA relevance of keyphrase | declining AA A growing (2015-2019)

شکل ۲۸-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته سوم محور بازار برق

جدول ۲۸-۸: پراچ‌ت‌ترین مراجع در دسته سوم محور بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A novel hybrid algorithm for electricity price and load forecasting in smart grids with demand-side management, 2016, Applied Energy	۱۰۱
۲	A systematic design of interval type-2 fuzzy logic system using extreme learning machine for electricity load demand forecasting, 2016, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۳۹
۳	A novel hybrid system based on multi-objective optimization for wind speed forecasting, 2020, Renewable Energy	۳۳
۴	Multi-step short-term power consumption forecasting with a hybrid deep learning strategy, 2018, Energies	۳۲
۵	A Two-Layer Nonlinear Combination Method for Short-Term Wind Speed Prediction Based on ELM, ENN, and LSTM, 2019, IEEE Internet of Things Journal	۳۰
۶	Estimation of Residential Heat Pump Consumption for Flexibility Market Applications, 2015, IEEE Transaction on Smart Grid	۲۶

۲۶	Deep long short-term memory: A new price and load forecasting scheme for big data in smart cities, 2019, sustainability (switzerland)	۷
۱۵	ESAENARX and DE-RELM: Novel schemes for big data predictive analytics of electricity load and price, 2019, Sustainable Cities and Society	۸
۱۳	Electric load forecasting based on deep learning and optimized by heuristic algorithm in smart grid, 2020, Applied Energy	۹
۱۲	A brief survey on applications of new generation artificial intelligence in smart grids, 2018, Dianli Jianshe/Electric Power Construction	۱۰



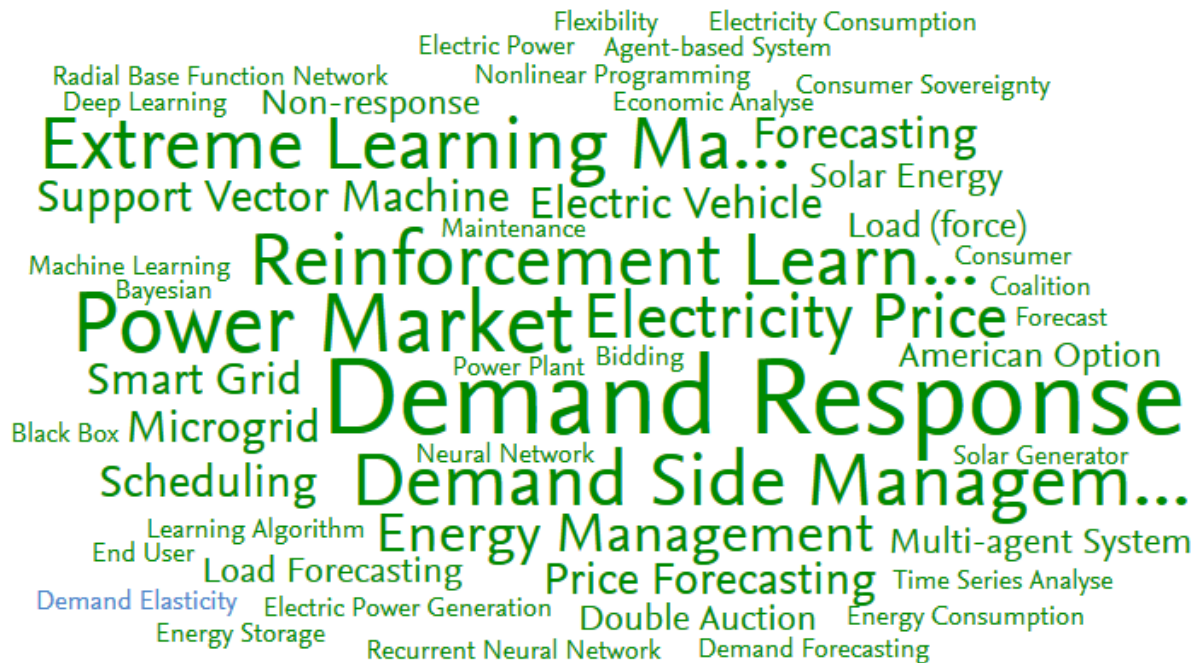
شکل ۲۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم محور بازار برق

❖ دسته چهارم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND

market)) AND ("demand response" OR "demand side management" OR "energy management")

در شکل ۸-۳۰ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۲۹ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۳۱ نشان داده شده است.



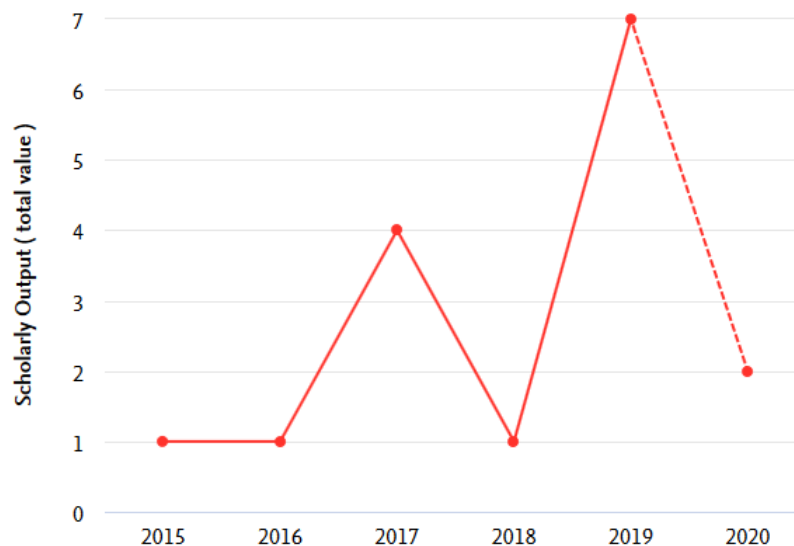
relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۸-۳۰: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم محور بازار برق

جدول ۸-۲۹: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم محور بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A novel hybrid algorithm for electricity price and load forecasting in smart grids with demand-side management, 2016, Applied Energy	۱۰۱
۲	Demand Response for Home Energy Management Using Reinforcement Learning and Artificial Neural Network, 2019, IEEE Transaction on Smart Grid	۳۲
۳	A Two-Layer Nonlinear Combination Method for Short-Term Wind Speed Prediction Based on ELM, ENN, and LSTM, 2019, IEEE Internet of Things Journal	۳۰
۴	Trading strategy optimization for a prosumer in continuous double auction-based peer-to-peer market: A prediction-integration model, 2019, Applied Energy	۲۴

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۵	Deep Reinforcement Learning for Joint Bidding and Pricing of Load Serving Entity, 2019, IEEE Transaction on Smart Grid	۱۹
۶	Residential demand response targeting using machine learning with observational data, 2016, IEEE 55th Conference on Decision and Control, CDC 2016	۱۸
۷	Analysis and Accurate Prediction of User's Response Behavior in Incentive-Based Demand Response, 2019, IEEE Access	۱۷
۸	The development of demand elasticity model for demand response in the retail market environment, 2015, IEEE Eindhoven PowerTech	۱۶
۹	Review on scheduling, clustering, and forecasting strategies for controlling electric vehicle charging: Challenges and recommendations, 2019, IEEE Access	۱۰
۱۰	Application of Deep Reinforcement Learning in Demand Response, 2019, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۸



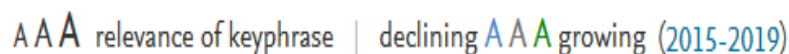
Metric details

x-axis: Publication Year
y-axis: Scholarly Output

شکل ۳۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم محور بازار برق

❖ دسته پنجم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

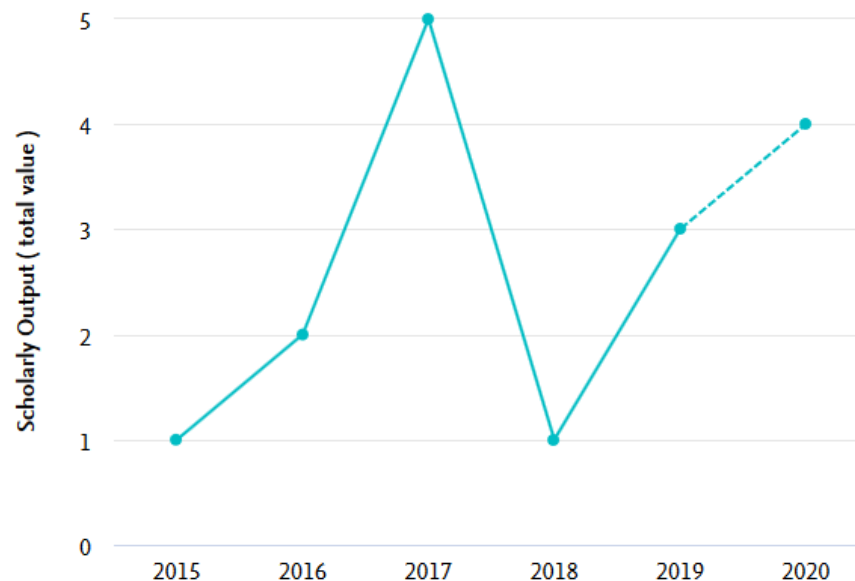
در این دسته تنها ۲۰ مقاله پیدا شد. در شکل ۳۲-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته پنجم نشان داده شده است. پراچای‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۳۰-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۳۳-۸ نشان داده شده است.



جدول ۳۰-۸: پیرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم محور بازار برق

२५३

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۳	An environmental/techno-economic approach for bidding strategy in security-constrained electricity markets by a bi-level harmony search algorithm, 2015, Renewable Energy	۲۹
۴	Deep long short-term memory: A new price and load forecasting scheme for big data in smart cities, 2019, sustainability (switzerland)	۲۶
۵	Day-ahead electricity price forecasting using WPT, GMI and modified LSSVM-based S-OLABC algorithms, 2017, Soft Computing	۲۰
۶	Hybrid ANN and artificial cooperative search algorithm to forecast short-term electricity price in de-regulated electricity market, 2016, IEEE Access	۱۳
۷	Predicting prices in the power TAC wholesale energy market, 2016, 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence	۲۰
۸	Automatic frequency restoration reserve market prediction: Methodology and comparison of various approaches, 2020, Applied Energy	۴
۹	Smart bidding strategy of the demand-side loads based on the reinforcement learning, 2017, IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, EI2 2017 - Proceedings	۲
۱۰	Online learning of optimal bidding strategy in repeated multi-commodity auctions, 2017, Advances in Neural Information Processing Systems	۱



Metric details

x-axis: Publication Year
y-axis: Scholarly Output

شکل ۳۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم محور بازار برق

❖ دسته ششم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("Double Auction" OR "Energy Trading")

در این دسته تنها ۸ مقاله پیدا شد. در شکل ۳۴-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم نشان داده شده است.

پراچاترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۳۱-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال

در این دسته در شکل ۳۵-۸ نشان داده شده است.



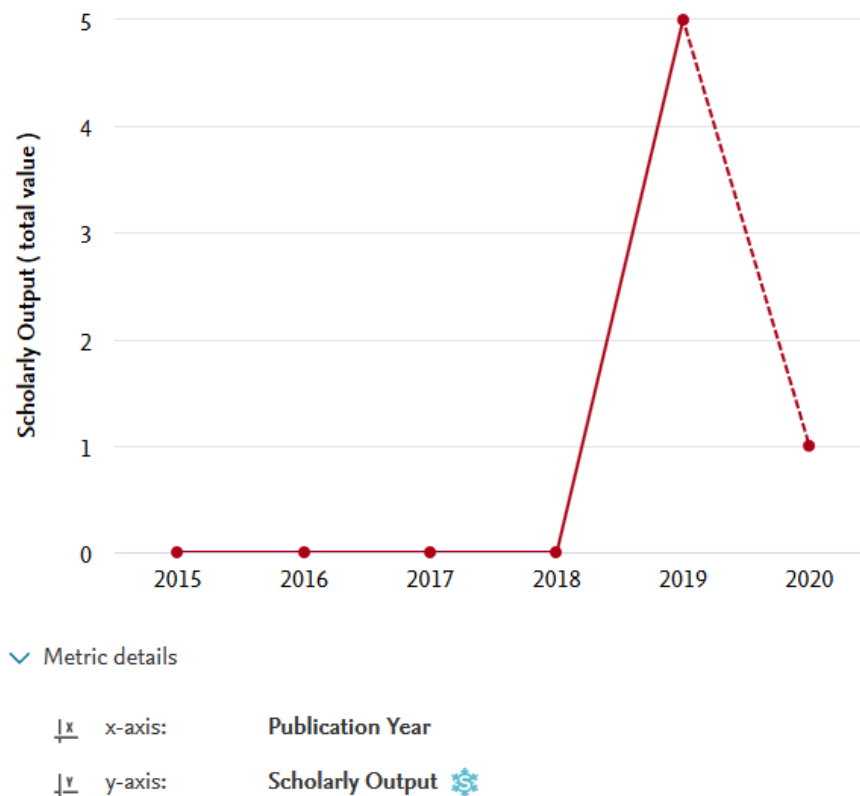
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۳۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم محور بازار برق

جدول ۳۱-۸: پر ارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم محور بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Trading strategy optimization for a prosumer in continuous double auction-based peer-to-peer market: A prediction-integration model, 2019, Applied Energy	۲۴
۲	An Integrated Approach for Value-Oriented Energy Forecasting and Data-Driven Decision-Making Application to Renewable Energy Trading, 2019, IEEE Transaction on Smart Grid	۲
۳	Predictive trading strategy for physical electricity futures, 2020, Energies	۲
۴	A nano-biased energy management using reinforced learning multi-agent on layered coalition model: Consumer sovereignty, 2019, IEEE Access	۲
۵	New approach for smart community grid through blockchain and smart charging infrastructure of evs, 2019, 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications	۲
۶	The development of machine learning in energy trading, 2019, 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence	۰

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۷	Distributed learning of energy contracts negotiation strategies with collaborative reinforcement learning, 2019, International Conference on the European Energy Market	•
۸	A Decentralized Electricity Trading Framework (DETF) for Connected EVs: a Blockchain and Machine Learning for Profit Margin Optimization, 2020, IEEE Transaction on Industrial Informatics	•

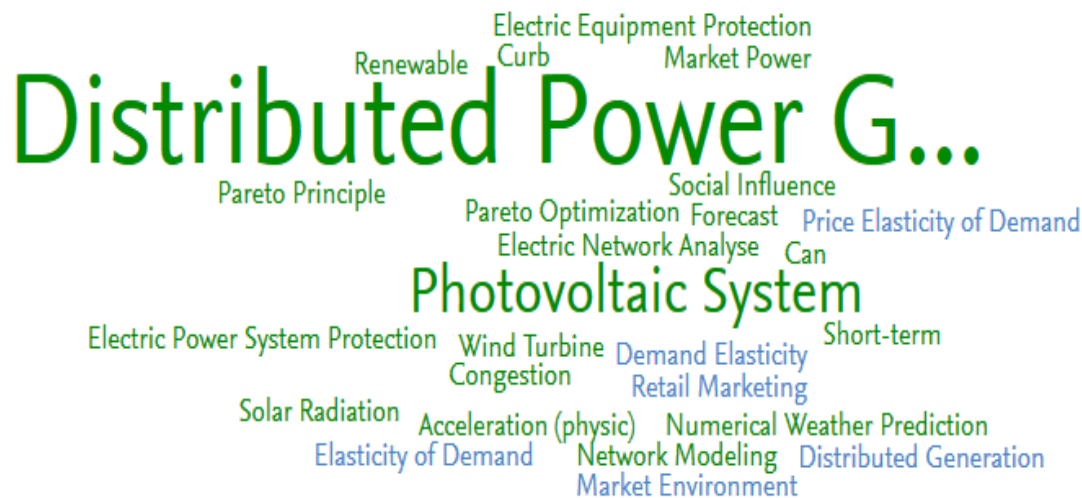


شکل ۳۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم محور بازار برق

❖ دسته هفتم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market")) OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("distributed generation" OR "distributed power generation")

در این دسته تنها ۶ مقاله پیدا شد. در شکل ۸-۳۶ پنجاه کلید واژه اصلی در دسته هفتم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۳۲ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۳۷ نشان داده شده است.



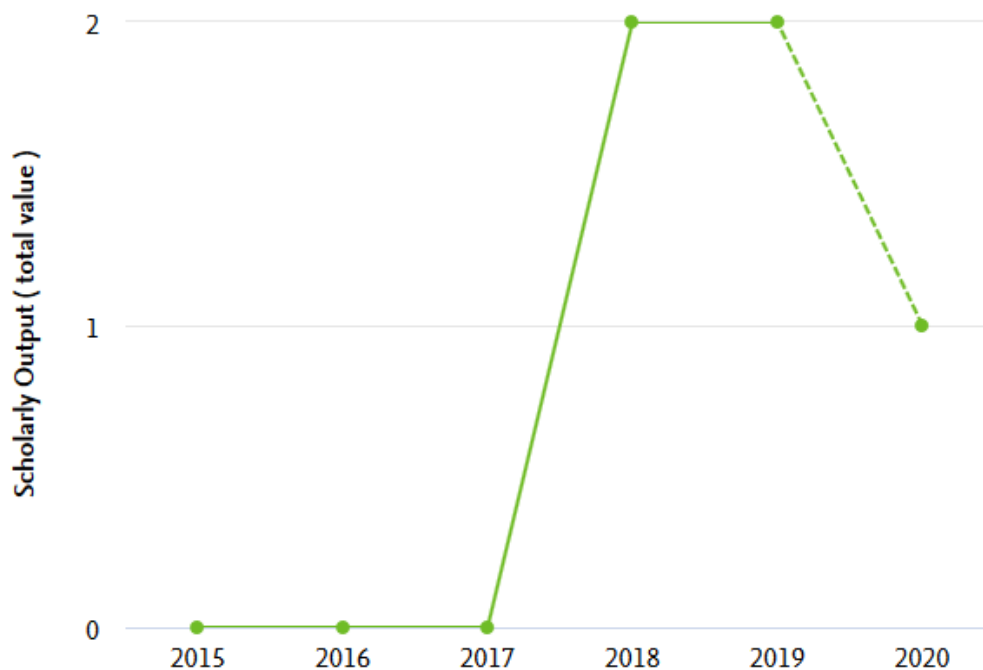
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۸-۳۶: کلیدواژه‌های اصلی در دسته هفتم محور بازار برق

جدول ۸-۳۲: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم محور بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	The development of demand elasticity model for demand response in the retail market environment, 2015, IEEE Eindhoven PowerTech	۱۶
۲	Short Term Solar Irradiance Forecast Using Numerical Weather Prediction (NWP) with Gradient Boost Regression, 2018, 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems	۴
۳	Combining machine learning and multi criteria decision analysis modeling regulatory, economic and social influences on wind turbine, 2018, International Conference on the European Energy Market	۱

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۴	Wind Turbine Integration - Can Current Allocation Policies Curb Transmission Grid Congestions Caused by Renewables Feed-In?, 2019, IEEE Sustainable Power and Energy Conference: Grid Modernization for Energy Revolution, Proceedings	۰
۵	The Impact of Large Scale Distributed Generation Grid-Connection on Structure of Electric Power Network, 2020, Advances in Intelligent Systems and Computing	۰
۶	Artificial neural networks modeling photovoltaic power system allocation-Can artificial intelligence beat a fundamental approach?, 2019, International Conference on the European Energy Market	۰



Metric details

x-axis: Publication Year

y-axis: Scholarly Output 

شکل ۳۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم محور بازار برق

❖ دسته هشتم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market")) OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND ("market power" OR "negotiation Strategy")

در این دسته تنها ۷ مقاله پیدا شد. در شکل ۳۸-۸ پنجاه کلید واژه اصلی در دسته هشتم نشان داده شده

است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۳۳-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک

سال در این دسته در شکل ۳۹-۸ نشان داده شده است.

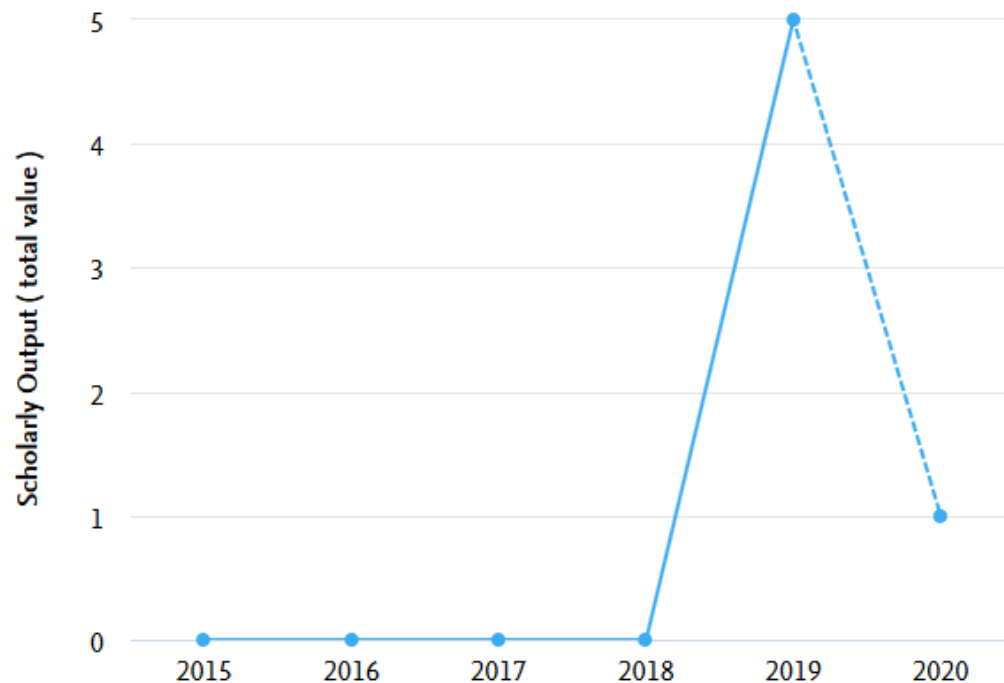


relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۳۸-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته هشتم محور بازار برق

جدول ۳۳-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هشتم محور بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Roth-Erev Reinforcement Learning Approach for Smart Generator Bidding towards Long Term Electricity Market Operation Using Agent Based Dynamic Modeling, 2020, Electric Power Components and Systems	۱
۲	Can Machines Learn Whether Machines Are Learning to Collude?, 2019, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)	۰
۳	Distributed learning of energy contracts negotiation strategies with collaborative reinforcement learning, 2019, International Conference on the European Energy Market	۰
۴	Bilateral negotiations for electricity market by adaptive agent-tracking strategy, 2020, Electric Power Systems Research	۰
۵	7th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, PAAMS 2019, 2019, Communications in Computer and Information Science	۰
۶	Demand Side Management Solutions Study in Singapore Market, 2019, 2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification	۰
۷	Collaborative reinforcement learning of energy contracts negotiation strategies, 2019, Communications in Computer and Information Science	۰



Metric details

x-axis: Publication Year
y-axis: Scholarly Output

شکل ۳۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هشتم محور بازار برق

❖ دسته نهم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

("Machine Learning) AND ("market power" OR "electricity market" OR ("power system" AND " market") OR "retail market" OR ("power system distribution" AND market)) AND "ancillary services"

در این دسته تنها ۲ مقاله پیدا شد. در شکل ۴۰-۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته نهم نشان داده شده است.

پاراجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۳۴-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، به علت کم بودن تعداد مستندات،

نموداری به تفکیک سال در این دسته، همانند بخش‌های قبل ارائه نشده است.

American Option

Power Market Valuation

Financial Product

AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۴-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته نهم محور بازار برق

جدول ۳-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته نهم محور بازار برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Valuation of an American Option for the Spanish Secondary Reserve Market Using a Machine Learning Model, 2019, IEEE Transaction on Power System	۵
۲	Solar PV Power Forecasting Using Modified SVR with Gauss-Newton Method, 2020, Proceedings - 2020 IEEE 2nd Global Power, Energy and Communication Conference	۳

در ادامه، با بررسی متن‌کاوی صورت‌پذیرفته توسط پایگاه داده اسکاپوس و ابزار سایول و بر مبنای مطالعه برخی از مهم‌ترین مستندات منتشرشده در حوزه مطالعات بازار برق، این گزارش به دنبال شناخت برخی کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه مذکور خواهد بود.

۳-۴-۸- کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "بازار برق"

- ❖ شبیه‌ساز بازار
- ❖ مدلسازی معاملات حوزه‌ی خرده‌فروشی
- ❖ پیش‌بینی تقاضای انرژی
- ❖ مدیریت سطح تقاضا
- ❖ پیش‌بینی قیمت
- ❖ پیش‌بینی تولید

۴-۴-۸- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "بازار برق"

برخی از موضوعات تحقیقاتی که انتظار می‌رود در زمینه کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه محور پژوهشی "بازار برق" قابل انجام بوده و مفید باشد در جدول ۳۵-۸ بیان شده است.

جدول ۳۵-۸: موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "بازار برق"

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
شبیه‌ساز بازار ^۱	❖ شبیه‌ساز بازار (اجرای مدل بهره‌برداری) روز آینده ❖ شبیه‌ساز بازار (اجرای مدل بهره‌برداری) زمان واقعی و میان روزی ❖ مدل‌سازی بازارهای مبتنی بر قراردادهای دوجانبه، بازار Pool^۲ ❖ مدل‌سازی بازارهای معاملات انرژی (برق، گاز انرژی‌های تجدیدپذیر، منابع تولید پراکنده و سایر منابع انرژی رایج)
مدلسازی معاملات حوزه خرده‌فروشی ^۳	❖ مدل‌سازی بازار خرده‌فروشی در محیط هوشمند با هدف افزایش سود خرده‌فروش‌ها ❖ مدل‌سازی بازار خرده‌فروشی در محیط هوشمند با هدف حداقل کردن هزینه مشترکین ❖ مدل‌سازی بازار خرده‌فروشی در محیط هوشمند با امکان تبادل توان دوسویه (بین مشترکین و مؤسسات تأمین توان)^۴ ❖ مدل‌سازی بازار خرده‌فروشی در محیط هوشمند با حضور منابع تولید پراکنده‌ی کوچک، منابع مختلف پاسخگویی بار، میکروشبکه‌ها ❖ مدل‌سازی بازار خرده‌فروشی متداول
پیش‌بینی تقاضا	❖ پیش‌بینی تقاضا برای بازار روز آینده و بازار میان روزی^۵ ❖ پیش‌بینی منابع پاسخگویی بار در بازار خدمات جانبی و بازار ظرفیت
مدیریت سمت تقاضا	❖ مدل‌سازی سیستم مدیریت انرژی ساختمان ❖ مدل‌سازی زمان واقعی مصرف خانگی در بستر هوشمند ❖ مدل‌سازی بهینه سمت مصرف با هدف حداقل کردن هزینه مشترکین و حداکثر کردن سود مؤسسات خدمات بار در بستر محیط هوشمند ❖ مدل‌سازی مدیریت مصرف بخش تولید با هدف حداقل کردن هزینه تولید برق
پیش‌بینی قیمت	❖ پیش‌بینی قیمت بازار عمده‌فروشی از دید اپراتور مستقل بازار^۶ برای اعمال دستورات کنترلی جهت کاهش نیروی بازار^۷

Market simulator^۱Pool market^۲Retail market^۳Service Provider^۴Intra-day market^۵Independent system operator^۶Market power^۷

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
پیش‌بینی تولید	❖ پیش‌بینی قیمت بازار عمده فروشی برای تدوین استراتژی مناسب پیشنهاد قیمت ^۱ از دید شرکت‌های تولید توان ^۲ و شرکت‌های خدمات انرژی ^۳ (تقاضا)
	❖ پیش‌بینی نیروی بازار شرکت‌های تولید برای دوره‌ی بلندمدت و کوتاه‌مدت
پیش‌بینی میزان تولید منابع تجدیدپذیر (بادی، خورشیدی و آبی)	❖ پیش‌بینی میزان تولید شرکت‌های تولید توان در ازای تقاضای انرژی الکتریکی مختلف در بازار عمده‌فروشی
	❖ پیش‌بینی میزان تولید منابع تولید پراکنده

۸-۵- متن کاوی در حوزه "پایایی سیستم‌های قدرت"

۸-۵-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "پایایی سیستم‌های قدرت"

افزایش پایایی سیستم قدرت یکی از اهداف متخصصان حوزه سیستم‌های قدرت است که از سالیان دور به‌عنوان چالش اصلی بسیاری از مطالعات بوده و همچنان نیز یکی از موضوعات اصلی تحقیقاتی در این حوزه است. با جستجو در نمایه استنادی Scopus می‌توان مشاهده نمود که بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی حدود ۱۹۰۰۰ مستند علمی (با محدود نمودن نتایج جستجوها در حوزه‌های Energy، Computer Science و Engineering) پیرامون موضوع مطالعات پایایی انجام شده است. به‌منظور ایجاد دیدگاه اولیه نسبت به موضوعات مطالعاتی در زمینه محور پایایی در سیستم‌های قدرت، عبارات کلیدی مربوط به تعدادی از مطالعات انجام‌شده در شکل ۸-۴۱ نمایش داده شده است. در جدول ۸-۳۶، تعدادی از عبارات پرکاربرد نشان‌داده‌شده در شکل ۸-۴۱ ارائه شده است. نتایج قابل مشاهده در شکل ۸-۴۱ و جدول ۸-۳۶ در نمایه استنادی Scopus با منطق جستجوی زیر به‌دست آمده است:

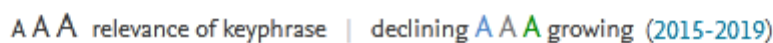
("Power system" AND (Reliability OR Security OR Resiliency))

نکته قابل توجه آن‌که نتایج برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و در حوزه‌های Energy، Computer Science و Engineering محدود شده است. به‌عنوان نمونه، ۱۵ مستند علمی برتر از نظر تعداد استناد در زمینه برنامه‌ریزی توسعه که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول ۸-۳۷ ارائه شده است.

^۱Bidding strategy

^۲GenCos (Generation Companies)

^۳Load serving entities



جدول ۳۶-۸: مهم ترین مفاهیم مرتبط با مطالعات مربوط به محور مطالعات پایایی

موضوع	ردیف	موضوع	ردیف
Unit Commitment	۶	Microgrid	۱
Distributed Power Generation	۷	Smart Grid	۲
Forecasting	۸	Demand Response	۳
State Estimation	۹	Energy Storage	۴
Energy Management	۱۰	Natural Gas	۵

جدول ۳۷-۸: پراچایع ترین مراجع در حوزه مطالعات مربوط به محور مطالعات پایایی

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology	۶۳۲
۲	DC Microgrids - Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issues	۴۵۹
۳	Impedance-source networks for electric power conversion Part I: A topological review	۴۳۸

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۴	Optimal Expansion Planning of Energy Hub with Multiple Energy Infrastructures	۳۰۲
۵	High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies	۲۷۶
۶	A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems	۲۶۹
۷	A Review of False Data Injection Attacks Against Modern Power Systems	۲۵۰
۸	Integration of renewable distributed generators into the distribution system: A review	۲۴۱
۹	Integrated Power and Natural Gas Model for Energy Adequacy in Short-Term Operation	۲۳۸
۱۰	High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications	۲۳۴
۱۱	Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids	۲۲۷
۱۲	Cloud Computing Applications for Smart Grid: A Survey	۲۲۴
۱۳	Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies	۲۱۹
۱۴	The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics	۲۱۲
۱۵	A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications	۲۱۰

مطابق نتایج متن کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شد، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین مستندات دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

- 1) Shahidehpour, Mohammad.
- 2) Dong, Zhao Yang.
- 3) Mancarella, Peirluigi.
- 4) Panteil, Mathaios.
- 5) Wang, Jianhui.
- 6) Abusorrah, Abdullah Mohammad.
- 7) Alabdulwahab, Ahmed Saleh.
- 8) Zhang, Xiaping.
- 9) Blaabjerg, Frede.
- 10) Li, Zuyi.

همچنین، مؤسسات زیر بیشترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

- 1) Illinois Institute of Technology

- 2) Tsinghua University
- 3) King Abdulaziz University
- 4) Aalborg University
- 5) United States Department of Energy
- 6) University of Manchester
- 7) Zhejiang University
- 8) North China Electric Power University
- 9) Argonne National Laboratory
- 10) The University of Chicago

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

- چین
- آمریکا
- انگلستان
- ایران
- استرالیا
- کانادا
- هند
- عربستان
- دانمارک
- یونان

به‌منظور بررسی متون علمی و استخراج روند مطالعات انجام شده پیرامون محور مطالعات پایایی، در ادامه واژه‌های کلیدی انتخاب می‌شود.

- ✓ "power system" AND "machine learning" AND reliability
- ✓ "power system" AND "machine learning" AND security
- ✓ "power system" AND "machine learning" AND resiliency
- ✓ "power system" AND "machine learning" AND ancillary service
- ✓ "power system" AND "machine learning" AND (fault OR failure OR outage)
- ✓ "power system" AND "machine learning" AND reserve
- ✓ "power system" AND "machine learning" AND flexibility

در ادامه به ارائه نتایج به‌دست آمده با استفاده از ابزار علم‌سنجی SciVal و به کمک متن‌کاوی انجام شده به‌وسیله نمایه استنادی Scopus برای واژه‌های کلیدی فوق پرداخته می‌شود. نکته قابل توجه آن که بازه زمانی مطالعات بین ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی انتخاب شده است. شایان ذکر است که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه" های مستندات علمی موجود انجام شده است. در ادامه نتایج حاصل از متن‌کاوی در حوزه محور پژوهشی مطالعات پایایی به تفکیک کلیدواژه‌های انتخابی ارائه می‌شود.

❖ دسته اول:

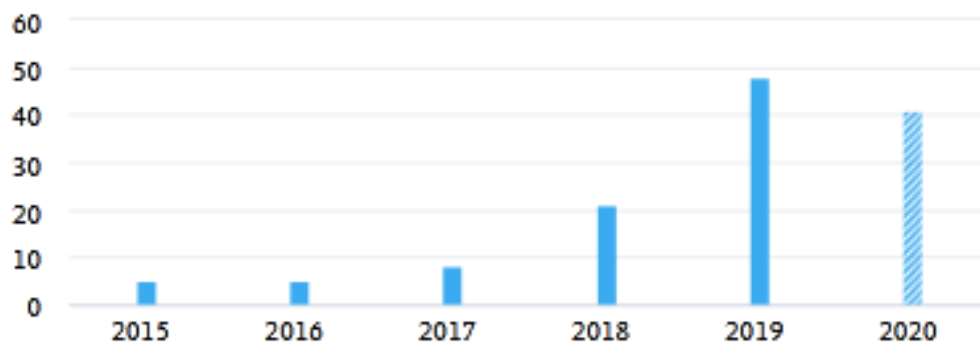
"Power system" AND "Machine learning" AND Reliability.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۱۳۸ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۳۸-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده است. همچنین، شکل ۴۲-۸ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در این دسته است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۳۹-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در شکل ۴۳-۸ نشان داده شده است.

جدول ۳۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور مطالعات پایایی

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	North China Electric Power University
۲	Tsinghua University
۳	Guangdong Power Grid Corporation
۴	Tshwane University of Technology
۵	University of Liege
۶	Amrita Vishwa Vidyapeetham
۷	RAS - Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch
۸	Zhejiang University
۹	Florida State University
۱۰	Heriot-Watt University
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Jordaan, Jacobus Andries
۲	Moloi, Katleho
۳	Wehenkel, L
۴	Zhu, Lipeng
۵	Duchesne, Laurine
۶	Hamam, Yskandar M

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۶	Multiple partial discharge source discrimination with multiclass support vector machines	۳۱
۷	Partial Knowledge Data-Driven Event Detection for Power Distribution Networks	۲۹
۸	An adaptive dynamic short-term wind speed forecasting model using secondary decomposition and an improved regularized extreme learning machine	۲۵
۹	A new approach for fault classification in microgrids using optimal wavelet functions matching pursuit	۲۳
۱۰	Unsupervised Machine Learning-Based Detection of Covert Data Integrity Assault in Smart Grid Networks Utilizing Isolation Forest	۲۲



شکل ۴۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول محور مطالعات پایایی

❖ دسته دوم:

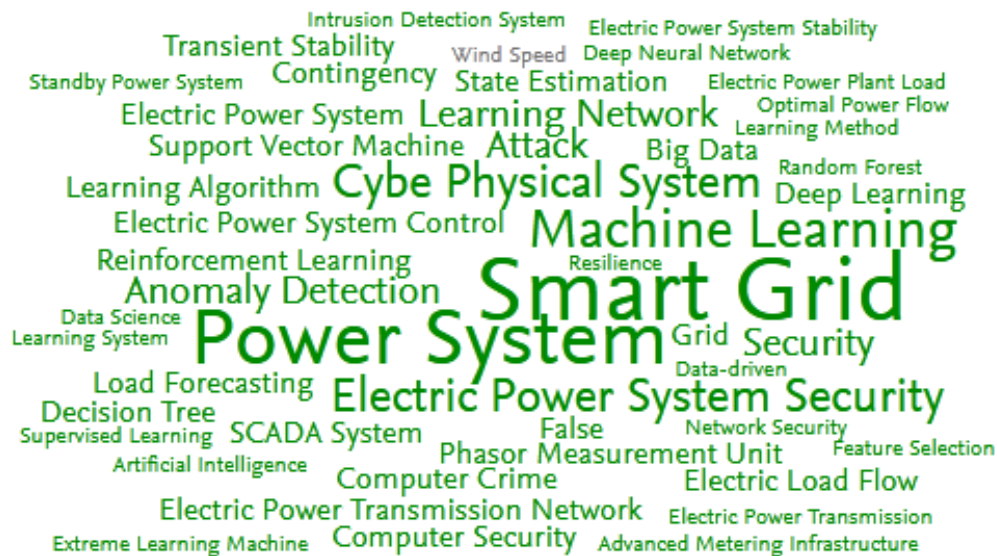
"Power system" AND "Machine learning" AND Security.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۲۲۳ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۴۰-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص مربوط به این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۴۴-۸ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۴۱-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال برای دسته دوم در شکل ۴۵-۸ نشان داده شده است.

جدول ۴۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم محور مطالعات پایایی

مؤسسات برتر	
نام مؤسسه	ردیف
RAS - Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch	۱
State Grid Corporation of China	۲
Zhejiang University	۳

China Electric Power Research Institute	۴
Florida State University	۵
Imperial College London	۶
Ministry of Education, China	۷
Vanderbilt University	۸
Huazhong University of Science and Technology	۹
North China Electric Power University	۱۰
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Kurbatsky, Victor G.
۲	Tomin, Nikita V.
۳	Zhukov, Aleksei V.
۴	Sidorov, Denis N.
۵	Konstantelos, Ioannis
۶	Panasetsky, Daniil A
۷	Štrbac, Goran
۸	Koutsoukos, Xenofon D
۹	Li, Changgang
۱۰	Liu, Yutian

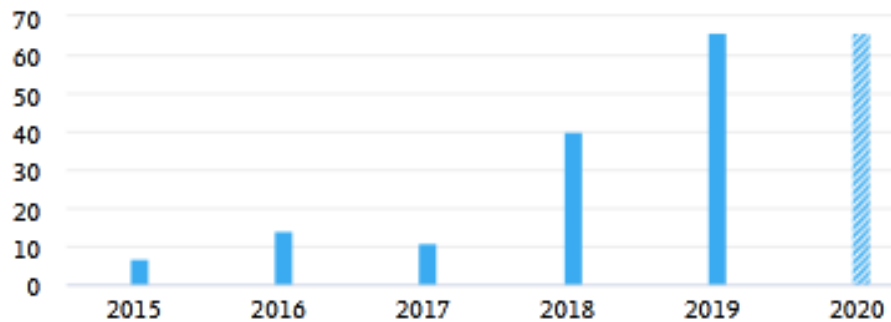


AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۴۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم محور مطالعات پایایی

جدول ۴۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم محور مطالعات پایایی

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Detecting stealthy false data injection using machine learning in smart grid	۱۱۵
۲	Wind speed prediction using reduced support vector machines with feature selection	۹۴
۳	Detection of false data injection attacks in smart grid communication systems	۸۲
۴	Application of Energy-Based Power System Features for Dynamic Security Assessment	۶۹
۵	Application of Big Data and Machine Learning in Smart Grid, and Associated Security Concerns: A Review	۴۹
۶	Analysis and Prospect of Deep Learning Application in Smart Grid	۴۱
۷	Providing SCADA network data sets for intrusion detection research	۳۶
۸	A novel hybrid system based on multi-objective optimization for wind speed forecasting	۳۴
۹	A hierarchical method for transient stability prediction of power systems using the confidence of a SVM-based ensemble classifier	۳۱
۱۰	A Two-Layer Nonlinear Combination Method for Short-Term Wind Speed Prediction Based on ELM, ENN, and LSTM	۳۰



شکل ۴۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم محور مطالعات پایایی

❖ دسته سوم:

"Power system" AND "Machine learning" AND Resiliency.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۴ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۴۲-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۴۶-۸ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی در این دسته است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۴۳-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال مربوط به این دسته در شکل ۴۷-۸ نشان داده شده است.

جدول ۴۲-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته سوم محور مطالعات پایایی

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Applied Science University
۲	Auckland University of Technology
۳	Loyola University Andalusia
۴	Polytechnic University of Catalonia
۵	University of Rochester
۶	University of Vermont
۷	Waterford Institute of Technology
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Akhtar, Fayaz
۲	Baltas, Gregory N.
۳	Currie, Jonathan
۴	Davy, Alan
۵	Elmoudi, Ramadan

Fernández-Navarro, Francisco	۶
Karim, Miftah	۷
Lie, Tek Tjing	۸
Lin, Lei	۹
Matar, Mustafa	۱۰

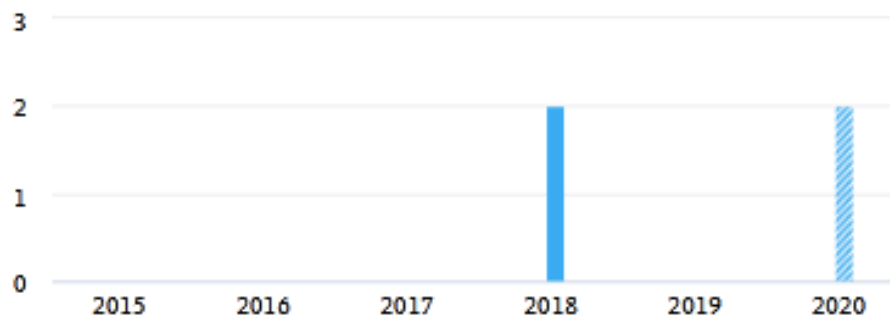


AA relevance of keyphrase | declining AA growing (2015-2019)

شکل ۴۶-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم محور مطالعات پایایی

جدول ۴۳-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم محور مطالعات پایایی

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Achieving Resilience in SDN-Based Smart Grid: A Multi-Armed Bandit Approach	۹
۲	A Novel Ensemble Approach for Solving the Transient Stability Classification Problem	۵
۳	Deep learning for model parameter calibration in power systems	۰
۴	Distributed machine learning on dynamic power system data features to improve resiliency for the purpose of self-healing	۰



شکل ۴۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم محور مطالعات پایایی

❖ چهارم:

"Power system" AND "Machine learning" AND Ancillary service.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۳ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۴۴-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۴۸-۸ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی مربوط به این دسته است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۴۵-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال مربوط به این دسته در شکل ۴۹-۸ نشان داده شده است.

جدول ۴۴-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته چهارم محور مطالعات پایایی

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Hefei University of Technology
۲	University of Oldenburg
۳	University of Queensland
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Bremer, Jörg Bremerrg
۲	Chang, Liucheng Chen
۳	Lehnhoff, Sebastian
۴	Mao, Meiqing Qin
۵	Nadarajah, Mithulananthan
۶	Pawar, Punam
۷	Raza, Muhammad Qamar

Wang, Yangyang	۸
Yue, You	۹

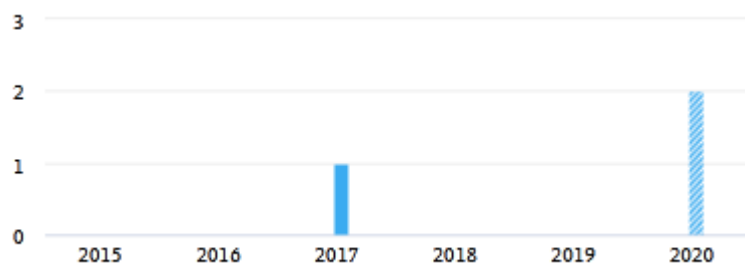


AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۴۸-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته چهارم محور مطالعات پایایی

جدول ۴۵-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم محور مطالعات پایایی

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Multi-time scale forecast for schedulable capacity of EVs based on big data and machine learning	۷
۲	Phase-space exploration of unit ensembles in energy management	۰
۳	Solar PV Power Forecasting Using Modified SVR with Gauss-Newton Method	۰



شکل ۴۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم محور مطالعات پایایی

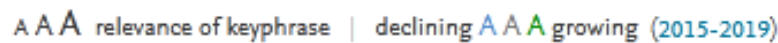
❖ پنجم:

"Power system" AND "Machine learning" AND (Fault OR Failure OR Outage).

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۲۹۹ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۴۶-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۵۰-۸ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در این دسته است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۴۷-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال مربوط به این دسته در شکل ۵۱-۸ نشان داده شده است.

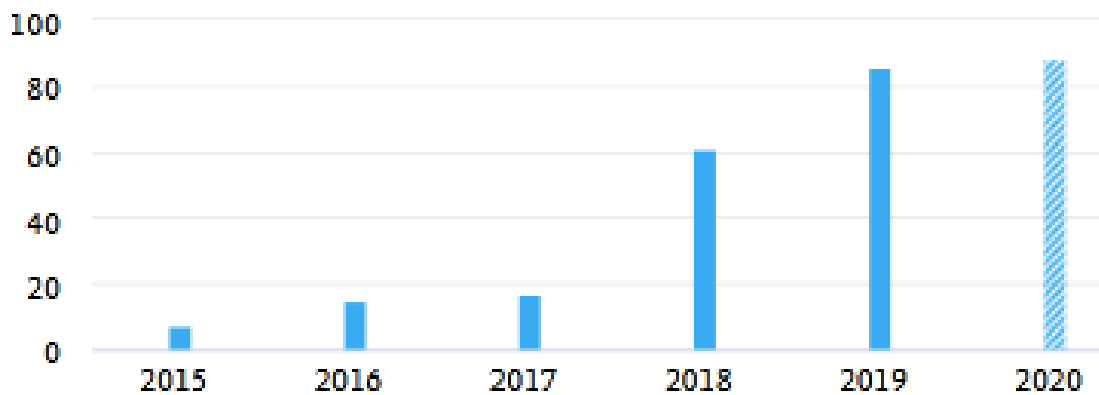
جدول ۴۶-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته پنجم محور مطالعات پایایی

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	State Grid Corporation of China
۲	Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University
۳	China Electric Power Research Institute
۴	Xi'an Jiaotong University
۵	Florida State University
۶	North China Electric Power University
۷	RAS - Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch
۸	SINTEF
۹	Tshwane University of Technology
۱۰	Beijing Jiaotong University
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Mishra, Manohar
۲	Kurbatsky, Victor G
۳	Moloi, Katleho
۴	Tomin, Nikita V
۵	Zhukov, Aleksei V
۶	Andresen, C. A
۷	Eskandarpour, Rozhin
۸	Hao, Liangliang
۹	Jordaan, Jacobus Andries
۱۰	Khodaei, Amin



جدول ۴۷-۸: پراچا ترین مراجع در دسته پنجم محور مطالعات پایایی

२५९



شکل ۵۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم محور مطالعات پایایی

❖ ششم:

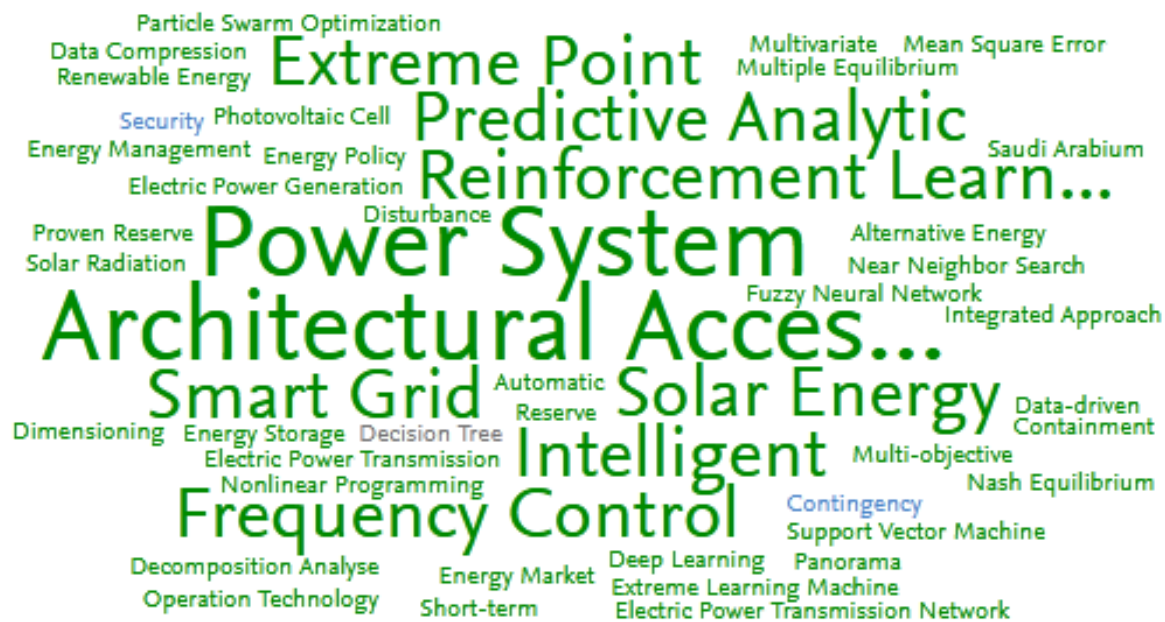
"Power system" AND "Machine learning" AND Reserve.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۱۶ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۴۸-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۵۲-۸ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در این دسته است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۴۹-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال مربوط به این دسته در شکل ۵۳-۸ نشان داده شده است.

جدول ۴۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته ششم محور مطالعات پایایی

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	National Renewable Energy Laboratory
۲	Oak Ridge National Laboratory
۳	University of Tennessee, Knoxville
۴	École des mines Paris
۵	Amrita Vishwa Vidyapeetham
۶	Carnegie Mellon University
۷	Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation
۸	Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg
۹	General Motors
۱۰	Hong Kong Polytechnic University

مؤلفان برتر	ردیف	مؤلف
Li, Hongyu	۱	
Liu, Yilu	۲	
Su, Yu	۳	
You, Shutang	۴	
Agarwal, Varun	۵	
Bhakar, Rohit	۶	
Brosinsky, Christoph	۷	
Carriere, Thomas	۸	
Cui, Yi	۹	
de Vos, Kristof	۱۰	

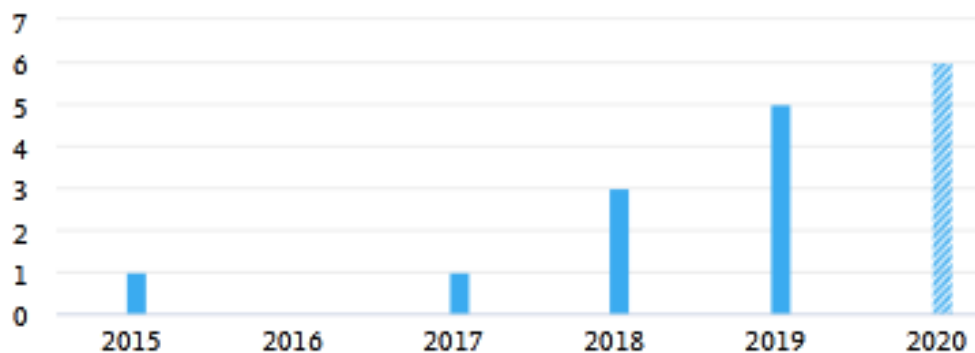


A A A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۵۲-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم محور مطالعات پایایی

جدول ۴۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم محور مطالعات پایایی

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Short-term wind power forecasting: A new hybrid model combined extreme-point symmetric mode decomposition, extreme learning machine and particle swarm optimization	۱۱
۲	Alerting to Rare Large-Scale Ramp Events in Wind Power Generation	۹
۳	Dynamic dimensioning approach for operating reserves: Proof of concept in Belgium	۷
۴	Multiobjective Reinforcement Learning-Based Intelligent Approach for Optimization of Activation Rules in Automatic Generation Control	۵
۵	Matrix based univariate and multivariate linear similar day approach towards short term solar radiation forecasting	۴
۶	Reinforcement Learning Control Algorithm for a PV-Battery-System Providing Frequency Containment Reserve Power	۳
۷	Improved Stacked Ensemble based Model for Very Short-Term Wind Power Forecasting	۳
۸	An Integrated Approach for Value-Oriented Energy Forecasting and Data-Driven Decision-Making Application to Renewable Energy Trading	۲
۹	Machine learning-based PV reserve determination strategy for frequency control on the WECC system	۱
۱۰	Predictive analytics in future power systems: A panorama and state-of-the-art of deep learning applications	۱



شکل ۵۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم محور مطالعات پایایی

❖ دسته هفتم:

"Power system" AND "Machine learning" AND Flexibility.

در نتیجه جستجو در Scopus برای کلیدواژه فوق، تعداد ۱۹ مستند شناسایی می‌شود. در جدول ۵۰-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته نشان داده شده است. همچنین، شکل ۵۴-۸ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در این دسته است. مراجع جستجو شده بر اساس ترتیب ارجاع، در جدول ۵۱-۸ مرتب شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال مربوط به این دسته در شکل ۵۵-۸ نشان داده شده است.

جدول ۵۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته هفتم محور مطالعات پایایی

مؤسسات برتر	
نام مؤسسه	ردیف
Flemish Institute for Technological Research	۱
KU Leuven	۲
State Grid Corporation of China	۳
Technical University of Munich	۴
University of California at Irvine	۵
Aalborg University	۶
Arizona State University	۷
CAS - Shenyang Institute of Computing Technology	۸
Chinese Academy of Sciences	۹
City University of Hong Kong	۱۰
مؤلفان برتر	
مؤلف	ردیف
Deconinck, Geert	۱
Donyanavard, Bryan	۲
Dutt, Nikil D	۳
Herkersdorf, Andreas	۴
Maurer, Florian	۵
Mbuwir, Brida V	۶
Rahmani, Amir Mohammad	۷
Spiessens, Fred	۸
Abdillah, Muhammad	۹
Al-Saffar, Mohammed	۱۰

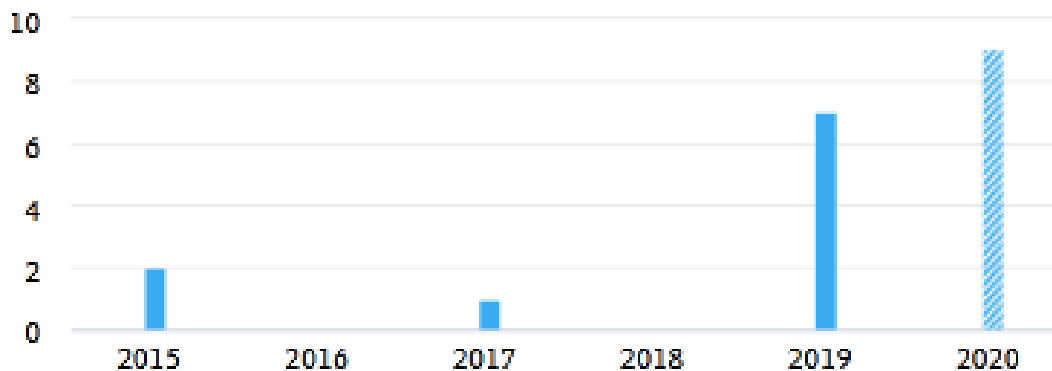


AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۵۴-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هفتم محور مطالعات پایایی

جدول ۵۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم محور مطالعات پایایی

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Estimation of Residential Heat Pump Consumption for Flexibility Market Applications	۲۶
۲	Machine-learning based hybrid demand-side controller for high-rise office buildings with high energy flexibilities	۱۲
۳	Enhanced Pumped Hydro Storage Utilization Using Policy Functions	۶
۴	Artificial intelligence and machine learning approaches to energy demand-side response: A systematic review	۴
۵	Reinforcement learning for control of flexibility providers in a residential microgrid	۴
۶	Real-time optimization of multi-cell industrial evaporative cooling towers using machine learning and particle swarm optimization	۳
۷	The development of a joint modelling framework for operational flexibility in power systems	۲
۸	پپپ	۱
۹	Distributed optimization of energy flows in microgrids based on dual decomposition	۱
۱۰	Distributed optimization of energy flows in microgrids based on dual decomposition	۰



شکل ۵۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم محور مطالعات پایایی

۲-۵-۸- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات پایایی"

به منظور جمع‌بندی مطالعات انجام‌شده در این فصل، در جدول ۵۲-۸ کاربردها و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با حوزه مطالعات پایایی بر مبنای یادگیری ماشین ارائه شده است. قابل ذکر است که موارد ارائه‌شده در این جدول، از مراجع بررسی‌شده در این فصل استخراج شده است.

جدول ۵۲-۸: کاربردها و موضوعات تحقیقاتی در حوزه مطالعات پایایی بر اساس یادگیری ماشین

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
پیش‌بینی	• پیش‌بینی تولید واحدهای خورشیدی (کوتاه‌مدت و بلندمدت) • پیش‌بینی تابش خورشید • پیش‌بینی تولید واحدهای بادی (کوتاه‌مدت و بلندمدت) • پیش‌بینی سرعت باد • پیش‌بینی بار • پیش‌بینی وضعیت پایداری گذاری زمان حقیقی • پیش‌بینی شرایط مکانیکی کلیدهای قدرت فشار قوی • پیش‌بینی خرابی‌های زنجیره‌ای • پیش‌بینی تولید بادی کوتاه‌مدت • پیش‌بینی الگوی خرابی‌ها • پیش‌بینی طول عمر تجهیزات • پیش‌بینی وضعیت فرکانس در سیستم قدرت • پیش‌بینی خروج تجهیزات شبکه‌های هوشمند • پیش‌بینی بار تاب‌آور نسبت به حملات سایبری • پیش‌بینی پایداری گذرا

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
ارزیابی	- پیش‌بینی کمبود توان در سیستم‌های قدرت - ارزیابی پایداری ولتاژ - ارزیابی پایداری فرکانس زمان حقیقی - ارزیابی امنیت ولتاژ آنالین - ارزیابی آسیب‌پذیری^۱ دینامیکی ناشی از ناپایداری گذرا در شبکه‌های هوشمند - ارزیابی امنیت سیستم - ارزیابی قابلیت اطمینان در برنامه‌ریزی بهره‌برداری - ارزیابی پایداری گذرا - ارزیابی ریسک و برنامه‌ریزی بهره‌برداری رخدادهای چندتایی - ارزیابی امنیت دینامیکی لحظه‌ای - تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری - تعیین پتانسیل‌های تعادل بین چند بازیگر
طبقه‌بندی	- کلاس‌بندی محل و نوع خطا در خطوط انتقال - طبقه‌بندی حوادث در سیستم قدرت - طبقه‌بندی وضعیت بهره‌برداری سیستم قدرت - طبقه‌بندی اغتشاشات کیفیت توان - طبقه‌بندی خطاها در ریزشبکه - طبقه‌بندی تخلیه جزئی در تجهیزات الکتریکی
مدل‌سازی	مدل‌سازی بار الکتریکی
تشخیص	❖ تشخیص حادثه در شبکه‌های توزیع - تشخیص حمله به داده‌های مربوط به شبکه هوشمند - تشخیص تزریق اطلاعات غلط به سیستم‌های مخابراتی در شبکه هوشمند - تشخیص خطا در ترانسفورماتورها - تشخیص خطا در ریزشبکه‌ها - تعیین مکان تخلیه جزئی - تشخیص خطا در موتورها - تشخیص دلیل خطای ولتاژ پایین - تشخیص حملات سایبری و اتفاقات سیستم - تشخیص حملات دستکاری اطلاعات PMU - تشخیص محل تخلیه جزئی در تابلوهای برق - تشخیص تلفات غیرفنی در شبکه برق به‌عنوان مثال برق‌دزدی، کنتورهای معیوب و غیره - تشخیص تخلیه جزئی در تجهیزات الکتریکی

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
تخمین	• تخمین فلولی خطوط و ولتاژ شین‌ها • تخمین فرکانس سیستم‌های قدرت • تخمین ریسک عدم تعادل بار سیستم برای روز بعد برای تعیین ظرفیت رزرو چرخان
آنالیز اطلاعات	• آنالیز همبستگی بین داده‌های هواشناسی و خروجی تجهیزات سیستم‌های قدرت • آنالیز اطلاعات سیستم‌های قدرت • آنالیز دیتاهای با حجم زیاد^۱ در مورد دیتاهای PMU
برنامه‌ریزی	• مدیریت قابلیت اطمینان سیستم • مدیریت سمت بار تاب‌آور و امن • بهینه‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان پره‌های توربین بادی • تصمیم‌گیری بهینه در پاسخ‌گویی بار • تنظیم رله‌ها برای جبران خاموشی • تعیین استراتژی رزرو برای کنترل فرکانس • تعیین ظرفیت لازم رزرو چرخان • تعیین استراتژی دسترسی به منابع تولید پراکنده در ریزشبکه‌های جزیره‌ای • تعیین استراتژی جزیره‌ای کردن شبکه • تعیین استراتژی تعمیرات ترانسفورماتورهای توزیع • زمان‌بندی خروج به‌دلیل انجام تعمیرات • کنترل توان راکتیو (ولت-وار) در شبکه‌های توزیع • کنترل امنیت دینامیکی
پایش	• پایش آنالیز نوسانات زیرسکرون بر اساس اطلاعات PMUها • پایش خطای تجهیزات در شبکه هوشمند • پایش شرایط سیستم الکترونیک قدرت • پایش امنیت ولتاژ

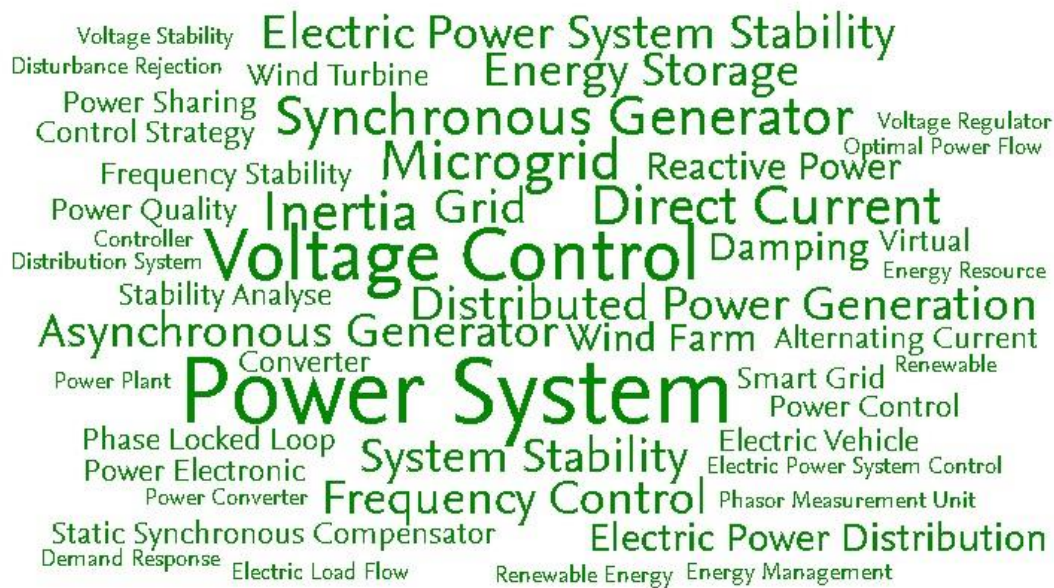
۸-۶- متن کاوی در حوزه "مطالعات پایداری سیستم‌های قدرت"

۸-۶-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "مطالعات پایداری سیستم‌های قدرت"

گسترش و فراوانی مستندات علمی پیرامون پایداری در سیستم‌های قدرت، شاهی بر اهمیت مطالعات این محور است. در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بیش از ۲۲۰۰۰ مستندات علمی (با محدود نمودن نتایج جستجوها در حوزه‌های Engineering, Energy و Computer Science) پیرامون مطالعات پایداری انتشار یافته است که بیان‌گر توجه بالای پژوهشگران به این حوزه

^۱ Big data

است. حوزه‌ها و موضوعات متنوعی در ارتباط با مطالعات پایداری وجود دارد؛ بنابراین، زمانی که پیرامون پایداری صحبت می‌شود، ممکن است هر یک از این حوزه‌ها و موضوعات مورد نظر باشد. جهت بسترسازی برای پرداختن به بررسی کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در مطالعات پایداری، مهم‌ترین مفاهیم مرتبط به مطالعات پایداری در شکل ۸-۵۶ و جدول ۸-۵۳ آمده است:



AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۸-۵۶: عبارت کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با کلیدواژه پایداری

نتایج بالا حاصل جستجوی محور موردنظر در اسکاپوس بوده که نحوه جستجوی منطقی مورد استفاده به صورت زیر است:

(Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND Stability

دقت شود، نتایج برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و در حوزه Engineering, Energy و Computer Science محدود شده است. با توجه به محدودیت‌های سایول، نتایج جستجو برای ۲۰۰۰ داکيومنت اخیر تحلیل و حاصل شده است.

جدول ۸-۵۳: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با پایداری در سیستم‌های قدرت

موضوع	ردیف	موضوع	ردیف	موضوع	ردیف
Frequency Control	۱۳	Distributed Power Generation	۷	Power System	۱
Wind Farm	۱۴	Asynchronous Generator	۸	Voltage Control	۲

Reactive Power	۱۵	Energy Storage	۹	Microgrid	۳
Damping	۱۶	System Stability	۱۰	Direct Current	۴
Electric Power Distribution	۱۷	Electric Power System Stability	۱۱	Synchronous Generator	۵
Converter	۱۸	Grid	۱۲	Inertia	۶

برای نمونه، ۱۰ مستند علمی برتر در زمینه مطالعات پایداری (در سال ۲۰۲۰) که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول ۸-۵۴ نشان داده است.

جدول ۸-۵۴: پراچ‌ترین مراجع در حوزه مطالعات پایداری

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Stochastic Distributed Secondary Control for AC Microgrids via Event-Triggered Communication	۲۴
۲	Reduced-Order Transfer Function Model of the Droop-Controlled Inverter via Jordan Continued-Fraction Expansion	۱۷
۳	H-Infinity Load Frequency Control of Networked Power Systems via an Event-Triggered Scheme	۱۶
۴	A Consensus-Based Algorithm for Power Sharing and Voltage Regulation in DC Microgrids	۱۲
۵	A comprehensive review of virtual synchronous generator	۱۰
۶	Superior energy storage properties and excellent stability achieved in environment-friendly ferroelectrics via composition design strategy	۱۰
۷	Voltage stability assessment and enhancement of power grid with increasing wind energy penetration	۹
۸	Inverter-Based Voltage Control of Distribution Networks: A Three-Level Coordinated Method and Power Hardware-in-The-Loop Validation	۸
۹	A Hybrid Randomized Learning System for Temporal-Adaptive Voltage Stability Assessment of Power Systems	۸
۱۰	Short-term electricity price and load forecasting in isolated power grids based on composite neural network and gravitational search optimization algorithm	۸

مطابق نتایج متن‌کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شده، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین اسناد دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

F. Blaabjerg;

J. M. Guerrero;
 F. Milano;
 W. Wei;
 Y. Xu;
 E. Pouresmaeil;
 P. Wang;
 X. Wang;
 J. Wen;
 Y. Xia.

همچنین، مؤسسات زیر بیش‌ترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

- 1) State Grid Corporation of China;
- 2) Ministry of Education, China;
- 3) North China Electric Power University;
- 4) China Electric Power Research Institute;
- 5) Aalborg University;
- 6) Zhejiang University;
- 7) Tsinghua University;
- 8) Huazhong University of Science and Technology;
- 9) Shanghai Jiao Tong University;
- 10) Southeast University, Nanjing;

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

- چین؛
- آمریکا؛
- هند؛
- ایران؛
- استرالیا؛
- آلمان؛
- انگلیس؛
- کانادا؛
- دانمارک؛
- ایتالیا.

طبق رویه انتخاب شده جهت متن کاوی متون علمی و استخراج روند مطالعات انجام شده پیرامون مطالعات پایداری در ابتدا بایستی واژگان کلیدی مورد نظر جهت انجام متن کاوی انتخاب و معرفی شود. طبیعی است با تغییر واژگان کلیدی نتایج ارائه شده نیز متفاوت خواهد بود، اما سعی شده که واژگان کلیدی انتخابی علاوه بر اینکه در مستندات علمی شناخته شده باشند، تا حد امکان با زیرمجموعه‌های تخصصی محور مورد نظر نیز متناظر و مرتبط بوده باشند. واژگان کلیدی انتخابی برای محور مطالعات پایداری در هفت دسته به صورت زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability Index OR Stability Assessment OR Stability Evaluation);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability Modeling);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Transient Stability);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Frequency Stability);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability AND Cyber);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability AND Multi-Agent);

در ادامه به ارائه نتایج به‌دست آمده با استفاده از ابزار علم‌سنجی SciVal و به کمک متن‌کاوی انجام شده به‌وسیله نمایه استنادی Scopus برای واژگان و عبارات کلیدی انتخابی می‌پردازیم. شایان ذکر است مقیاس زمانی مورد مطالعه در این تحقیق بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بوده است. همچنین جهت استخراج تحقیقات علمی پیرامون کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین مرتبط با واژگان کلیدی مورد نظر، واژه "یادگیری ماشین" به صورت منطقی با واژه کلیدی مد نظر AND شده است.

یادآور می‌شود که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه"های مستندات علمی موجود انجام شده است. در این قسمت نتایج حاصل از متن‌کاوری در حوزه محور پژوهشی مطالعات پایداری به تفکیک کلیدواژه‌های انتخابی ارائه می‌شوند.

❖ دسته اول:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability)

با محدود نمودن مطالعات حوزه پایداری در زمینه Machine learning، تعداد ۲۹۲ مستند (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. در جدول ۸-۵۵، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل ۸-۵۷ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول است. پراچاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۵۶ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در شکل ۸-۵۸ نشان داده شده است.

جدول ۸-۵۵: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور مطالعات پایداری

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	State Grid Corporation of China
۲	China Electric Power Research Institute

Tsinghua University	۳
Huazhong University of Science and Technology	۴
North China Electric Power University	۵
Beijing Jiaotong University	۶
Nanyang Technological University	۷
South China University of Technology	۸
Southeast University, Nanjing	۹
Xi'an Jiaotong University	۱۰
مؤلفان برتر	
مؤلف	ردیف
Hao, Liangliang, Beijing Jiaotong University	۱
Wu, Junyong, Beijing Jiaotong University	۲
Yu, Zhonghong, China Electric Power Research Institute	۳
Yu, Tao T., South China University of Technology	۴
Zhou, Yanzhen, Tsinghua University	۵
Zhu, Lipeng, The University of Hong Kong	۶
Chen, Jinfu, Huazhong University of Science and Technology	۷
Genc, Istemihan, Istanbul Technical University	۸
Hill, David J., University of Sydney	۹
Ji, Luyu, Beijing Jiaotong University	۱۰

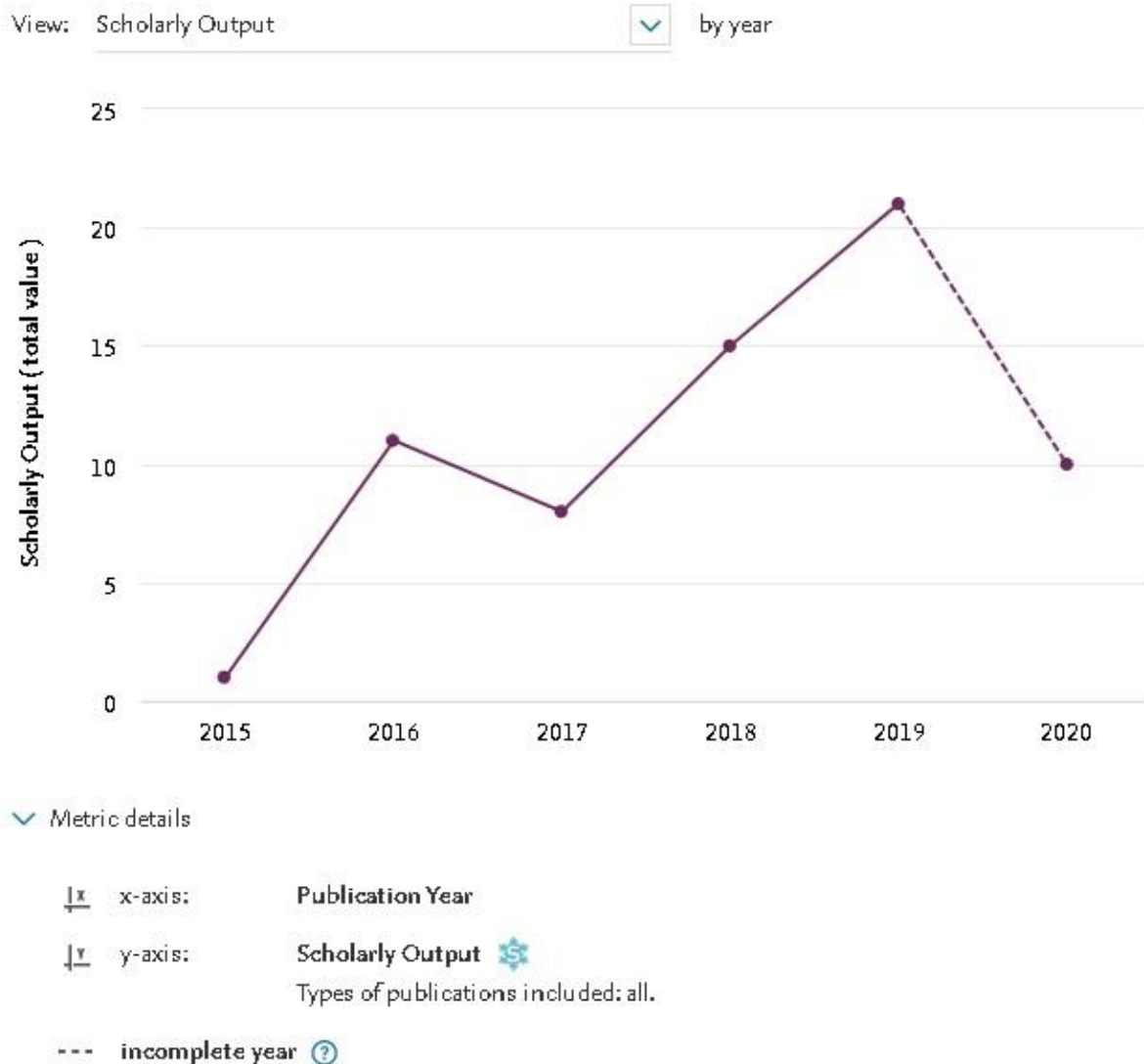


AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۵۷-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول محور مطالعات پایداری

جدول ۵۶-۸: پراچاع‌ترین مراجع در دسته اول محور مطالعات پایداری

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques, 2019, Applied Energy	۱۰۴
۲	Wind speed prediction using reduced support vector machines with feature selection, 2015, Neurocomputing	۹۴
۳	Intelligent time-adaptive transient stability assessment system, 2018, IEEE Transactions on Power Systems	۸۹
۴	Application of Energy-Based Power System Features for Dynamic Security Assessment, 2015, IEEE Transactions on Power Systems	۶۷
۵	A novel two-stage forecasting model based on error factor and ensemble method for multi-step wind power forecasting, 2019, Applied Energy	۶۵
۶	The challenge of non-technical loss detection using artificial intelligence: A survey, 2017, International Journal of Computational Intelligence Systems	۵۹
۷	A Method for Power System Transient Stability Assessment Based on Deep Belief Networks, 2018, Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering	۵۲
۸	Research on Power System Transient Stability Assessment Based on Deep Learning of Big Data Technique, 2017, Dianwang Jishu/Power System Technology	۴۴
۹	Imbalance Learning Machine-Based Power System Short-Term Voltage Stability Assessment, 2017, IEEE Transactions on Industrial Informatics	۴۴
۱۰	Analysis and Prospect of Deep Learning Application in Smart Grid, 2019, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۴۰



شکل ۵۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول محور مطالعات پایداری

❖ دسته دوم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability Index OR Stability Assessment OR Stability Evaluation)

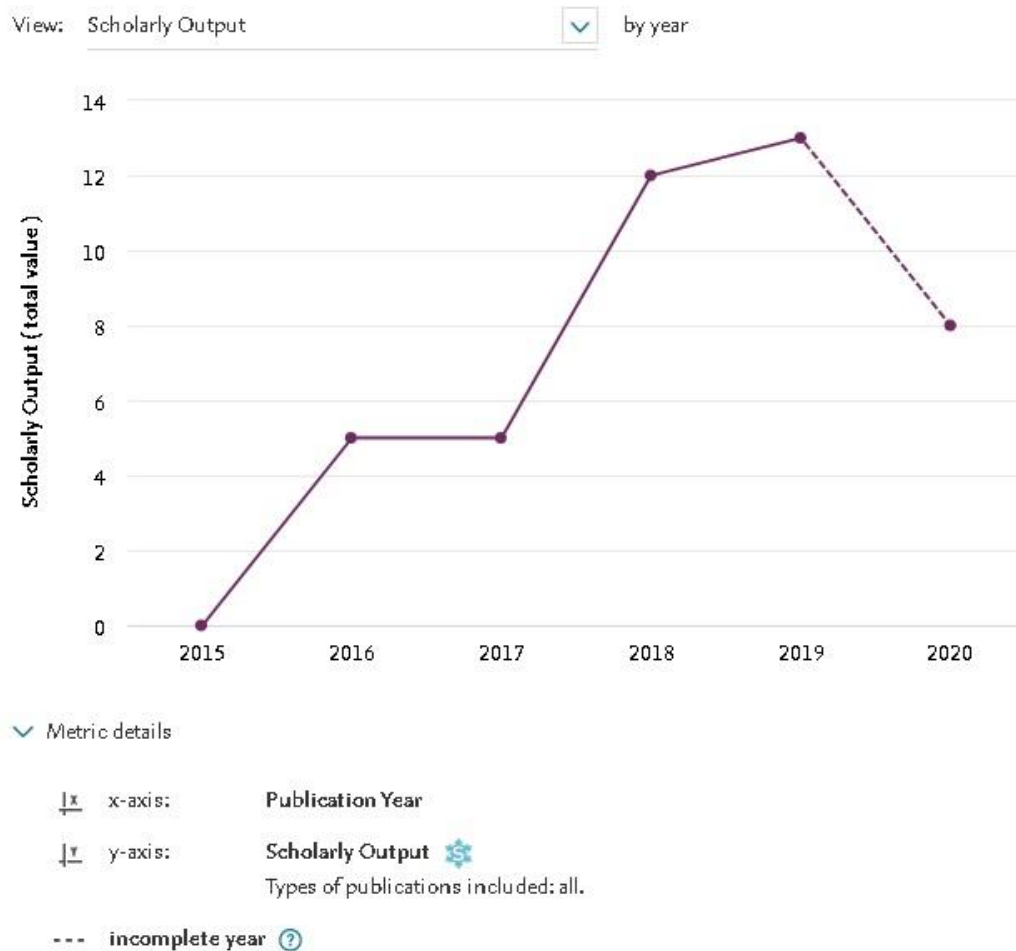
در شکل ۵۹-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم نشان داده شده است. پراچاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۵۷-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۶۰-۸ نشان داده شده است.



جدول ۵۷-۸: پیرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم محور مطالعات پایداری

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Intelligent time-adaptive transient stability assessment system, 2018, IEEE Transactions on Power Systems	۸۹
۲	A Method for Power System Transient Stability Assessment Based on Deep Belief Networks, 2018, Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering	۵۲
۳	Research on Power System Transient Stability Assessment Based on Deep Learning of Big Data Technique, 2017 Dianwang Jishu/Power System Technology	۴۴
۴	Imbalance Learning Machine-Based Power System Short-Term Voltage Stability Assessment, 2017, IEEE Transactions on Industrial Informatics	۴۴
۵	Fast Transient Stability Batch Assessment Using Cascaded Convolutional Neural Networks, 2019, IEEE Transactions on Power Systems	۲۱
۶	Delay Aware Intelligent Transient Stability Assessment System, 2017, IEEE Access	۱۹
۷	A Deep Imbalanced Learning Framework for Transient Stability Assessment of Power System, 2019, IEEE Access	۱۵
۸	Power system transient stability assessment based on cluster features of rotor angle trajectories, 2016, Dianwang Jishu/Power System Technology	۱۴

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۹	Feature selection of power system transient stability assessment based on random forest and recursive feature elimination, 2016, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC	۱۴
۱۰	A weighted random forest approach to improve predictive performance for power system transient stability assessment, 2016, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEE	۱۳



شکل ۶-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم محور مطالعات پایداری

❖ دسته سوم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability Modeling)

Machine Learning

Smart Grid

Forecasting Model

Power System

Demand Response

Microgrid

Phasor Measurement Unit

Cooling Tower

Decision Tree

Frequency Stability

Power (psychology)

Soft Computing Technology

Evolutionary Algorithm

Voltage Stability

Monitoring

Electric Impedance

Reinforcement Learning

Extreme Learning Machine

Adaptive Boosting

Alternating Current

Household Equipment

Electric Power System Interconnection

Wind Turbine

Social System

Multi-objective Optimization

Long Short-term Memory

Offshore Wind Farm

Solar Energy

Photovoltaic System

Adaptive Dynamic

Forecasting Model

Oscillation

Electric Vehicle

Computer System

Epistemology

Phasor Measurement Unit

Data Analyse

Cooling Tower

Heat Island

Nonlinear Modeling

Propagation

Particle Swarm Optimization

Transient Stability

Inertia

Short-term Load Forecasting

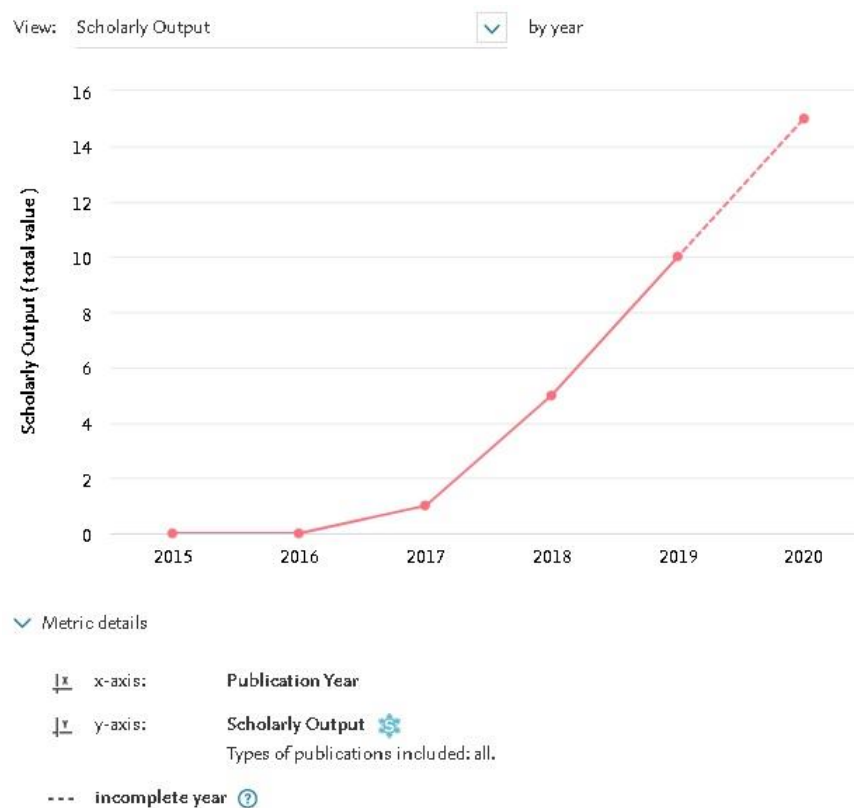
Nonparametric Regression

Dynamic Programming

شکل ۶۱-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته سوم محور مطالعات پایداری

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques, 2019, Applied Energy	۱۰۴
۲	A novel two-stage forecasting model based on error factor and ensemble method for multi-step wind power forecasting, 2019, Applied Energy	۶۵
۳	An adaptive dynamic short-term wind speed forecasting model using secondary decomposition and an improved regularized extreme learning machine, 2018, Energy	۲۵
۴	Day ahead hourly global horizontal irradiance forecasting—application to South African data, 2019, Energies	۹
۵	Prediction of the Transient Stability Boundary Based on Nonparametric Additive Modeling, 2017, IEEE Transactions on Power Systems	۸
۶	Exploration and exploitation of new knowledge emergence to improve the collective intelligent decision-making level of web-of-cells with cyber-physical-social systems based on complex network modeling, 2018, IEEE Access	۷
۷	Gaussian process regression based inertia emulation and reserve estimation for grid interfaced photovoltaic system, 2018, Renewable Energy	۶
۸	Prediction of offshore wind farm power using a novel two-stage model combining kernel-based nonlinear extension of the Arps decline model with	۶

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
	a multi-objective grey wolf optimizer, 2020, Renewable and Sustainable Energy Reviews	
۹	Identification of vulnerable lines in smart grid systems based on affinity propagation clustering, 2019, IEEE Internet of Things Journal	۵
۱۰	DC/DC Power Converter Control-Based Deep Machine Learning Techniques: Real-Time Implementation, 2020, IEEE Transactions on Power Electronics	۴

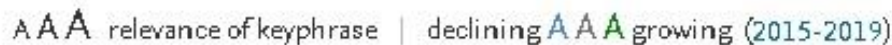


شکل ۶۲-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم محور مطالعات پایداری

❖ دسته چهارم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Transient Stability)

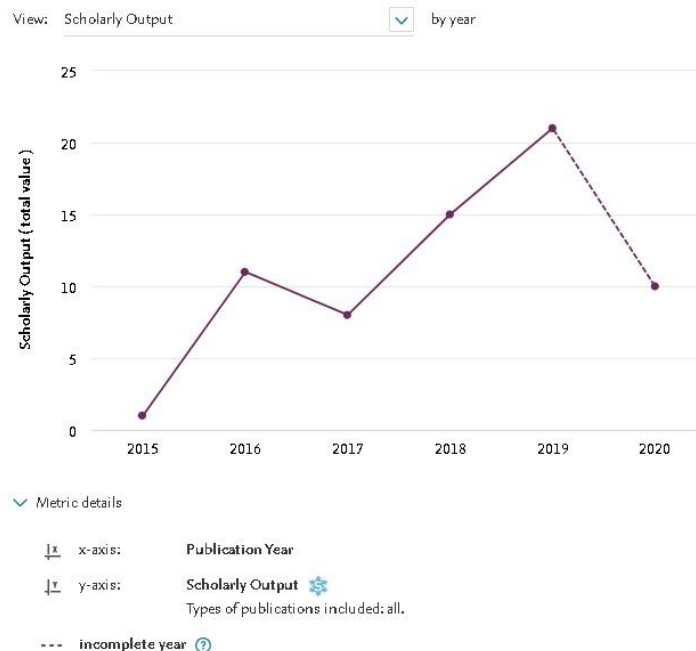
در شکل ۶۳-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۵۹-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۶۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۶۳-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم محور مطالعات پایداری

۲۹۹

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۷	A hierarchical method for transient stability prediction of power systems using the confidence of a SVM-based ensemble classifier, 2016, Energies	۳۱
۸	Fast Transient Stability Batch Assessment Using Cascaded Convolutional Neural Networks, 2019, IEEE Transactions on Power Systems	۲۱
۹	Delay Aware Intelligent Transient Stability Assessment System, 2017, IEEE Access	۱۹
۱۰	A Deep Imbalanced Learning Framework for Transient Stability Assessment of Power System, 2019, IEEE Access	۱۵



شکل ۶۴-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم محور مطالعات پایداری

❖ دسته پنجم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Frequency Stability)

در شکل ۶۵-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته پنجم نشان داده شده است. پراچاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۶۰-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۶۶-۸ نشان داده شده است.



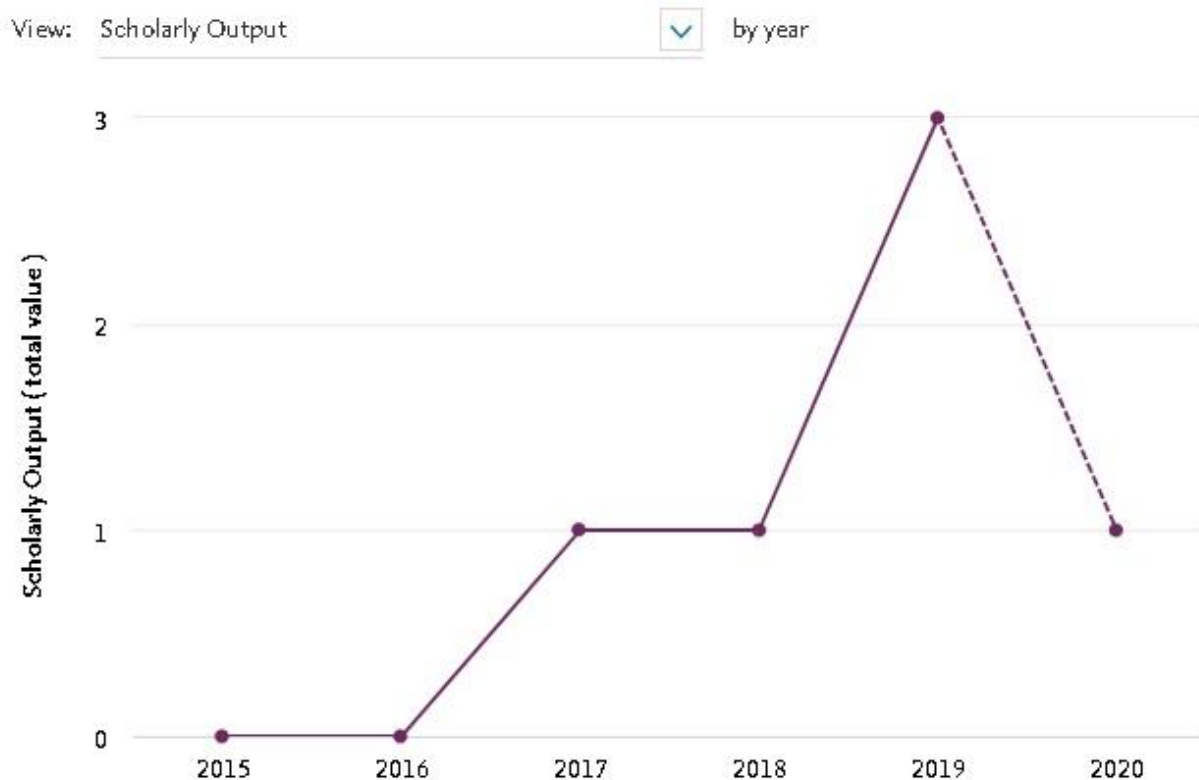
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۶۵-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته پنجم محور مطالعات پایداری

جدول ۶۰-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم محور مطالعات پایداری

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Prediction of the Transient Stability Boundary Based on Nonparametric Additive Modeling, 2017, IEEE Transactions on Power Systems	۸
۲	Deep adaptive dynamic programming based integration algorithm for generation control and optimization of islanded active distribution network, 2018, Kongzhi Lilun Yu Yingyong/Control Theory and Applications	۸
۳	An integrated critic-actor neural network for reinforcement learning with application of DERs control in grid frequency regulation, 2019, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۷
۴	Gaussian process regression based inertia emulation and reserve estimation for grid interfaced photovoltaic system, 2018, Renewable Energy	۶
۵	A Method of Frequency Curve Prediction Based on Deep Belief Network of Post-disturbance Power System, 2019, Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering	۶
۶	Grid Integration of Solar Photovoltaic System Using Machine Learning-Based Virtual Inertia Synthesis in Synchronverter, 2020, IEEE Access	۵
۷	Assessing and mitigating impact of time delay attack: A case study for power grid frequency control, 2019, ICCPS 2019 - Proceedings of the 2019 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems	۴
۸	Modelling and stability investigations of an aggregate wind farm-fed multi-machine system, 2020, Wind Engineering	۴

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۹	Load frequency regulation for multi-area power system using integral reinforcement learning, 2019, IET Generation, Transmission and Distribution	۳
۱۰	Reinforcement Learning Control Algorithm for a PV-Battery-System Providing Frequency Containment Reserve Power, 2018, 2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, SmartGridComm 2018	۳



Metric details

x-axis: Publication Year

y-axis: Scholarly Output

Types of publications included: all.

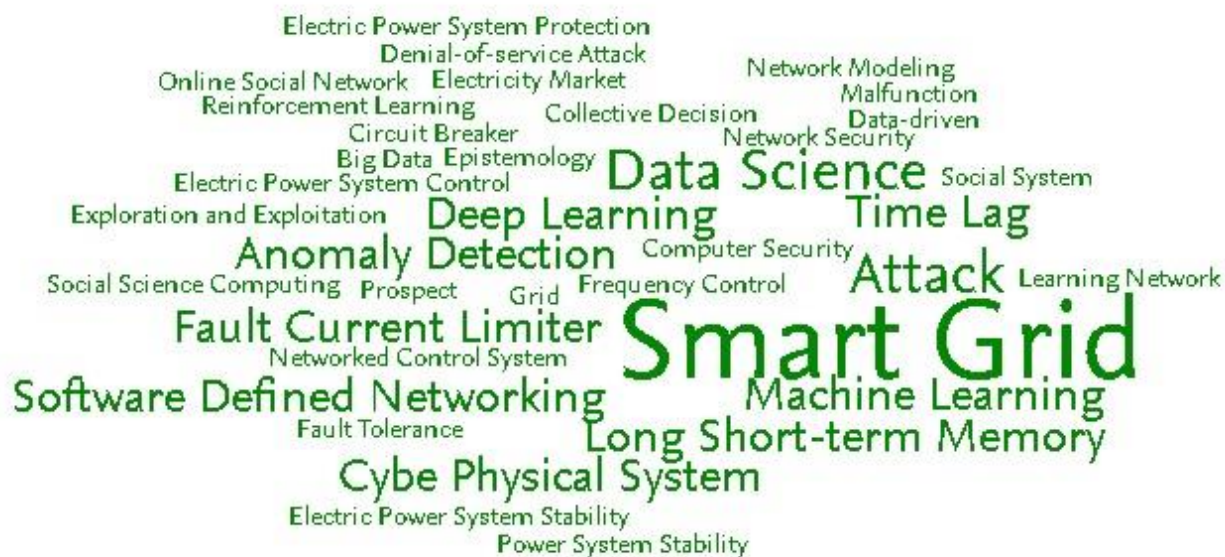
--- incomplete year

شکل ۶۶-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم محور مطالعات پایداری

❖ دسته ششم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability AND Cyber)

در این دسته تنها ۱۲ مقاله پیدا شد. در شکل ۶۷-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم نشان داده شده است. پراچاترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۶۱-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۶۸-۸ نشان داده شده است.



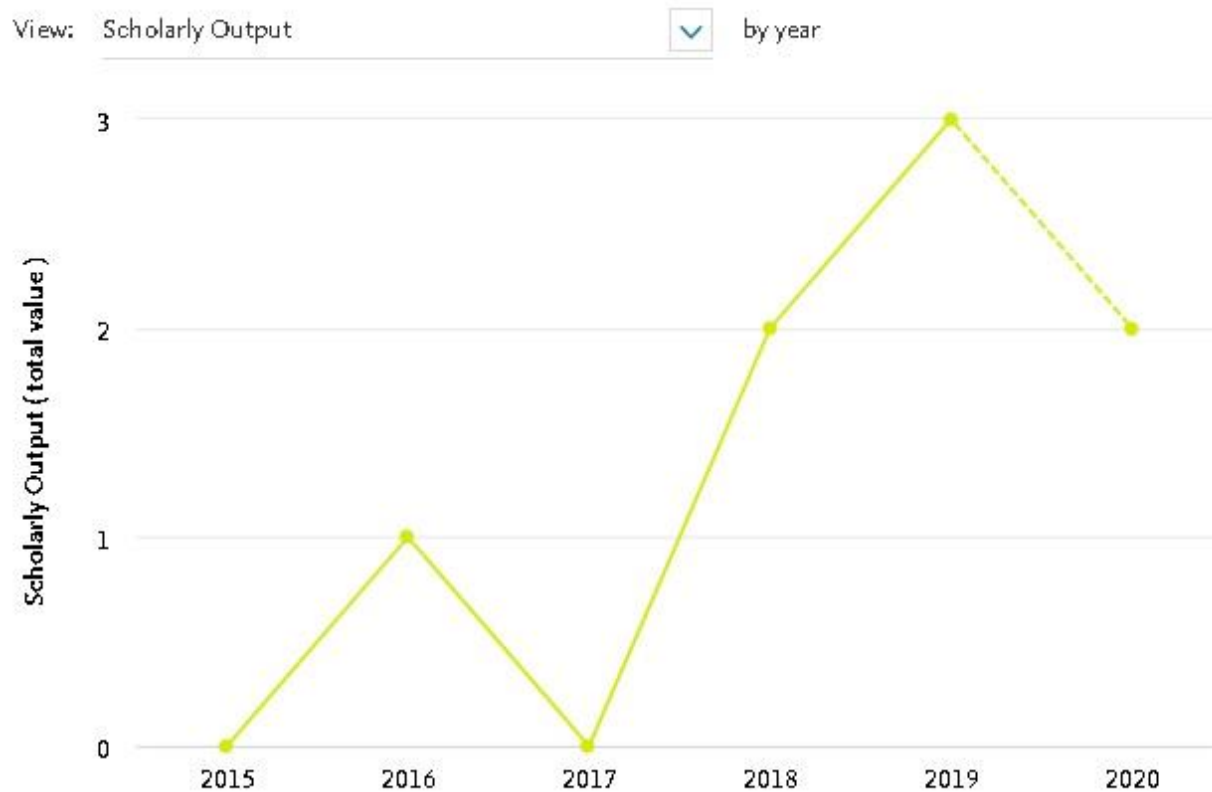
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۶۷-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم محور مطالعات پایداری

جدول ۶۱-۸: پراچاترین مراجع در دسته ششم محور مطالعات پایداری

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Analysis and Prospect of Deep Learning Application in Smart Grid, 2019, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۴۰
۲	Exploration and exploitation of new knowledge emergence to improve the collective intelligent decision-making level of web-of-cells with cyber-physical-social systems based on complex network modeling, 2018, IEEE Access	۷
۳	A Multidirectional LSTM Model for Predicting the Stability of a Smart Grid, 2020, IEEE Access	۶

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۴	Assessing and mitigating impact of time delay attack: A case study for power grid frequency control, 2019, ICCPS 2019 - Proceedings of the 2019 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems	۴
۵	Assessing and mitigating impact of time delay attack: Case studies for power grid controls, 2020, IEEE Journal on Selected Areas in Communications	۲
۶	Applications of Machine Learning in Cyber Security - A Review and a Conceptual Framework for a University Setup, 2020, Advances in Intelligent Systems and Computing	۲
۷	Ultrafast Active Response Strategy against Malfunction Attack on Fault Current Limiter, 2020, IEEE Transactions on Smart Grid	۱
۸	Investigating the impact of intrusion detection system performance on communication latency and power system stability, 2016, Proceedings of the Workshop on Communications, Computation and Control for Resilient Smart Energy Systems, RSES 2016	۰
۹	Attributes of Big Data Analytics for Data-Driven Decision Making in Cyber-Physical Power Systems, 2019, 2020 14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems, IPAPS 2020	۰
۱۰	Toward resilient smart grid communications using distributed SDN with ML-based anomaly detection, 2018, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)	۰



Metric details

x-axis: Publication Year

y-axis: Scholarly Output 
Types of publications included: all.

--- incomplete year 

شکل ۶۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم محور مطالعات پایداری

❖ دسته هفتم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Stability AND Multi-Agent)

در این دسته تنها ۵ مقاله پیدا شد. در شکل ۸-۶۹ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هفتم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۶۲ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۷۰ نشان داده شده است.



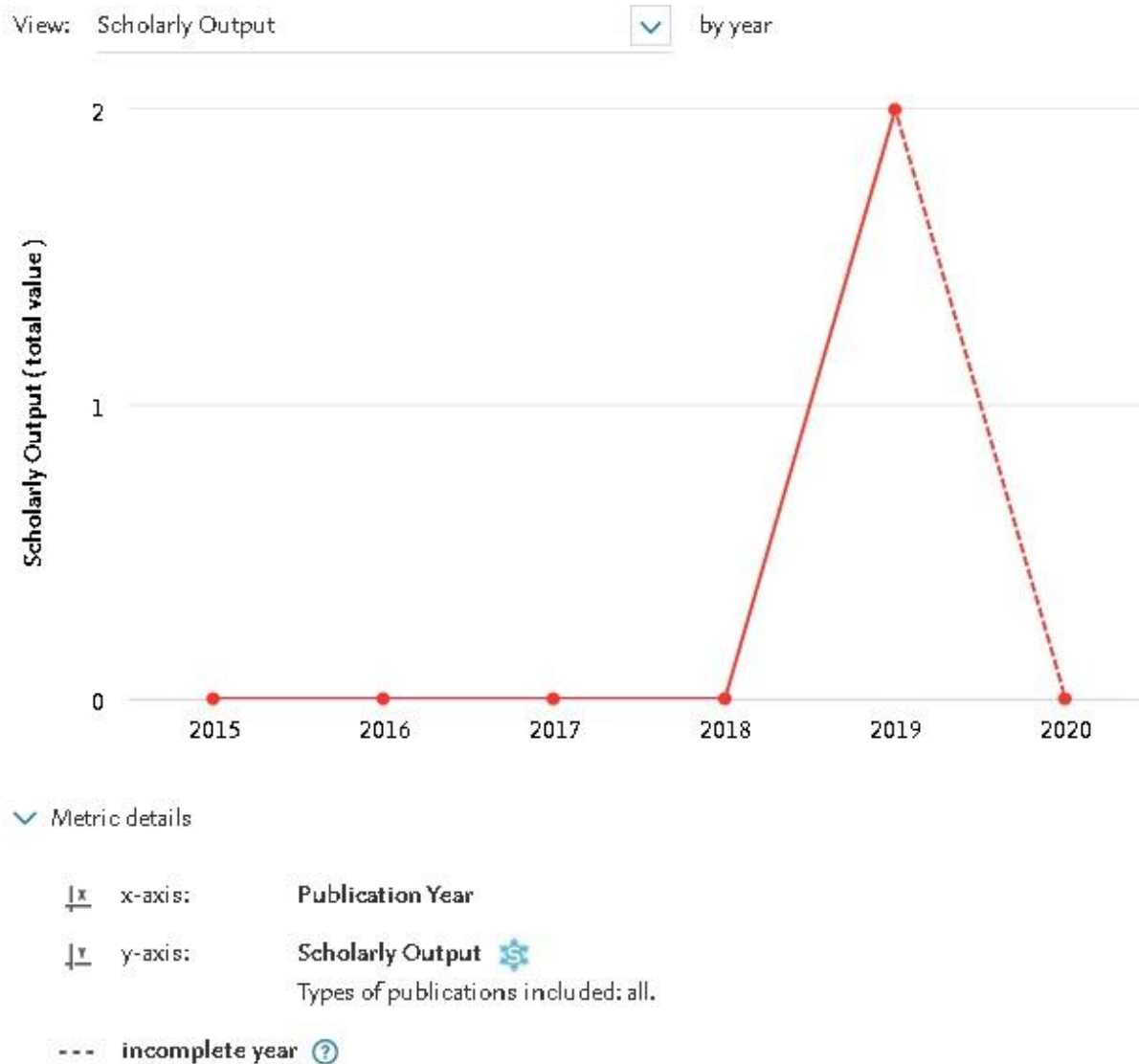
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۸-۶۹: کلیدواژه‌های اصلی در دسته هفتم محور مطالعات پایداری

جدول ۸-۶۲: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم محور مطالعات پایداری

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques, 2019, Applied Energy	۱۰۴
۲	Demand Response for Home Energy Management Using Reinforcement Learning and Artificial Neural Network, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۳۲
۳	Exploration and exploitation of new knowledge emergence to improve the collective intelligent decision-making level of web-of-cells with cyber-physical-social systems based on complex network modeling, 2018, IEEE Access	۷
۴	Optimal Carbon-energy Combined Flow in Power System Based on Multi-agent Transfer Reinforcement Learning, 2019, Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering	۴

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۵	Attributes of Big Data Analytics for Data-Driven Decision Making in Cyber-Physical Power Systems, 2019, 2020 14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems, IPAPS 2020	۰



شکل ۷۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم محور مطالعات پایداری

۲-۶-۸- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات پایداری"

به منظور جمع‌بندی مطالعات انجام‌شده در این فصل، در جدول ۸-۶۳ کاربردها و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با حوزه مطالعات پایداری بر مبنای یادگیری ماشین ارائه شده است. قابل ذکر است که موارد ارائه‌شده در این جدول، از مراجع بررسی‌شده در این فصل استخراج شده است.

جدول ۸-۶۳: موضوعات تحقیقاتی در حوزه مطالعات پایداری بر اساس یادگیری ماشین

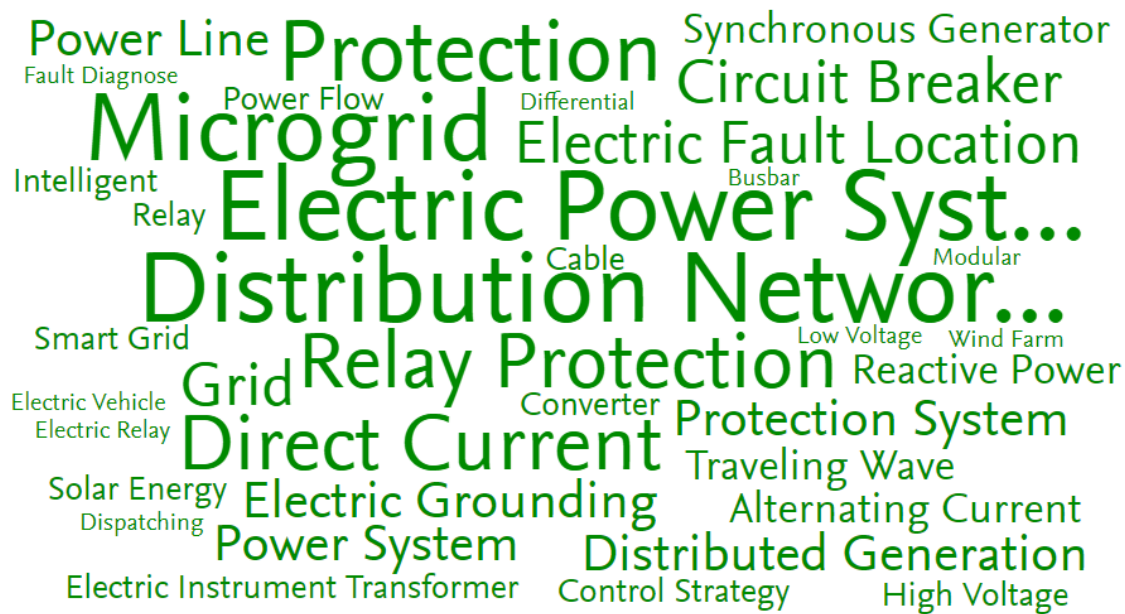
کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
ارزیابی و شناسایی	• ارزیابی پایداری گذرا • ارزیابی امنیت دینامیکی • ارزیابی پایداری ولتاژ • شناسایی خطوط آسیب‌پذیر • شناسایی خطا • ارزیابی حملات تأخیر زمانی • شناسایی داده‌های اشتباه • شناسایی منابع ناپایداری • تشخیص حملات تزریق داده‌های اشتباه • ارزیابی قابلیت گذر از خطا • ارزیابی ریسک و برنامه‌ریزی بهره‌برداری • تشخیص جزیره‌ای شدن
تحلیل و دسته‌بندی	• دسته‌بندی پایداری ولتاژ • تحلیل امنیت ولتاژ • دسته‌بندی پایداری گذرا • تحلیل خطا • تحلیل رفتار دینامیکی ژنراتور • تحلیل پایداری گذرا • تحلیل اعتشاشات سیستم قدرت
پیش‌بینی و تخمین	• پیش‌بینی سرعت باد • پیش‌بینی توان بادی • پیش‌بینی پایداری ولتاژ • پیش‌بینی پایداری گذرا • پیش‌بینی تولید توان PV • پیش‌بینی بار • پیش‌بینی تابش خورشید

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
	• شبیه‌سازی اینرسی و تخمین رزرو • پیش‌بینی فرکانس گذرا • پیش‌بینی نوسانات ولتاژ • پیش‌بینی پایداری زاویه‌ای روتور • تخمین ریسک تهدید سایبری
کنترل و بهینه‌سازی	• کنترل بهینه سیستم‌های غیرخطی با اغتشاشات ناسازگار • بهبود پایداری سیستم قدرت • روش کنترل هماهنگ برای سیستم ذخیره‌سازی انرژی • کنترل تولید و بهینه‌سازی شبکه توزیع فعال جزیره‌ای • تنظیم فرکانس شبکه • توزیع بهینه انرژی • بهره‌برداری ایمن سیستم قدرت • بهبود امنیت و تاب‌آوری • بهبود عملکرد دینامیکی شبکه • بهبود پایداری فرکانس و ولتاژ • میرا کردن نوسانات فرکانس پائین • بارزدایی زیر فرکانس • تصمیم‌گیری در سیستم‌های سایبر-فیزیکی

۸-۷- متن کاوی در حوزه "حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق"

۸-۷-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق"

گسترش و فراوانی مستندات علمی پیرامون حفاظت شبکه‌های برق، شاهی بر اهمیت مطالعات این محور است. در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بیش از ۶۲۰۰ مستندات علمی (با محدود نمودن نتایج جستجوها در حوزه‌های Computer Science، Energy و Engineering) و همچنین مقالات چاپ‌شده در مجلات و کتاب‌ها و کنفرانس‌ها و استانداردها پیرامون حفاظت شبکه‌های برق انتشار یافته است که بیانگر توجه بالای پژوهشگران به این حوزه است. حوزه‌ها و موضوعات متنوعی در ارتباط با حفاظت شبکه‌های برق وجود دارد؛ بنابراین، زمانی که پیرامون حفاظت شبکه‌های برق صحبت می‌شود، ممکن است هر یک از این حوزه‌ها و موضوعات مورد نظر باشد. جهت بسترسازی برای پرداختن به بررسی کاربردهای فناوری یادگیری ماشین در مطالعات حفاظت شبکه‌های برق، مهم‌ترین مفاهیم مرتبط به حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق در شکل ۸-۷۱ و جدول ۸-۶۴ آمده است.



relevance of keyphrase | declining A A A growing (2010-2019)

شکل ۷۱-۸: عبارت کلیدی برتر مستندات علمی مرتبط با محور تخصصی حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

جدول ۶۴-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

ردیف	موضوع	ردیف	موضوع	ردیف	موضوع
۱	Electric power system protection	۷	Direct and alternating current	۱۳	Short circuit analysis
۲	Distribution network protection	۸	Distributed generation	۱۴	busbar
۳	Microgrid	۹	Circuit breaker	۱۵	Electric instrument transformer
۴	Relay protection	۱۰	Electric grounding	۱۶	Cascading failure
۵	Electric fault location	۱۱	Travelling wave	۱۷	Fault diagnose
۶	Power line protection	۱۲	Phasor measurement unit	۱۸	Sure protection

نتایج بالا حاصل جستجوی محور موردنظر در Scopus-SciVal بوده که نحوه جستجوی منطقی مورد استفاده به صورت زیر

است:

"power system protection" OR "transmission system protection" OR "distribution system protection" OR "transmission network protection" OR "distribution network protection" OR "substation protection"

دقت شود، نتایج برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و در حوزه‌های Engineering ، Computer Science و Energy محدود شده است. با توجه به محدودیت‌های SciVal، نتایج جستجو برای ۲۰۰۰ مستند اخیر تحلیل و حاصل شده است. برای نمونه، ۱۵ مستند علمی برتر در زمینه حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول ۸-۶۵ نشان داده است.

جدول ۸-۶۵: پراچ‌ترین مراجع در حوزه حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges	۶۸
۲	A Comparative Evaluation of Advanced Fault Detection Approaches for PV Systems	۳۰
۳	Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control	۲۹
۴	Coordination of MMCs with Hybrid DC Circuit Breakers for HVDC Grid Protection	۲۹
۵	System Protection and its Key Technologies of UHV AC and DC Power Grid	۲۹
۶	Intelligent Electronic Devices with Collaborative Intrusion Detection Systems	۲۱
۷	A system-wide protection against unstable SSCI in series-compensated wind power systems	۲۱
۸	A review of fault ride through of PV and wind renewable energies in grid codes	۲۰
۹	An MPPT-based sensorless line-line and line-ground fault detection technique for pv systems	۱۹
۱۰	Line Impedance Estimation Based on Synchrophasor Measurements for Power Distribution Systems	۱۹
۱۱	Power system protection with digital overcurrent relays: A review of non-standard characteristics	۱۹
۱۲	Fast screening of vulnerable transmission lines in power grids: A pagerank-based approach	۱۸
۱۳	Progress of Advanced Voltage/Current Sensing Techniques for Smart Grid	۱۸
۱۴	A high-speed protection scheme for the DC transmission line of a MMC-HVDC grid	۱۶
۱۵	Challenges and novel solution for wide-area protection due to renewable sources integration into smart grid: An extensive review	۱۵

مطابق نتایج متن‌کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شده، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین مستندات دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

1. Lin, X.
2. Song, G.
3. Li, Z.
4. Wang, Z.

5. Xiong, X.
6. Yin, X.
7. Zhang, Z.
8. Zheng, T.
9. Dong, X.
10. Ustun, T.S.

همچنین، مؤسسات زیر بیش‌ترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

1. State Grid Corporation of China
2. North China Electric Power University
3. China Electric Power Research Institute
4. Huazhong University of Science and Technology
5. North China Electric Power University Baoding
6. Wuhan University
7. Ministry of Education China
8. South China University of Technology
9. Xi'an Jiaotong University
10. Shanghai Jiao Tong University

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

۱- چین (با اختلاف بسیار زیاد نسبت به بقیه کشورها)

۲- امریکا

۳- هند

۴- ایران

۵- کانادا

۶- کره جنوبی

۷- برزیل

۸- بریتانیا

۹- روسیه

۱۰- ژاپن

طبق رویه انتخاب شده جهت متن‌کاوی متون علمی و استخراج روند مطالعات انجام شده پیرامون مطالعات حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق، در ابتدا بایستی واژگان کلیدی مورد نظر جهت انجام متن‌کاوی انتخاب و معرفی شود. طبیعی است با تغییر واژگان کلیدی نتایج ارائه شده نیز متفاوت خواهد بود، اما سعی شده که واژگان کلیدی انتخابی علاوه بر اینکه در مستندات علمی شناخته شده باشند، تا حد امکان با زیرمجموعه‌های تخصصی محور مورد نظر نیز متناظر و مرتبط بوده باشند. واژگان کلیدی انتخابی برای محور مطالعات حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق در هفت دسته به صورت زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

❖ دسته اول:

"Machine learning" AND ("electric power system protection" OR "transmission line protection" OR "transmission system protection " OR "electric distribution network

protection " OR "distribution feeder protection " OR "distribution system protection " OR "electric distribution system protection " OR WAMPAC)

❖ دسته دوم:

"Machine Learning" AND protection AND ("phasor measurement unit" OR synchrophasor OR PMU)

❖ دسته سوم:

"Machine Learning" AND protection AND (smartgrid OR "smart grid" OR microgrid OR "distributed energy resource" OR "photovoltaic resource" OR "wind resource" OR "distributed generation")

❖ دسته چهارم:

"Machine Learning" AND (protection OR "short circuit" OR "fault locating" OR "fault diagnose") AND ("transmission line" OR "electric transmission system" OR "electric transmission network" OR hvdc)

❖ دسته پنجم:

"Machine Learning" AND (protection OR "short circuit" OR "fault location" OR "fault diagnose") AND ("electric distribution line" OR "electric distribution system" OR "electric distribution network" OR "distribution feeder")

❖ دسته ششم:

"Machine Learning" AND ("digital relay" OR "Power System Relaying" OR "Relay Coordination" OR "protective relay" OR "distance relay" OR "overcurrent relay" OR "over voltage relay" OR "special protection system" OR "phase control relay" OR "earth fault relay" OR teleprotection OR "overload relay" OR "frequency relay" OR "power swing protection")

❖ دسته هفتم:

"Machine Learning" AND ("power generation protection" OR "transformer protection" OR "substation protection" OR "generator protection" OR "current transformer protection" OR "potential transformer protection" OR "inrush current protection" OR "loss of field" OR "bus bar protection")

در ادامه، نتایج علم‌سنجی تحت پایگاه اسکاپوس و ابزار علم‌سنجی SciVal برای هر هفت دسته کلیدواژه‌های انتخابی محور ارائه می‌شود. شایان ذکر است مقیاس زمانی مورد مطالعه در این تحقیق بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بوده است. همچنین جهت استخراج تحقیقات علمی پیرامون کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین مرتبط با واژگان کلیدی مورد نظر، واژه "یادگیری ماشین" به صورت منطقی با واژه کلیدی مدنظر AND شده است.

یادآور می‌شود که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه"های مستندات علمی موجود انجام شده است.

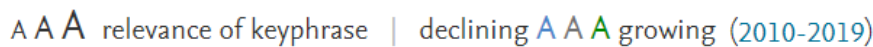
❖ دسته اول: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

"Machine learning" AND ("electric power system protection" OR "transmission line protection" OR "transmission system protection" OR "electric distribution network protection" OR "distribution feeder protection" OR "distribution system protection" OR "electric distribution system protection" OR WAMPAC)

با محدود نمودن مطالعات حوزه حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق در زمینه Machine learning، تعداد ۳۷۴ مستند (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. در جدول ۸-۶۶، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل ۸-۷۲ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی در دسته اول است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۶۷ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در شکل ۸-۷۳ نشان داده شده است.

جدول ۸-۶۶: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

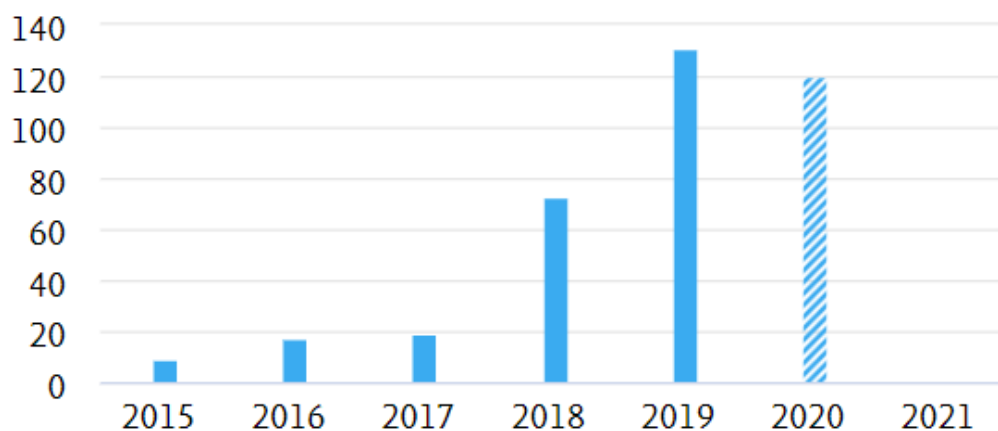
مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Wuhan University
۲	State Grid Corporation of China
۳	Beijing University of Posts and Telecommunications
۴	China Electric Power Research Institute
۵	ABB Group
۶	Florida State University
۷	Tsinghua University
۸	University of Electronic Science and Technology of China
۹	Zhejiang University
۱۰	Beijing Institute of Technology
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Anagnostou, Emmanouil N., University of Connecticut
۲	Arghandeh, Reza, Western Norway University of Applied Sciences
۳	Cui, Qiushi, Arizona State University
۴	Frediani, Maria E.B., National Center for Atmospheric Research
۵	Fu, Meixia, Ministry of Education, China
۶	Jin, Qi, Wuhan University
۷	Li, Ze, Beijing University of Posts and Telecommunications
۸	Mishra, Manohar, Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University
۹	Qiu, Zhibin, Nanchang University
۱۰	Rout, Pravat Kumar, Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University



جدول ۶۷-۸: پیرارجاع ترین مراجع در دسته اول محور حفاظت و ایمنی شبکه های برق

315

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۶	Real-time multi-state classification of short-term voltage stability based on multivariate time series machine learning, 2019, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۹
۷	Islanding detection of distributed generation by using multi-gene genetic programming-based classifier, 2019, Applied Soft Computing Journal	۹
۸	A combined mathematical morphology and extreme learning machine techniques-based approach to micro-grid protection, 2019, Ain Shams Engineering Journal	۸
۹	Machine learning based on bayes networks to predict the cascading failure propagation, 2018, IEEE Access	۸
۱۰	High impedance fault detection in radial distribution system using wavelet transform, 2016, 12th IEEE International Conference Electronics, Energy, Environment, Communication, Computer, Control: (E3-C3)	۶



شکل ۷۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

❖ دسته دوم:

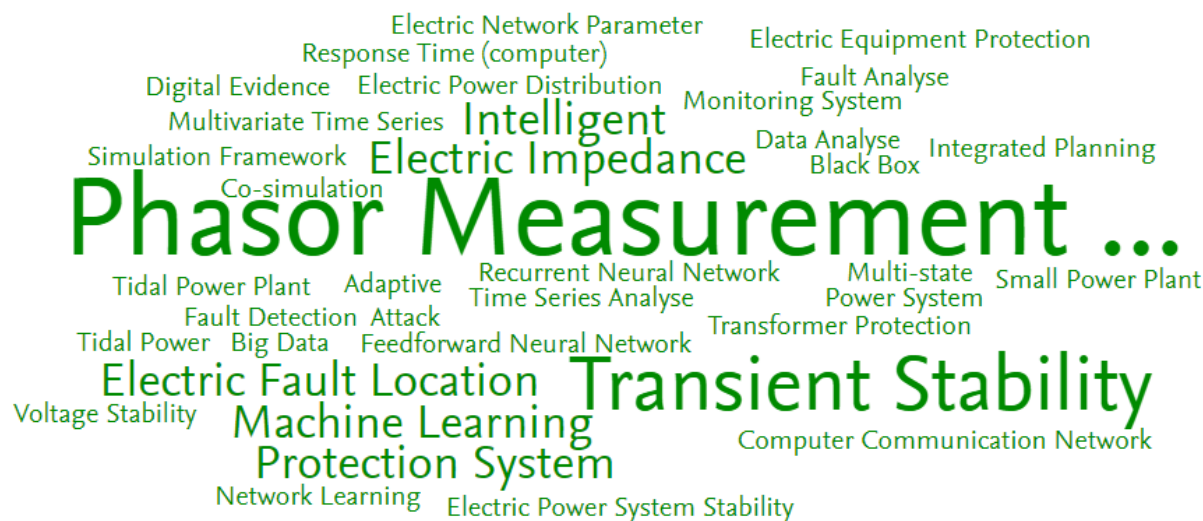
"Machine Learning" AND protection AND ("phasor measurement unit" OR synchrophasor OR PMU)

با محدود نمودن مطالعات حوزه حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق در زمینه Machine learning، تعداد ۱۱ مستند (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. جدول ۶۸-۸ مؤلفان شاخص در این دسته را نشان می‌دهد. شکل ۷۴-۸ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی در دسته دوم است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۶۹-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم در شکل ۷۵-۸ نشان داده شده است.

جدول ۶۸-۸: مؤلفان برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

مؤلفان برتر	
ردیف	نام مؤسسه

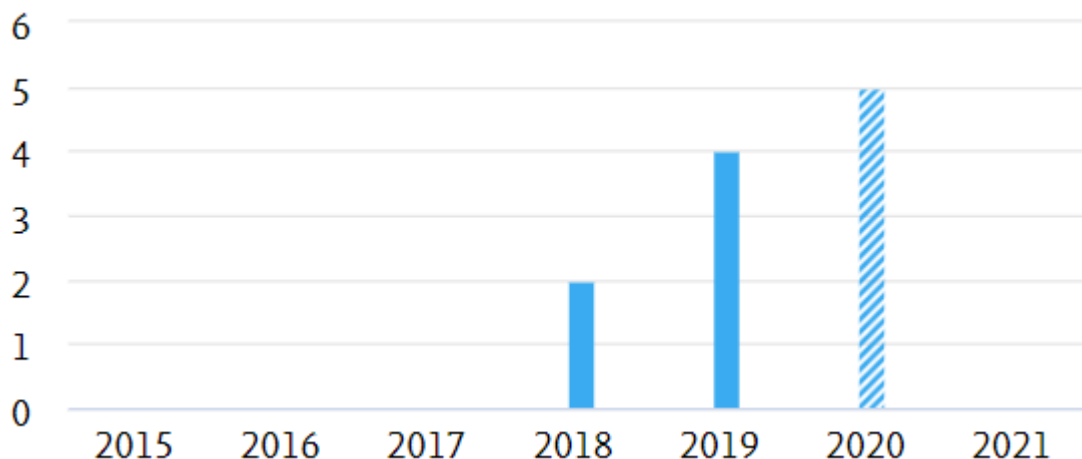
Government Engineering College	۱
Research and Analysis EPRA Electric Energy Co.	۲
The Royal Institute of Technology KTH	۳
New Mexico State University	۴
Illinois Institute of Technology	۵
Arizona State University	۶
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas	۷
National Research University Moscow Power Engineering Institute	۸
The University of Hong Kong	۹
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	۱۰
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Al Halaseh, R.
۲	Alirezaei, G.
۳	Aminifar, F.
۴	Ani Harish
۵	Bhalja, B.
۶	Biswal, M.
۷	Colomé, D.G.
۸	Cui, Q.
۹	Deborah, I.L.
۱۰	Eloja, P.J.P.



شکل ۷۴-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته دوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

جدول ۶۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Intelligent time-adaptive transient stability assessment system, 2018, IEEE Transactions on Power Systems	۸۹
۲	Real-time multi-state classification of short-term voltage stability based on multivariate time series machine learning, 2019, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۹
۳	Enhance High Impedance Fault Detection and Location Accuracy via μ -PMUs, 2020, IEEE Transactions on Smart Grid	۶
۴	Intelligent analysis of digital evidences in large-scale logs in power systems attributed to the attacks, 2019, Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2018	۲
۵	Transient Stability in Power Systems Using a Convolutional Neural Network, 2019, Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON	۱
۶	Machine learning based synchrophasor data analysis for islanding detection, 2020, International Conference for Emerging Technology, INCET 2020	.
۷	Black box attack on machine learning assisted wide area monitoring and protection systems, 2020, IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2020	.
۸	Reverse Power Flow Detection Using Optimally Placed μ PMUs in a Distribution System, 2020, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST	.
۹	An Effective Zone-3 Supervision of Distance Relay for Enhancing Wide Area Back-up Protection of Transmission System, 2020, IEEE Transactions on Power Delivery	.
۱۰	A co-simulation framework for integrated planning and analysis of wide area measurement and protection systems, 2018, Journal of Communications Software and Systems	.



شکل ۷۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

❖ دسته سوم:

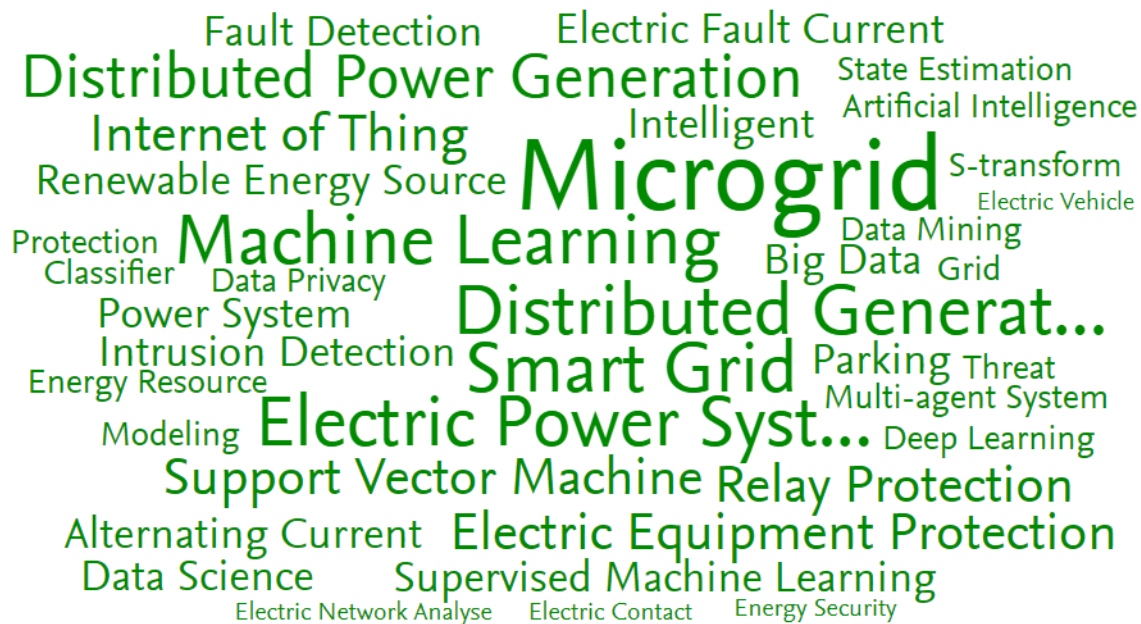
"Machine Learning" AND protection AND (smartgrid OR "smart grid" OR microgrid OR "distributed energy resource" OR "photovoltaic resource" OR "wind resource" OR "distributed generation")

جدول ۷۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته را نشان می‌دهد. در شکل ۷۶-۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۷۱-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۷۷-۸ نشان داده شده است.

جدول ۷۰-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته سوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

مؤسسات برتر	
نام مؤسسه	ردیف
Siksha O Anusandhan Deemed to be University	۱
Zhejiang University	۲
National Institute of Technology Karnataka	۳
Universidade de Sao Paulo - USP	۴
Vellore Institute of Technology, Vellore	۵
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	۶
Universidade Federal de Sao Carlos	۷
Jamia Millia Islamia	۸
Aalborg Universitet	۹
University of Technology Sydney	۱۰
مؤلفان برتر	

ردیف	مؤلف
۱	Mishra, M.
۲	Rout, P.K.
۳	Gaonkar, D.N.
۴	Gosses, K.
۵	Kaiser, J.
۶	Li, L.
۷	Manikonda, S.K.G.
۸	Ott, L.
۹	Rabenstein, R.
۱۰	Schafer, M.

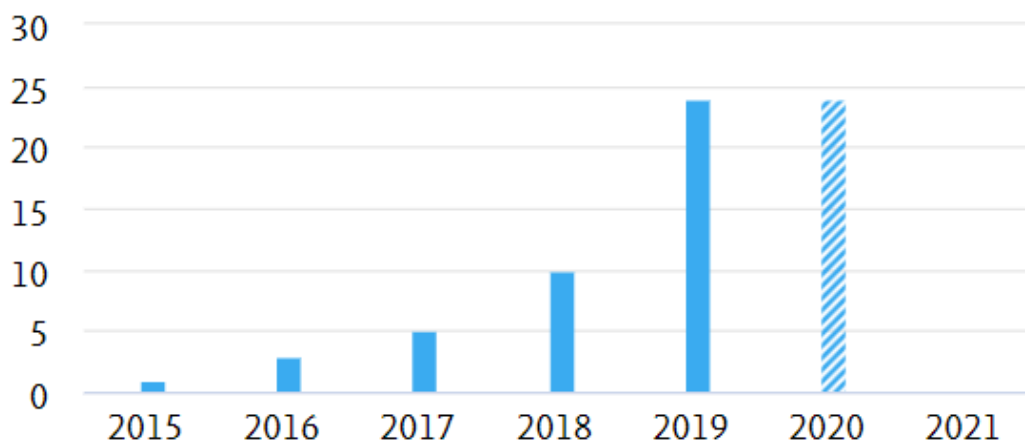


A A A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۷۶-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

جدول ۷۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	An adaptive neuro-fuzzy inference system for islanding detection in wind turbine as distributed generation, 2015, Complexity	۷۱
۲	Fault detection and classification based on co-training of semisupervised machine learning, 2017, IEEE Transactions on Industrial Electronics	۵۱
۳	Analysis and Prospect of Deep Learning Application in Smart Grid, 2019, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۴۰
۴	Diagnosis of series DC Arc faults - A machine learning approach, 2017, IEEE Transactions on Industrial Informatics	۳۹
۵	Adaptive protection combined with machine learning for microgrids, 2019, IET Generation, Transmission and Distribution	۲۳
۶	Islanding detection of distributed generation by using multi-gene genetic programming-based classifier, 2019, Applied Soft Computing Journal	۹
۷	A combined mathematical morphology and extreme learning machine techniques-based approach to micro-grid protection, 2019, Ain Shams Engineering Journal	۸
۸	A novel islanding detection technique using modified Slantlet transform in multi-distributed generation, 2019, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۷
۹	An efficient islanding classification technique for single phase grid connected photovoltaic system, 2019, International Conference on Computer and Information Sciences, ICCIS 2019	۷
۱۰	Fault Diagnosis Based Approach to Protecting DC Microgrid Using Machine Learning Technique, 2017, Procedia Computer Science	۷



شکل ۷۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

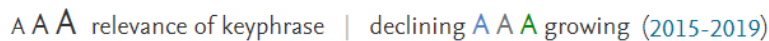
❖ دسته چهارم:

"Machine Learning" AND (protection OR "short circuit" OR "fault locating" OR "fault diagnose") AND ("transmission line" OR "electric transmission system" OR "electric transmission network" OR hvdc)

جدول ۸-۷۲ مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته را نشان می‌دهد. در شکل ۸-۷۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته چهارم نشان داده شده است. پراچاترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۷۳ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۷۹ نشان داده شده است.

جدول ۸-۷۲: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته چهارم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

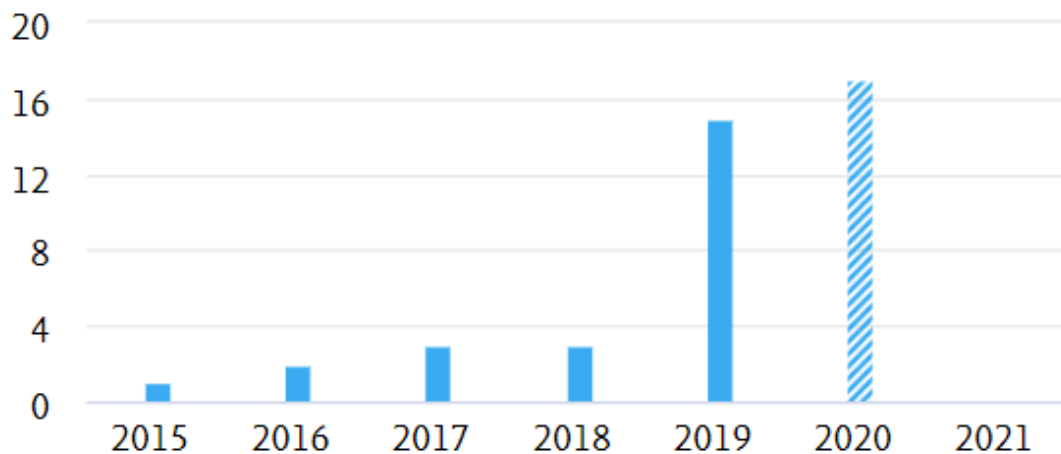
مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Universiti Putra Malaysia
۲	Universiti Teknologi MARA
۳	Imperial College London
۴	Kalinga Institute of Industrial Technology, Bhubaneswar
۵	National Institute of Technology Raipur
۶	Gonbad Kavous University
۷	State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd.
۸	Government Engineering College
۹	University of Tennessee
۱۰	State Grid Liaoning Electric Power Search Institute
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Hizam, H.
۲	Othman, M.L.
۳	Emmanuel, O.
۴	Farshad, M.
۵	Othman, M.M.
۶	Yadav, A.
۷	Abdelaziz, A.Y.
۸	Acakpovi, A.
۹	Adiono, T.
۱۰	Ahmad, F.



جدول ۷۳-۸: پراچاع‌ترین مراجع در دسته چهارم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

۳۴۳

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۸	Wavelet Transform and Support Vector Machine-Based Current-Only Directional Overcurrent Relay for Transmission Line Protection, 2018, Proceedings of the 2018 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America, T and D-LA 2018	۲
۹	An analytical fault model for direct current lines, 2016, Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems	۲
۱۰	A new strategy based on feature selection for fault classification in transmission lines, 2016, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)	۱



شکل ۷۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

❖ دسته پنجم:

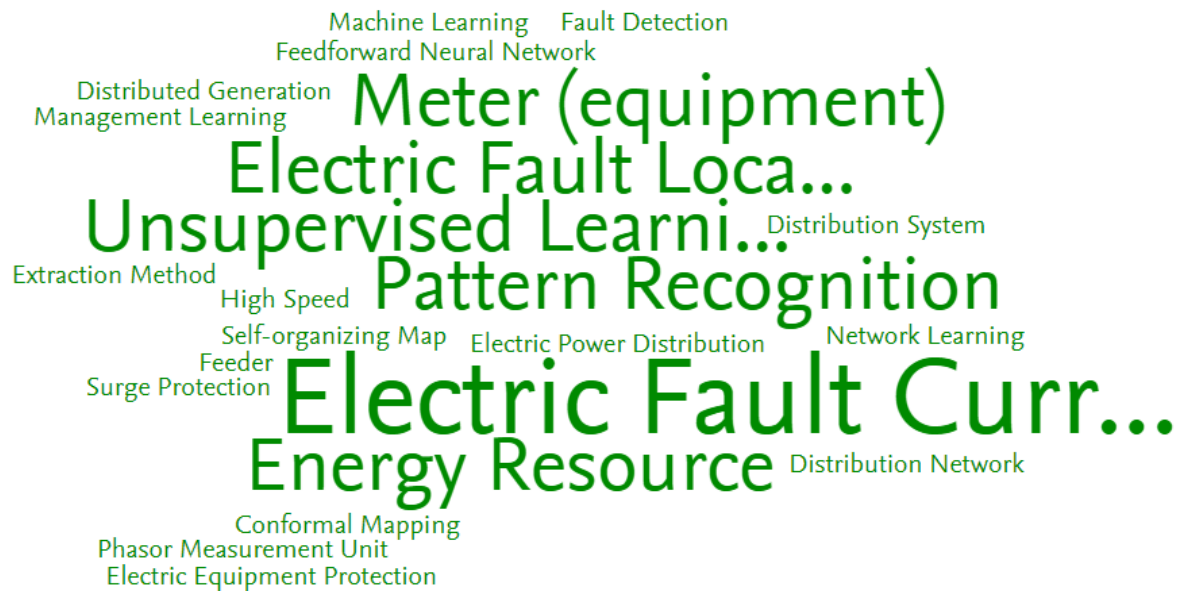
"Machine Learning" AND (protection OR "short circuit" OR "fault location" OR "fault diagnose") AND ("electric distribution line" OR "electric distribution system" OR "electric distribution network" OR "distribution feeder")

جدول ۷۴-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته را نشان می‌دهد. در شکل ۸۰-۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته پنجم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۷۵-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸۱-۸ نشان داده شده است.

جدول ۷۴-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته پنجم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Université McGill
۲	Universidade de Sao Paulo - USP

Universidad Nacional de San Juan	۳
Malaviya National Institute of Technology Jaipur	۴
Huazhong University of Science and Technology	۵
University of Illinois at Chicago	۶
University of Oklahoma	۷
North Dakota State University	۸
University of the Philippines Diliman	۹
Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca	۱۰
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Cui, Q.
۲	El-Arroudi, K.
۳	Eloja, P.J.P.
۴	Fei, W.
۵	He, L.
۶	Joos, G.
۷	Jorda, N.A.F.
۸	Kavasseri, R.
۹	Kumar, R.
۱۰	Liu, C.



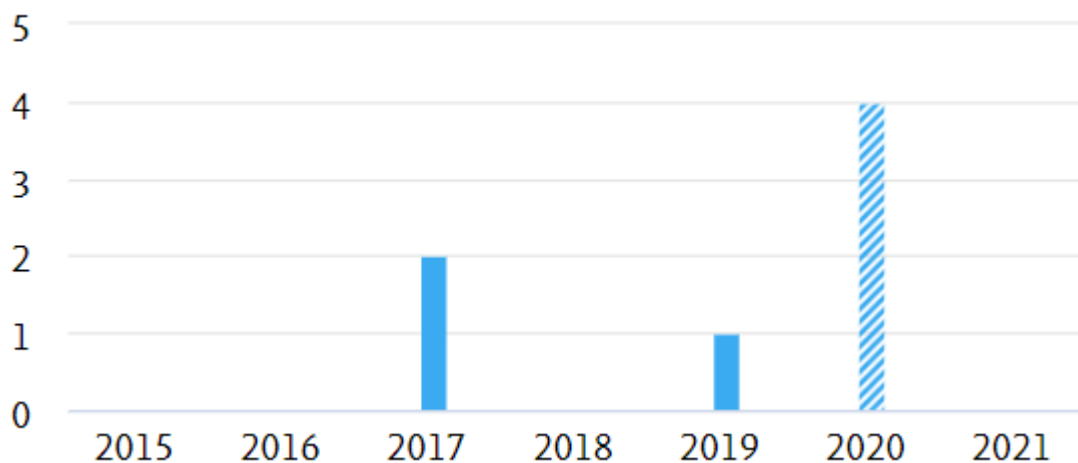
relevance of keyphrase | declining [A A A](#) growing (2015-2019)

شکل ۸۰-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته پنجم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

جدول ۷۵-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	An effective feature extraction method in pattern recognition based high impedance fault detection ,2017, 19th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, ISAP 2017	۸
۲	Fault current tracing and identification via machine learning considering distributed energy resources in distribution networks, 2019, Energies	۳
۳	Unsupervised learning in islanding studies: Applicability study for predictive detection in high solar PV penetration distribution feeders , 2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering, UPCON 2016	۲
۴	Sensibility Analysis of a Fault Location Method Based on ANN, WPT and Decision Tree in Distribution Systems, 2020, Journal of Control, Automation and Electrical Systems	۱
۵	High-speed directional protection without voltage sensors for distribution feeders with distributed generation integration based on the correlation of signals and machine learning, 2020, Electric Power Systems Research	۱
۶	An Intelligent Overcurrent Protection Algorithm of Distribution Systems with Inverter based Distributed Energy Resources, 2020, ECCE 2020 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition	۰

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۷	Reverse Power Flow Detection Using Optimally Placed μ PMUs in a Distribution System, 2020, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST	.



شکل ۸-۸۱: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

❖ دسته ششم:

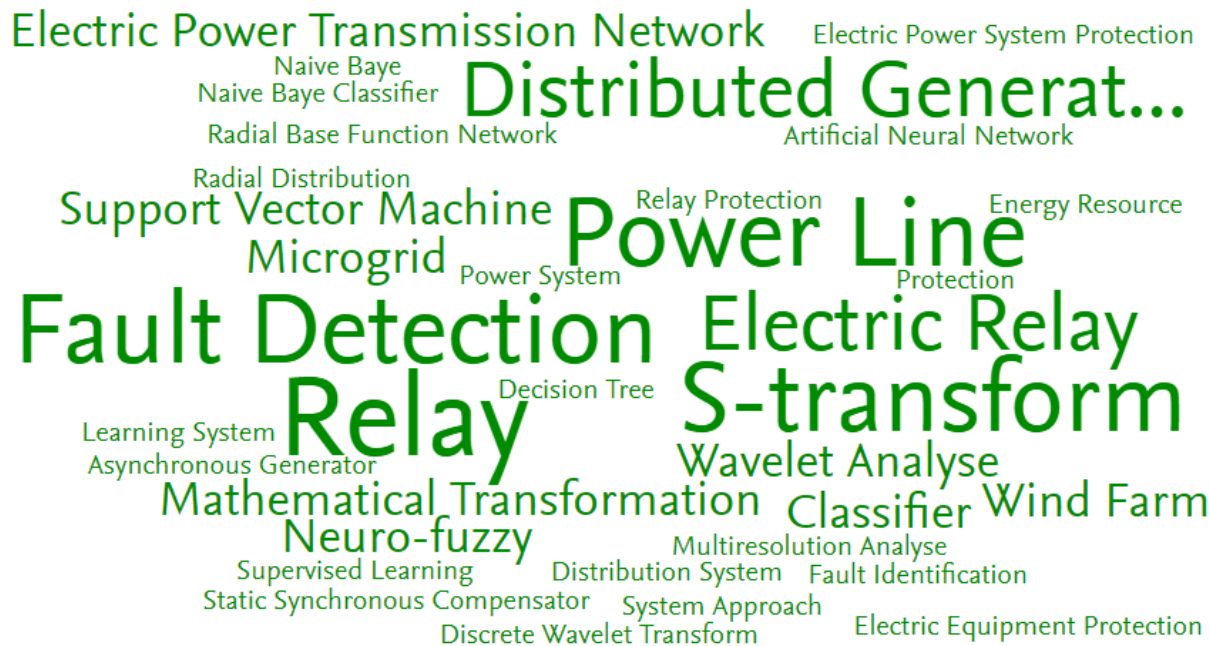
"Machine Learning" AND ("digital relay" OR "Power System Relaying" OR "Relay Coordination" OR "protective relay" OR "distance relay" OR "overcurrent relay" OR "over voltage relay" OR "special protection system" OR "phase control relay" OR "earth fault relay" OR teleprotection OR "overload relay" OR "frequency relay" OR "power swing protection")

جدول ۸-۷۶ مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته را نشان می‌دهد. در شکل ۸-۸۲ کلیدواژه‌های اصلی در دسته ششم نشان داده شده است. پراچاترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۷۷ اشاره شده‌اند. تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۸۳ نشان داده شده است.

جدول ۸-۷۶: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته ششم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Universidade de Sao Paulo - USP
۲	Universiti Putra Malaysia
۳	Université McGill

The George Washington University	۴
Universiti Tenaga Nasional	۵
University of Wollongong	۶
The University of Texas at Austin	۷
Dalhousie University	۸
University of Toronto	۹
Hydro-Quebec	۱۰
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Coury, D.V.
۲	Menezes, T.S.
۳	Othman, M.L.
۴	Aker, E.E.
۵	Al-Roomi, A.R.
۶	Alam, M.R.
۷	Amin, I.K.
۸	Aris, I.
۹	Banerjee, S.
۱۰	Barbalho, P.I.N.

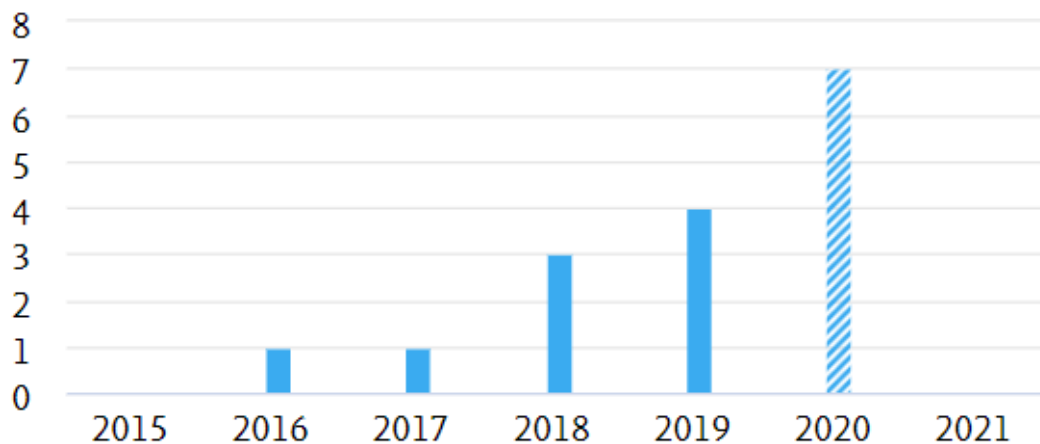


شکل ۸۲-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته ششم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

جدول ۷۷-۸: پراچ‌ترین مراجع در دسته ششم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Evaluating the effectiveness of a machine learning approach based on response time and reliability for islanding detection of distributed generation, 2017, IET Renewable Power Generation	۱۶
۲	High impedance fault detection in radial distribution system using wavelet transform, 2016, 12th IEEE International Conference Electronics, Energy, Environment, Communication, Computer, Control: (E3-C3), INDICON 2015	۶
۳	Ann distance protection for transmission lines, 2019, International Journal of Emerging Trends in Engineering Research	۴
۴	A Novel Hybrid Machine Learning Classifier-Based Digital Differential Protection Scheme for Intertie Zone of Large-Scale Centralized DFIG-Based Wind Farms, 2020, IEEE Transactions on Industry Applications	۲
۵	Islanding detection based on artificial neural network and S-transform for distributed generators, 2019, IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019	۲
۶	Wavelet Transform and Support Vector Machine-Based Current-Only Directional Overcurrent Relay for Transmission Line Protection, 2018, Proceedings of the 2018 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America, T and D-LA 2018	۲
۷	Decision Tree Supported Distance relay for Fault Detection and Classification in a series compensated line, 2020, IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy, PESGRE 2020	۱
۸	A Microgrid Protection Scheme with Conventional Relay Measurements, 2018, IEEE Power and Energy Society General Meeting	۱

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۹	Symmetrical fault detection during power swings: An interpretable supervised learning approach, 2018, IEEE Power and Energy Society General Meeting	۱
۱۰	On the Use of Artificial Intelligence for High Impedance Fault Detection and Electrical Safety, 2020, IEEE Transactions on Industry Applications	۰



شکل ۸-۸۳: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

❖ دسته هفتم:

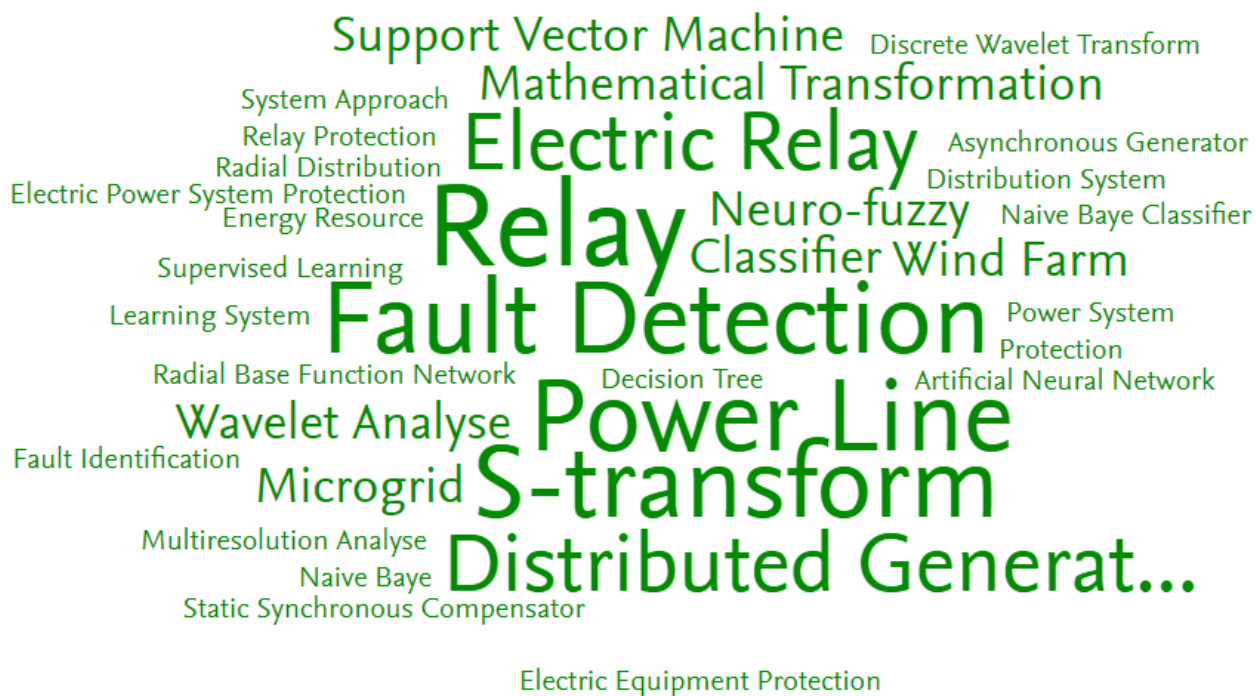
"Machine Learning" AND ("power generation protection" OR "transformer protection" OR "substation protection" OR "generator protection" OR "current transformer protection" OR "potential transformer protection" OR "inrush current protection" OR "loss of field" OR "bus bar protection")

جدول ۸-۷۸ مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در این دسته را نشان می‌دهد. در شکل ۸-۸۴ کلیدواژه اصلی در دسته هفتم نشان داده شده است. پراچاترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۷۹ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۸۵ نشان داده شده است.

جدول ۸-۷۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته هفتم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Indian Institute of Technology, Roorkee
۲	Patel Institute of Technology, Gujarat Technological University
۳	Government Engineering College, India
۴	An-Najah National University

مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Khatib, T
۲	Arar, G.
۳	Raichura, M.B.
۴	Chothani, N.G.
۵	Patel, D.D.
۶	Jena, S.
۷	Bhalja, B.R.

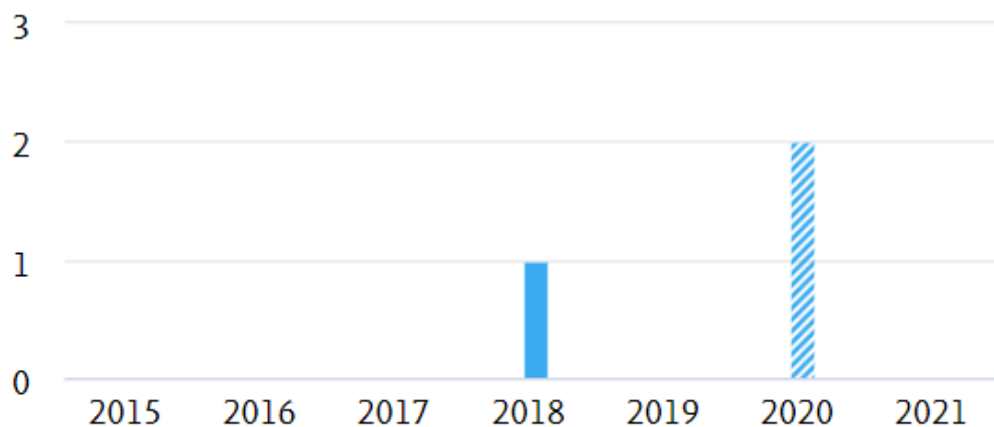


relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۸-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته هفتم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

جدول ۷۹-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته هفتم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Identification of internal fault against external abnormalities in power transformer using hierarchical ensemble extreme learning machine technique, 2020, IET Science, Measurement and Technology	۳
۲	Identification of Power Transformer Currents by Using Random Forest and Boosting Techniques, 2020, Mathematical Problems in Engineering	۰
۳	A new numeric busbar protection scheme using Bayes point machine, 2018, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC	۰



شکل ۸۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم محور حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق

۲-۷-۸- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق"

با توجه به جدول‌ها و شکل‌ها و کلیدواژه‌های استخراج شده، مهم‌ترین کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق" عبارتند از:

- شناسایی خطا و مکان‌یابی آن؛
- حفاظت تطبیقی
- حفاظت ناحیه گسترده
- پیش‌بینی ناپایداری ناشی از خطا
- سیستم حفاظت ویژه

همان‌طور که مشاهده می‌شود کاربردهایی که تاکنون برای یادگیری ماشین در زمینه حفاظت شبکه‌های برق معرفی شده، محدود هستند و عمدتاً از یک جنس و مربوط به پیاده‌سازی روش‌های حفاظتی نوین با توجه به حضور منابع انرژی توزیع شده و ریزشبکه‌ها می‌باشند.

به‌منظور جمع‌بندی مطالعات انجام شده، در جدول ۸-۸۰ کاربردها و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با حوزه مطالعات حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق بر مبنای یادگیری ماشین ارائه شده است.

جدول ۸-۸۰: موضوعات تحقیقاتی در حوزه مطالعات حفاظت و ایمنی شبکه‌های برق بر اساس یادگیری ماشین

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
حفاظت ریزشبکه	• شناسایی خطا مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • دسته‌بندی انواع خطا مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • ارزیابی تأخیر زمانی مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • ارزیابی قابلیت گذر از خطا مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • حفاظت هوشمند منابع تولید توزیع شده مبتنی بر اینورتر مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • حفاظت ریزشبکه‌های ترکیبی AC-DC و شناسایی انواع خطا در این نوع ریزشبکه‌ها • حفاظت ویژه، هوشمند و تطبیقی^۱ ریزشبکه‌ها در حضور منابع انرژی توزیع شده و پاسخگویی بار
حفاظت شبکه انتقال و توزیع	• حفاظت هوشمند ترانسفورماتور مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • حفاظت باسبار مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • حفاظت خطوط HVDC مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • تنظیم پارامترهای رله‌های حفاظتی در حفاظت ناحیه گسترده مبتنی بر سیستم‌های چندعاملی • شناسایی رویدادهای منجر به جزیره‌ای شدن بخش‌هایی از شبکه برق مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین • شناسایی جزیره‌های پدیدآمده در شبکه برق ناشی از خطا با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌های فازوری • شناسایی انواع خطا مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین • دسته‌بندی خطاها مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین • مکان‌یابی انواع خطاها در شبکه توزیع و انتقال مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین • فرایند بازیابی سیستم قدرت و مراحل توالی اتصال مجدد تجهیزات به شبکه برق

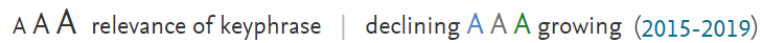
^۱ Adaptive protection

• حفاظت هوشمند منابع تولید توزیع شده مبتنی بر اینورتر با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی • تنظیم هماهنگ و همکارانه رله‌های حفاظتی با استفاده از روش‌های هوشمند یادگیری ماشین	
• حفاظت خروج از همگامی^۱ ژنراتور (تشخیص رخداد) • حفاظت تحریک ژنراتور • حفاظت اضافه جریان ناشی از اتصال کوتاه • حفاظت اضافه/افت ولتاژ • حفاظت هوشمند مزارع بادی و خورشیدی مقیاس بزرگ مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین	حفاظت سمت تولید

۸-۸- متن کاوی در حوزه "مطالعات ریزشبکه"

۸-۸-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "مطالعات ریزشبکه"

گسترش و فراوانی مستندات علمی پیرامون ریزشبکه‌ها در سیستم‌های قدرت، شاهی بر اهمیت مطالعات این محور است. در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بیش از ۲۰۰۰۰ مستندات علمی (با محدود نمودن نتایج جستجوها در حوزه‌های Engineering, Computer Science و Energy) پیرامون ریزشبکه‌ها انتشار یافته است که بیان‌گر توجه بالای پژوهشگران به این حوزه است. حوزه‌ها و موضوعات متنوعی در ارتباط با ریزشبکه‌ها وجود دارد؛ بنابراین، زمانی که پیرامون ریزشبکه‌ها صحبت می‌شود، ممکن است هر یک از این حوزه‌ها و موضوعات مورد نظر باشد. جهت بسترسازی برای پرداختن به بررسی کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در مطالعات ریزشبکه، مهم‌ترین مفاهیم مرتبط به ریز شبکه در شکل ۸-۸۶ و جدول ۸-۸۱ آمده است:



جدول ۸-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با ریزشبکه در سیستم‌های قدرت

موضوع	ردیف	موضوع	ردیف	موضوع	ردیف
Model Predictive Control	۱۳	Energy Resource	۷	Energy Management	۱
Converter	۱۴	Demand Response	۸	Energy Storage	۲
Power Quality	۱۵	Synchronous Generator	۹	Distributed Power Generation	۳
Electric Inverter	۱۶	Renewable Energy Source	۱۰	Direct Current	۴
Demand Side Management	۱۷	Frequency Control	۱۱	Electric Vehicle	۵
Reinforcement Learning	۱۸	Alternating Current	۱۲	Smart Grid	۶

۳۳۵

Microgrid OR Micro-grid OR Micro grid

دقت شود، نتایج برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و در حوزه Energy, Engineering و Computer Science محدود شده است. با توجه به محدودیت‌های سایول، نتایج جستجو برای ۲۰۰۰ مستند اخیر تحلیل و حاصل شده است. برای نمونه، ۱۰ مستند علمی برتر در زمینه ریزشبکه (در سال ۲۰۲۰) که بیشترین استاندارد را داشته‌اند، در جدول ۸-۸۲ نشان داده است.

جدول ۸-۸۲: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه ریزشبکه

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region, 2020, International Journal of Hydrogen Energy	۳۸
۲	Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems, 2020, Protection and Control of Modern Power Systems	۳۵
۳	DEAL: Differentially Private Auction for Blockchain-Based Microgrids Energy Trading, 2020, IEEE Transactions on Services Computing	۲۶
۴	Distributed Voltage Restoration and Current Sharing Control in Islanded DC Microgrid Systems without Continuous Communication, 2020, IEEE Transactions on Industrial Electronics	۲۱
۵	A new isolated renewable based multi microgrid optimal energy management system considering uncertainty and demand response, 2020, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۲۰
۶	An integrated blockchain-based energy management platform with bilateral trading for microgrid communities, 2020, Applied Energy	۱۷
۷	The effect of complementarity between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids, 2020, Renewable Energy	۱۶
۸	Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty, 2020, Journal of Energy Storage	۱۶
۹	Energy scheduling of a smart microgrid with shared photovoltaic panels and storage: The case of the Ballen marina in Samsø, 2020, Energy	۱۶
۱۰	Intelligent Multi-Microgrid Energy Management Based on Deep Neural Network and Model-Free Reinforcement Learning, 2020, IEEE Transactions on Smart Grid	۱۵

مطابق نتایج متن‌کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شده، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین مستندات دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

- ❖ J. M. Guerrero;
- ❖ J. C. Vasquez;
- ❖ F. Blaabjerg;
- ❖ B. Singh;
- ❖ G. B. Gharepetian;
- ❖ P. Wang;
- ❖ S. Mishra;
- ❖ N. Javaid;
- ❖ M. Shahidehpour;
- ❖ H. M. Kim.

همچنین، مؤسسات زیر بیش‌ترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

- Aalborg University;
- Ministry of Education China;
- North China Electric Power University;
- Tsinghua University;
- Nanyang Technological University;
- Tianjin University;
- Xi'an Jiaotong University;
- Shanghai Jiao Tong University;
- China Electric Power Research Institute;
- Indian Institute of Technology Dehli.

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

- چین؛
- آمریکا؛
- هند؛
- ایران؛
- ایتالیا؛
- استرالیا؛
- کانادا؛
- انگلیس؛
- دانمارک؛
- آلمان.

طبق رویه انتخاب شده جهت متن‌کاوی متون علمی و استخراج روند مطالعات انجام شده پیرامون مطالعات ریز شبکه، در ابتدا بایستی واژگان کلیدی مورد نظر جهت انجام متن‌کاوی انتخاب و معرفی شود.

طبیعی است با تغییر واژگان کلیدی نتایج ارائه شده نیز متفاوت خواهد بود، اما سعی شده که واژگان کلیدی انتخابی علاوه بر اینکه در مستندات علمی شناخته شده باشند، تا حد امکان با زیرمجموعه‌های تخصصی محور مورد نظر نیز متناظر و مرتبط بوده باشند. واژگان کلیدی انتخابی برای محور مطالعات ریزشبکه در نه دسته به صورت زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid);
- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Operation OR Scheduling OR Management OR Coordination OR (Power Flow) OR (Economic Dispatch) OR (Demand Response) OR Islanding OR Stand-alone);
- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND Smart;
- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Planning OR Energy Efficiency);
- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Security OR Self-Healing OR Reliability OR Protection OR Monitoring OR Control OR Stability OR Resiliency OR Flexibility OR Power Quality);
- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Market OR (Energy Trading));
- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Metering OR Measurement OR Communication OR IoT);
- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Generation OR Renewable OR Storage OR (Hybrid Electric Vehicles));
- ✓ (Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Forecasting OR Prediction OR Optimization OR Optimisation).

در ادامه به ارائه نتایج به‌دست آمده با استفاده از ابزار علم‌سنجی SciVal و به کمک متن‌کاوی انجام شده به‌وسیله نمایه استاندارد Scopus برای واژگان و عبارات کلیدی انتخابی می‌پردازیم. شایان ذکر است مقیاس زمانی مورد مطالعه در این تحقیق بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بوده است.

یادآور می‌شود که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه"های مستندات علمی موجود انجام شده است.

۸-۸-۲- نتایج حاصل از متن‌کاوی در حوزه محور پژوهشی مطالعات ریزشبکه

در این قسمت نتایج حاصل از متن‌کاوی در حوزه محور پژوهشی مطالعات ریزشبکه به تفکیک کلیدواژه‌های انتخابی ارائه می‌شوند.

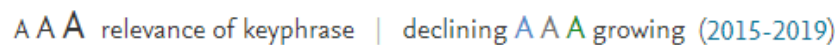
❖ دسته اول: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid)

با محدود نمودن مطالعات حوزه ریزشبکه در زمینه Machine learning، تعداد ۲۴۷ مستند (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. در جدول ۸-۸۳، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل ۸-۸۷ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۸۴ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در شکل ۸-۸۸ نشان داده شده است.

جدول ۸-۸۳: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول در حوزه مطالعات ریزشبکه

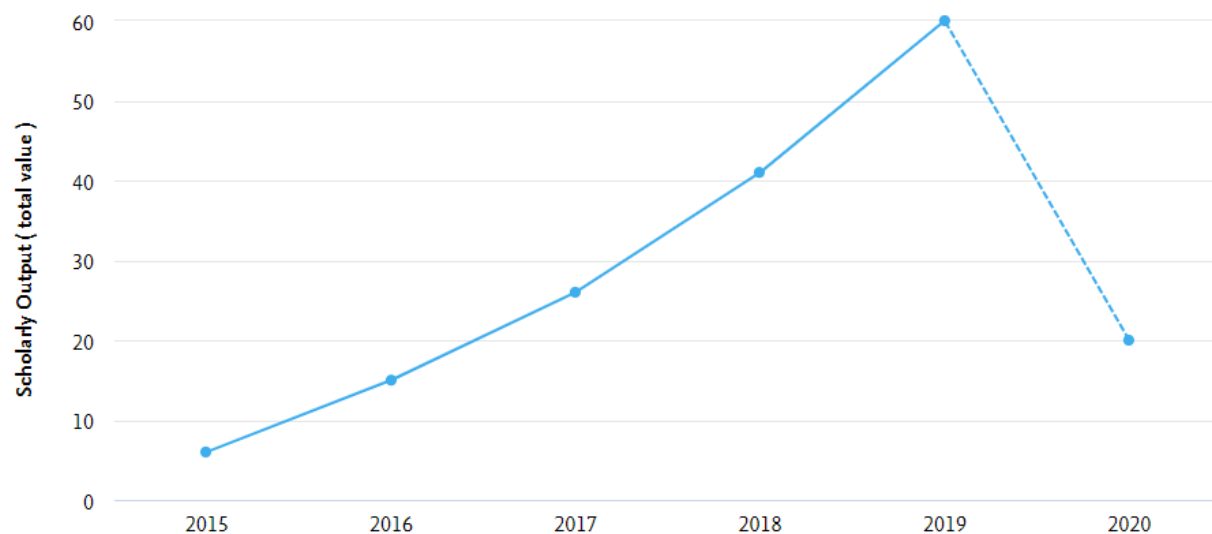
مؤسسات برتر	
نام مؤسسه	ردیف
Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University	۱
Aalborg University	۲
University of Ottawa	۳
Yanshan University	۴
KU Leuven	۵
Ministry of Education, China	۶
Nanjing University of Posts and Telecommunications	۷
Tsinghua University	۸
The University of Sydney	۹
Northeastern University China	۱۰
مؤلفان برتر	
مؤلف	ردیف
Manohar Mishra, Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University	۱
Burak Kantarci, University of Ottawa	۲
Jonathan Currie, Rocket Lab, Auckland, New Zealand	۳
Tek Tjing Lie, Auckland University of Technology	۴
Pravat Kumar Rout, Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University	۵
Geert Deconinck, KU Leuven	۶
Snehamoy Dhar, Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University	۷
Chunxia Dou, Nanjing University of Posts and Telecommunications	۸
Melike Erol-Kantarci, University of Ottawa	۹
M. A. Karim, Lines Company, New Zealand	۱۰



جدول ۸۴-۸: پیرارجاعترین مراجع در دسته اول در حوزه مطالعات ریزش شبکه

۳۴۰

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۷	Comparative analysis of data-driven methods online and offline trained to the forecasting of grid-connected photovoltaic plant production, 2017, Applied Energy	۳۹
۸	Adaptively supervised and intrusion-aware data aggregation for wireless sensor clusters in critical infrastructures, 2018, IEEE International Conference on Communications	۳۸
۹	Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting, 2019, Energy	۳۶
۱۰	An ensemble prediction intervals approach for short-term PV power forecasting, 2017, Solar Energy	۳۵



Metric details

x-axis: Publication Year

y-axis: Scholarly Output

Types of publications included: all.

--- incomplete year

شکل ۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در حوزه مطالعات ریزشبکه

❖ دسته دوم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Operation OR Scheduling OR Management OR Coordination OR (Power Flow) OR (Economic Dispatch) OR (Demand Response) OR Islanding OR Stand-alone)

Electric Power Plant Load

Model Predictive Control

Edge Computing

Power Generation

Storage System

Time Series Analyse

Dynamic Programming

Long Short-term Memory

Benchmarking

Prediction Interval

Solar Energy

Forecasting

Rockburst

Protection Residential

Support Vector Machine

Electricity Demand

Charging

Adaptive Dynamic

Decision Tree

Multiagent Learning

Data Science

Reinforcement Learning

Energy System

Electric Vehicle

Vehicle-to-grid

Scheduling

Distributed Generation

Smart Grid

Fuzzy Logic

Machine Learning

Extreme Learning Machine

Energy Management System

Energy Management System

Multi-agent System

Deep Learning

Photovoltaic System

Demand Response

Direct Current

Short-term Load Forecasting

Frequency Control

Power Management

Electric Power System Control

Load Forecasting

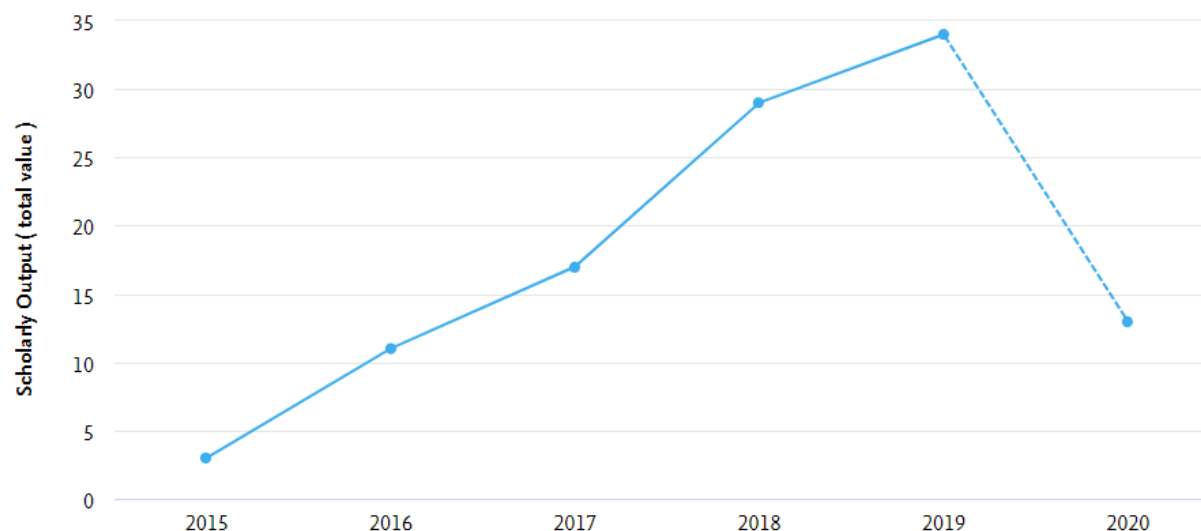
Ensemble Learning

Spodopterum Frugiperdum

جدول ۸-۸: پراچای ترین مراجع در دسته دوم در حوزه مطالعات ریزش بکه

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles, 2017, Electric Power Systems Research	۹۸
۲	A robust adaptive load frequency control for micro-grids, 2016, ISA Transactions	۸۰
۳	Detection and classification of micro-grid faults based on HHT and machine learning techniques, 2018, IET Generation, Transmission and Distribution	۵۸
۴	Comparison of Photovoltaic plant power production prediction methods using a large measured dataset, 2016, Renewable Energy	۴۶
۵	Intelligent load frequency controller using GrADP for island smart grid with electric vehicles and renewable resources, 2015, Neurocomputing	۴۱

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۶	Solar photovoltaic power forecasting using optimized modified extreme learning machine technique, 2018, Engineering Science and Technology, an International Journal	۴۰
۷	Comparative analysis of data-driven methods online and offline trained to the forecasting of grid-connected photovoltaic plant production, 2017, Applied Energy	۳۹
۸	Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting, 2019, Energy	۳۶
۹	An ensemble prediction intervals approach for short-term PV power forecasting, 2017, Solar Energy	۳۵
۱۰	Laboratory Education of Modern Power Systems Using PHIL Simulation, 2017, IEEE Transactions on Power Systems	۳۰



Metric details

x-axis: Publication Year
y-axis: Scholarly Output
Types of publications included: all.

--- incomplete year

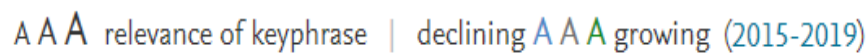
شکل ۹۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم در حوزه مطالعات ریزشبکه

❖ دسته سوم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND Smart

در شکل ۹۱-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته سوم نشان داده شده است. پراچاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸۶-۸

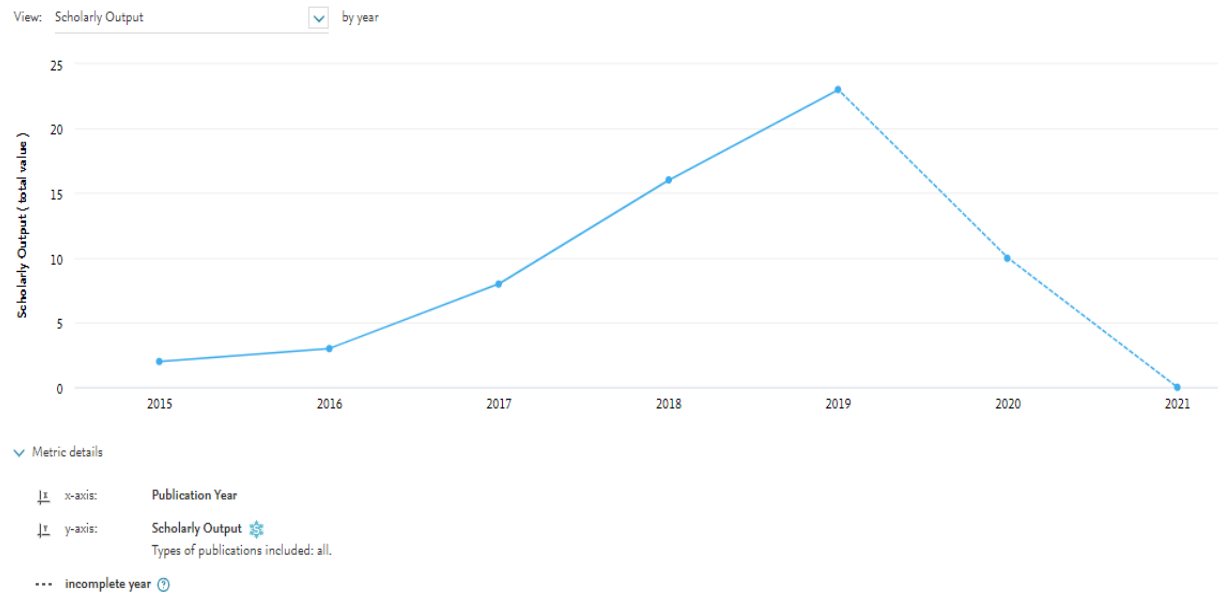
اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۹۲-۸ نشان داده شده است.



جدول ۸۶-۸: پراچایع ترین مراجع در دسته سوم در حوزه مطالعات ریزشبکه

ሥራ

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۳	Solar photovoltaic power forecasting using optimized modified extreme learning machine technique, 2018, Engineering Science and Technology, an International Journal	۴۰
۴	Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting, 2019, Energy	۳۶
۵	An ensemble prediction intervals approach for short-term PV power forecasting, 2017, Solar Energy	۳۵
۶	Real-time energy management of a microgrid using deep reinforcement learning, 2019, Energies	۲۳
۷	Power quality disturbance detection and classification using signal processing and soft computing techniques: A comprehensive review, 2019, International Transactions on Electrical Energy Systems	۲۲
۸	Adaptive protection combined with machine learning for microgrids, 2019, IET Generation, Transmission and Distribution	۲۱
۹	Advanced methods for photovoltaic output power forecasting: A review, 2020, Applied Sciences (Switzerland)	۱۳
۱۰	Machine learning based integrated feature selection approach for improved electricity demand forecasting in decentralized energy systems, 2019, IEEE Access	۱۰

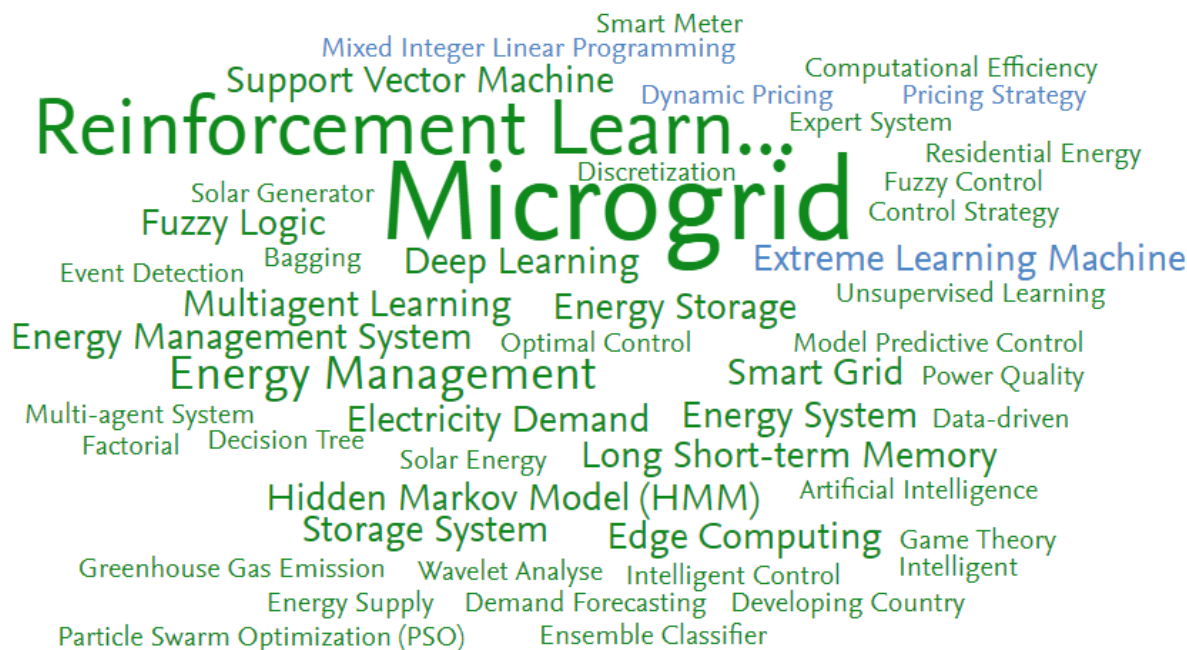


شکل ۹۲-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم در حوزه مطالعات ریز شبکه

❖ دسته چهارم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Planning OR Energy Efficiency)

در شکل ۹۳-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸۷-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۹۴-۸ نشان داده شده است.



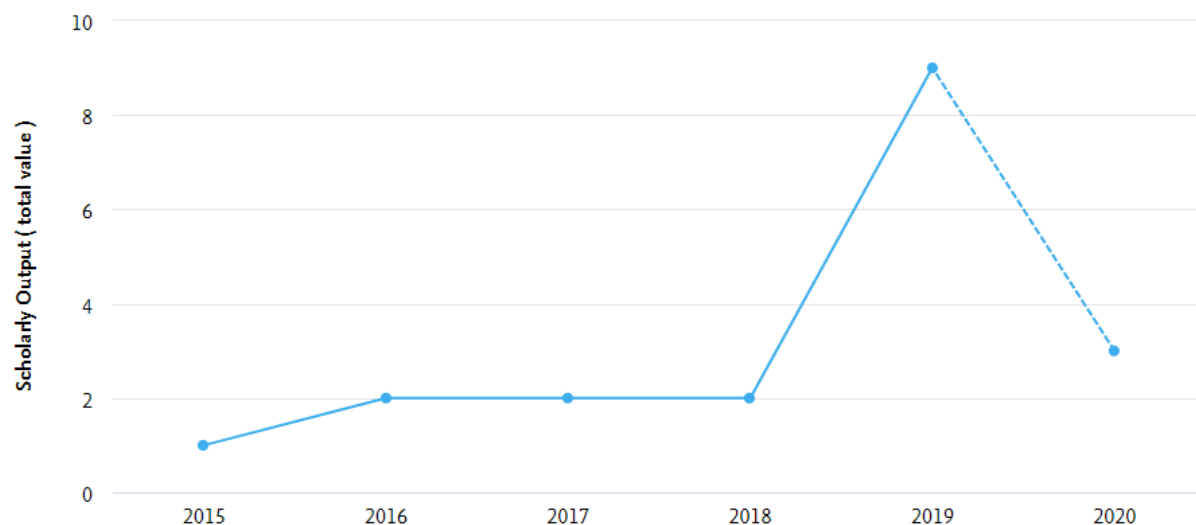
relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۹۳-۸: کلیدی برتر در دسته چهارم در حوزه مطالعات ریزشبکه

جدول ۸۷-۸: پراچای ترین مراجع در دسته چهارم در حوزه مطالعات ریزشبکه

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles, 2017, Electric Power Systems Research	۹۸
۲	A knowledge discovery in databases approach for industrial microgrid planning, 2016, Renewable and Sustainable Energy Reviews	۱۸
۳	A Coordinated Control Method for Hybrid Energy Storage System in Microgrid Based on Deep Reinforcement Learning, 2019, Dianwang Jishu/Power System Technology	۱۲
۴	Machine learning based integrated feature selection approach for improved electricity demand forecasting in decentralized energy systems, 2019, IEEE Access	۱۰
۵	Deep learning models for long-term solar radiation forecasting considering microgrid installation: A comparative study, 2019, Energies	۹

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۶	When Edge Computing Meets Microgrid: A Deep Reinforcement Learning Approach, 2019, IEEE Internet of Things Journal	۹
۷	Optimal scheduling of multiple multi-energy supply microgrids considering future prediction impacts based on model predictive control, 2020, Energy	۶
۸	Energy management with the support of dynamic pricing strategies in real micro-grid scenarios, 2015, Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks	۶
۹	Solar Power Prediction for Smart Community Microgrid, 2016, 2016 IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2016	۶
۱۰	Approach to Non-Intrusive Load Monitoring using Factorial Hidden Markov Model, 2018, 2018 13th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2018 - Proceedings	۵



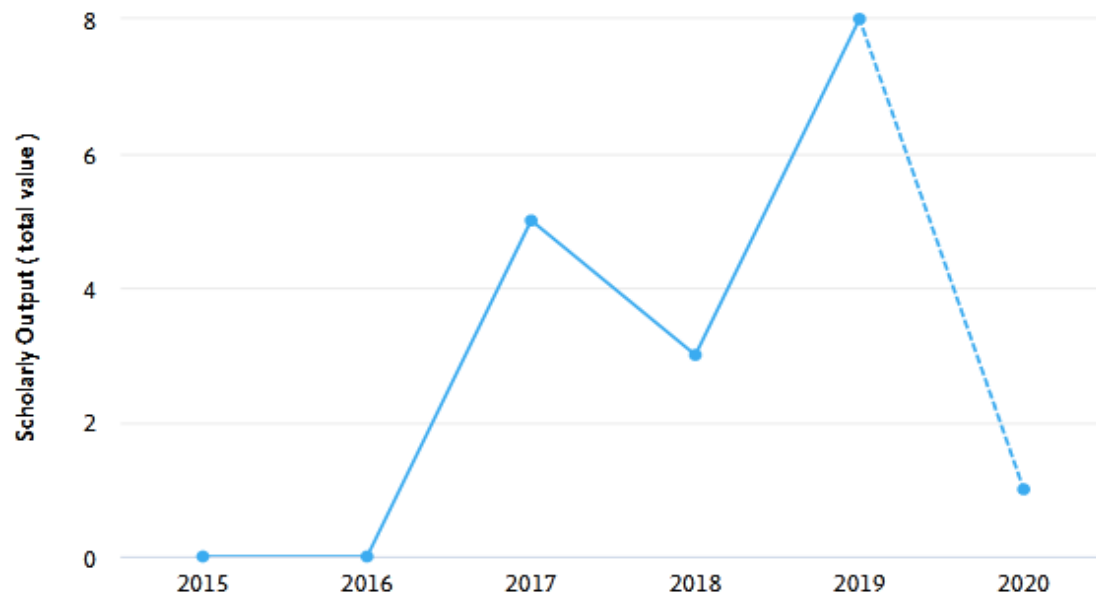
✓ Metric details

x-axis: Publication Year
 y-axis: Scholarly Output
 Types of publications included: all.

--- incomplete year

شکل ۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم در حوزه مطالعات ریزشبکه

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
	comprehensive review, 2019, International Transactions on Electrical Energy Systems	
۴	Situational Awareness in Distribution Grid Using Micro-PMU Data: A Machine Learning Approach, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۱۲
۵	An optimized prediction intervals approach for short term PV power forecasting, 2017, Energies	۱۱
۶	Machine learning based integrated feature selection approach for improved electricity demand forecasting in decentralized energy systems, 2019, IEEE Access	۱۰
۷	Support Vector Machine-Based Islanding and Grid Fault Detection in Active Distribution Networks, 2020, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics	۵
۸	An evolutionary online sequential extreme learning machine for maximum power point tracking and control in multi-photovoltaic microgrid system, 2017, Renewable Energy Focus	۵
۹	Support vector machine and Gaussian process regression based modeling for photovoltaic power prediction, 2019, Proceedings - 2018 International Conference on Frontiers of Information Technology	۴
۱۰	Microgrid data aggregation and wireless transfer scheduling in the presence of time sensitive events, 2018, MobiWac 2018 - Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access	۲



Metric details

x-axis: Publication Year

y-axis: Scholarly Output

Types of publications included: all.

--- incomplete year

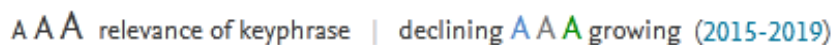
شکل ۹۶-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم در حوزه مطالعات ریز شبکه

❖ دسته ششم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Market OR (Energy Trading))

در شکل ۹۷-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته ششم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸۹-۸

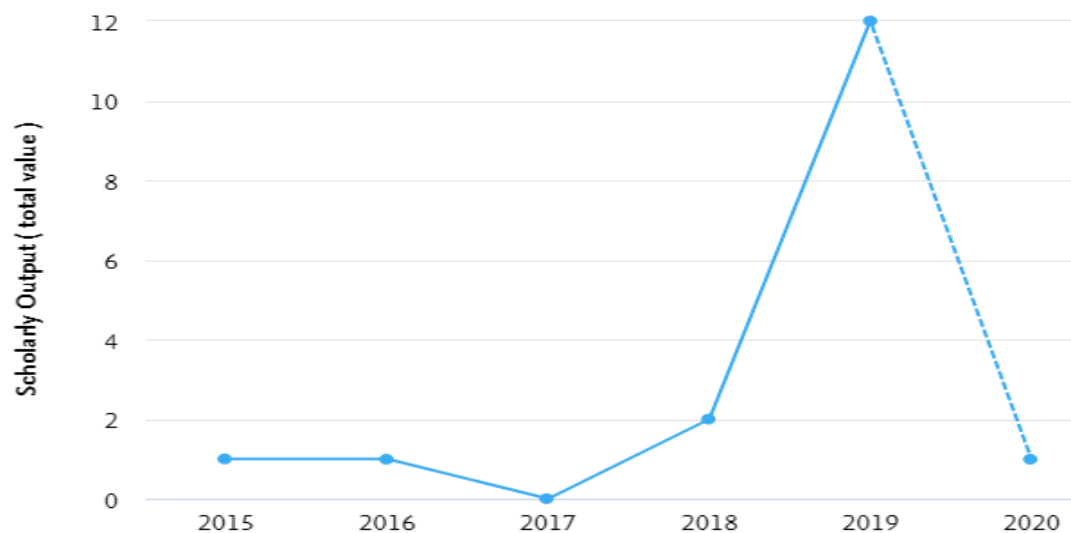
اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۹۸-۸ نشان داده شده است.



جدول ۸۹-۸: پیرارجاعترین مراجع در دسته ششم در حوزه مطالعات ریز شبکه

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	An Agent-Based Hierarchical Bargaining Framework for Power Management of Multiple Cooperative Microgrids, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۲۸
۲	Machine learning based integrated feature selection approach for improved electricity demand forecasting in decentralized energy systems, 2019, IEEE Access	۱۰
۳	Energy management with the support of dynamic pricing strategies in real micro-grid scenarios, 2015, Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks	۶
۴	Reinforcement Learning-Based Microgrid Energy Trading With a Reduced Power Plant Schedule, 2019, IEEE Internet of Things Journal	۶
۵	A novel application of machine learning techniques for activity-based load disaggregation in rural off-grid, isolated solar systems, 2016, GHTC 2016 - IEEE Global Humanitarian	۵

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
	Technology Conference: Technology for the Benefit of Humanity, Conference Proceedings	
۶	Synchronization Games in P2P Energy Trading, 2018, 2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, SmartGridComm	۴
۷	Support vector machine and Gaussian process regression based modeling for photovoltaic power prediction, 2019, Proceedings - 2018 International Conference on Frontiers of Information Technology	۴
۸	Reinforcement learning control approach for autonomous microgrids, 2019, International Journal of Modelling and Simulation	۳
۹	Near-Optimal Day-Ahead Scheduling of Energy Storage System in Grid-Connected Microgrid, 2018, International Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia	۳
۱۰	Multi-agent reinforcement learning approach for residential microgrid energy scheduling, 2019, Energies	۳



Metric details

x-axis: Publication Year

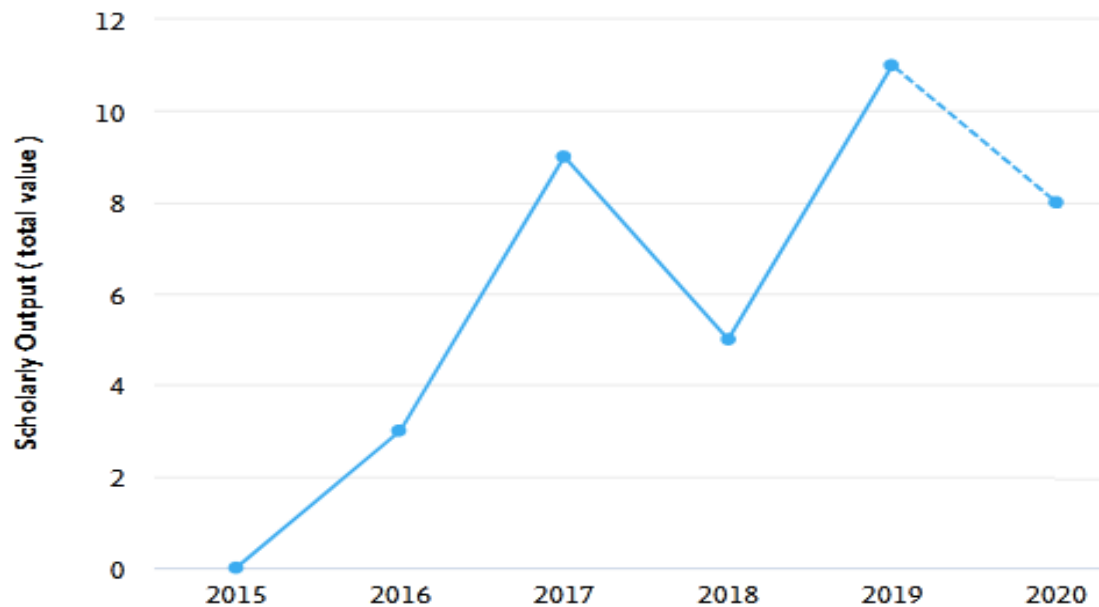
y-axis: Scholarly Output

Types of publications included: all.

--- incomplete year

شکل ۹۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم در حوزه مطالعات ریزشبکه

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۴	Situational Awareness in Distribution Grid Using Micro-PMU Data: A Machine Learning Approach, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۱۲
۵	When Edge Computing Meets Microgrid: A Deep Reinforcement Learning Approach, 2019, IEEE Internet of Things Journal	۹
۶	Microgrid-level energy management approach based on short-term forecasting of wind speed and solar irradiance, 2019, Energies	۸
۷	Deep adaptive dynamic programming based integration algorithm for generation control and optimization of islanded active distribution network, 2018, Kongzhi Lilun Yu Yingyong/Control Theory and Applications	۸
۸	Smart Sensing of Loads in an Extra Low Voltage DC Pico-Grid Using Machine Learning Techniques, 2017, IEEE Sensors Journal	۸
۹	The UAB Informatics Institute and 2016 CEGS N-GRID de-identification shared task challenge, 2017, Journal of Biomedical Informatics	۷
۱۰	A learning scheme for microgrid reconnection, 2018, IEEE Transactions on Power Systems	۶



Metric details

x-axis: Publication Year
 y-axis: Scholarly Output
 Types of publications included: all.

--- incomplete year

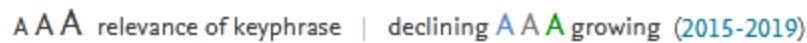
شکل ۸-۱۰۰: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم در حوزه مطالعات ریزشبکه

❖ دسته هشتم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Generation OR Renewable OR Storage OR (Hybrid Electric Vehicles))

در شکل ۸-۱۰۱ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هشتم نشان داده شده است. پراچاترین مراجع در این دسته نیز در جدول (۹۱-۱)

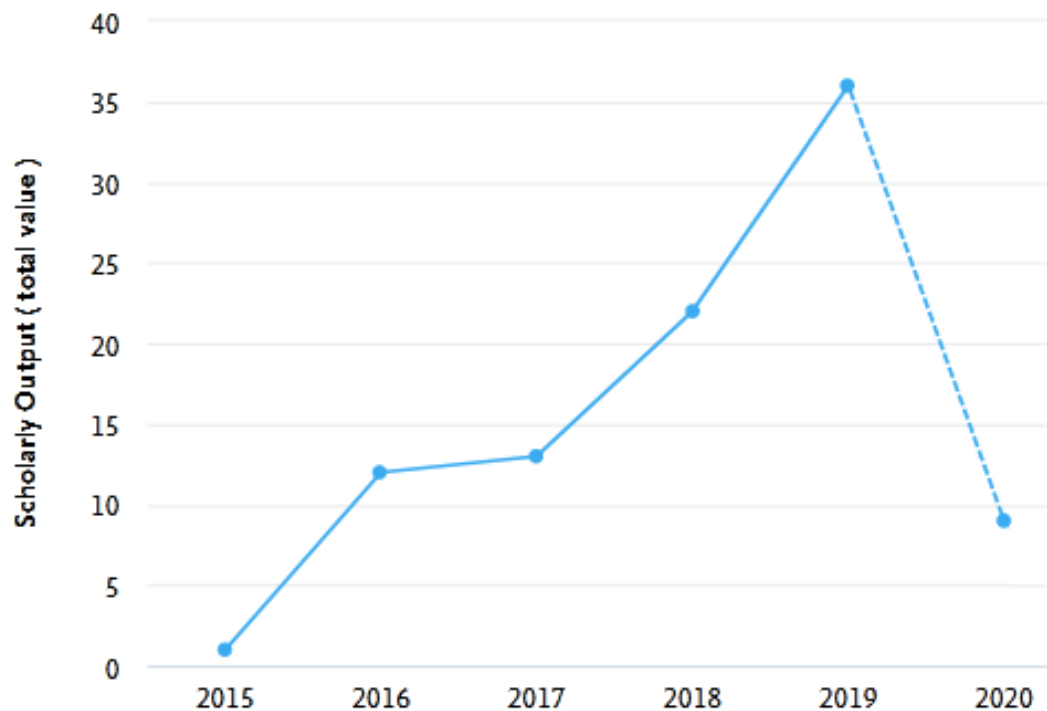
اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۱۰۲ نشان داده شده است.



جدول ۹۱-۸: پیراجاع‌ترین مراجع در دسته هشتم در حوزه مطالعات ریزشبکه

३५४

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۷	Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting, 2019, Energy	۳۶
۸	An ensemble prediction intervals approach for short-term PV power forecasting, 2017, Solar Energy	۳۵
۹	Laboratory Education of Modern Power Systems Using PHIL Simulation, 2017, IEEE Transactions on Power Systems	۳۰
۱۰	Faster Detection of Microgrid Islanding Events Using an Adaptive Ensemble Classifier, 2018, IEEE Transactions on Smart Grid	۲۸



✓ Metric details

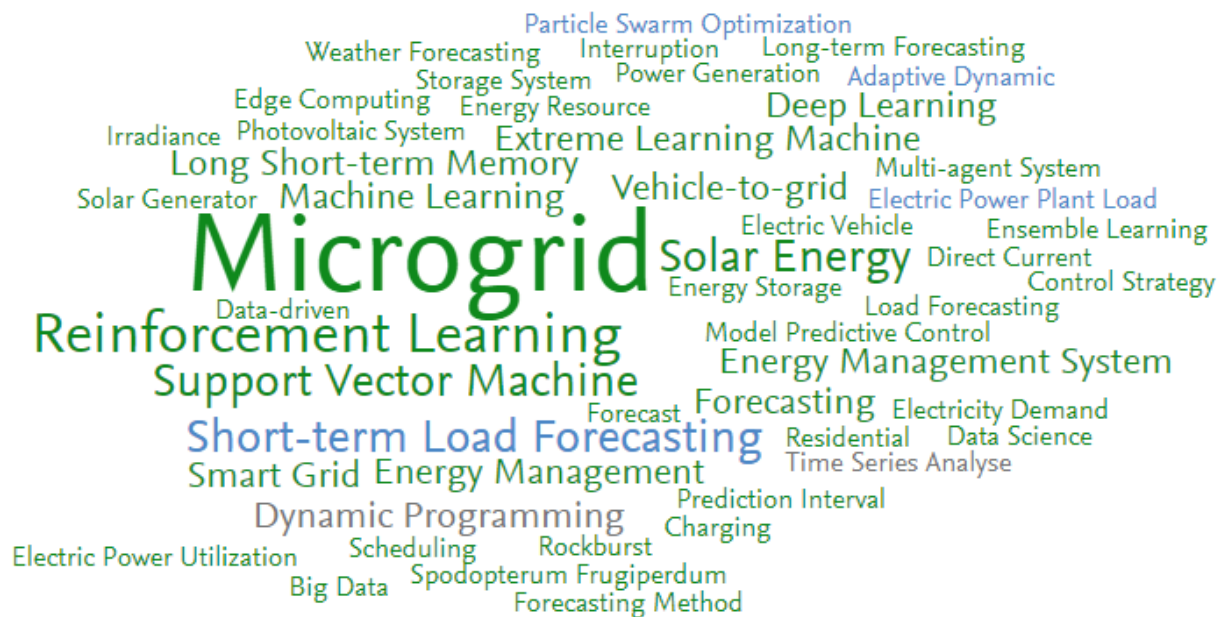
x-axis: Publication Year
 y-axis: Scholarly Output
 Types of publications included: all.
 --- incomplete year

شکل ۲+۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هشتم در حوزه مطالعات ریزشبکه

❖ دسته نهم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

(Machine Learning) AND (Microgrid OR Micro Grid OR Micro-Grid) AND (Forecasting OR Prediction OR Optimization OR Optimisation)

در شکل ۸-۱۰۳ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته نهم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۹۲ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۱۰۴ نشان داده شده است.



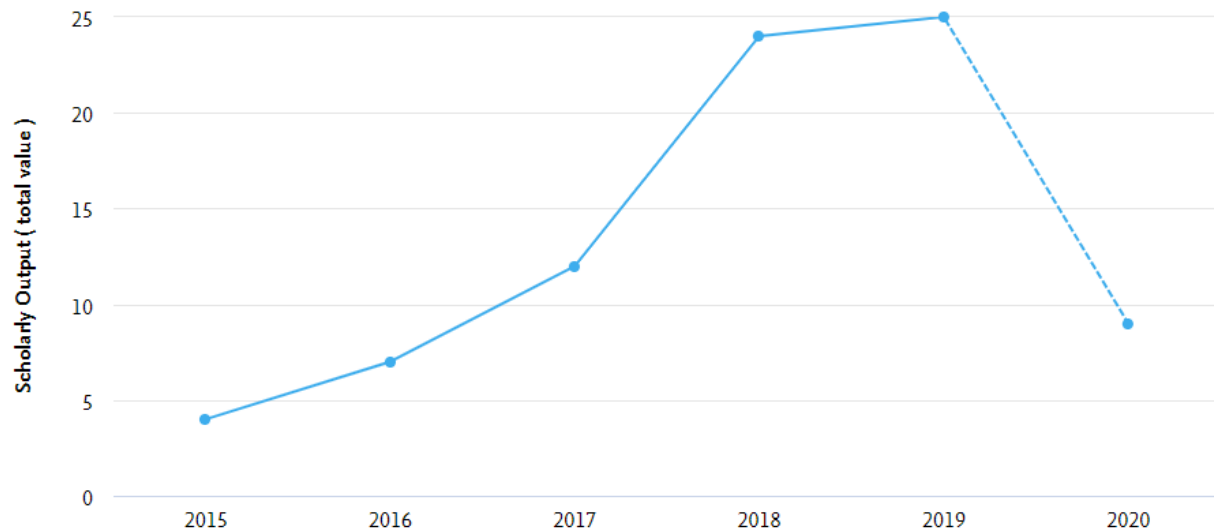
AA A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۸-۱۰۳: عبارت کلیدی برتر در دسته نهم در حوزه مطالعات ریزشبکه

جدول ۸-۹۲: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته نهم در حوزه مطالعات ریزشبکه

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles, 2017, Electric Power Systems Research	۹۸
۲	Comparison of Photovoltaic plant power production prediction methods using a large measured dataset, 2016, Renewable Energy	۴۶
۳	Intelligent load frequency controller using GrADP for island smart grid with electric vehicles and renewable resources, 2015, Neurocomputing	۴۱

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۴	Solar photovoltaic power forecasting using optimized modified extreme learning machine technique, 2018, Engineering Science and Technology, an International Journal	۴۰
۵	Comparative analysis of data-driven methods online and offline trained to the forecasting of grid-connected photovoltaic plant production, 2017, Applied Energy	۳۹
۶	Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting, 2019, Energy	۳۶
۷	An ensemble prediction intervals approach for short-term PV power forecasting, 2017, Solar Energy	۳۵
۸	An Agent-Based Hierarchical Bargaining Framework for Power Management of Multiple Cooperative Microgrids, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۲۸
۹	Online short-term load forecasting based on ELM with kernel algorithm in micro-grid environment, 2015, Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society	۲۷
۱۰	Combined forecasting of photovoltaic power generation in microgrid based on the improved BP-SVM-ELM and SOM-LSF with particlization, 2016, Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering	۲۲



Metric details

x-axis: Publication Year

y-axis: Scholarly Output

Types of publications included: all.

--- incomplete year

شکل ۸-۱۰۴: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته نهم در حوزه مطالعات ریزشبکه

در ادامه، با بررسی متن‌کاوی صورت‌پذیرفته توسط پایگاه داده اسکاپوس و ابزار سایول و بر مبنای مطالعه برخی از مهم‌ترین مستندات منتشرشده در حوزه مطالعات ریزشبکه، این گزارش به دنبال شناخت برخی کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه مذکور خواهد بود.

۸-۸-۳- کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات ریزشبکه"

- پایش و شناسایی وضعیت^۱ شبکه؛
- پیش‌بینی؛
- مدیریت سیستم (بهینه‌سازی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشبکه)؛
- کنترل و حفاظت؛
- بازار برق، تبادلات انرژی و چارچوب تعاملی بین نهادهای مختلف؛
- داده‌کاوی.

^۱Situational Awareness

۴-۸-۸- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات ریزشبکه"

برخی از موضوعات تحقیقاتی که انتظار می‌رود در زمینه کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه محور پژوهشی "مطالعات ریزشبکه" قابل انجام بوده و مفید باشد در جدول ۹۳-۸ بیان شده است.

جدول ۹۳-۸: موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی مطالعات زیر شبکه

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
پایش و شناسایی وضعیت ^۱ شبکه	❖ تخمین حالت و تشخیص و تعیین داده‌های اندازه‌گیری نادرست^۲ و حذف آنها به منظور بهبود رؤیت‌پذیری ❖ پایش شبکه توزیع فشار ضعیف متشکل از چندین ریزشبکه مجهز به کنتورهای هوشمند و واحدهای اندازه‌گیری فازوری میکرو^۳ ❖ تخصیص یا مکان‌یابی بهینه μ-PMU ها، دستگاه‌های الکترونیکی هوشمند^۴ و کنتورهای هوشمند^۵ در ریزشبکه‌های در تعامل با یکدیگر به منظور پایش زمان – واقعی شرایط بهره‌برداری (بار/تولید) مجموعه آن‌ها ❖ پایش کیفیت توان (هارمونیکی) و شناسایی و دسته‌بندی رخدادهای و اغتشاشات موثر بر کیفیت توان ریزشبکه‌ها ❖ تعیین پارامترهای مدل بار و تولید و سنجش اعتبار آن‌ها ❖ تشخیص داده‌های نادرست^۶ در مواجهه با حملات سایبری ❖ تشخیص به‌هنگام نوع و دامنه حمله مهاجم به دستگاه‌های اندازه‌گیری یا ارتباطات مخابراتی (شرایط غیرعادی)^۷ و هرگونه دستکاری عمدی ❖ مدلسازی مکانیزم‌های حمله و طراحی دفاع مقاوم به منظور کاهش تأثیرات آن بر ریزشبکه ❖ پایش سلامت تجهیزات ریزشبکه و تشخیص عملکرد نامناسب (خرابی)^۸ آن‌ها ❖ تجزیه بار مبتنی بر رفتار بار ریزشبکه‌ها^۹ ❖ تحلیل امنیت سایبری-فیزیکی^{۱۰} ریزشبکه‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین ❖ جمع‌حساس به تاخیر^{۱۱} داده‌های ریزشبکه‌ها ❖ ارتباطات با تاخیر کم^{۱۲} در شبکه ریزشبکه‌ها با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین
پیش‌بینی	• پیش‌بینی کوتاه‌مدت و بلندمدت انواع بار به کمک شناسایی مشخصه‌های تأثیرگذار^{۱۳} • پیش‌بینی وضع هوا جهت استخراج الگوی بار و تولیدات منابع انرژی تجدیدپذیر • تخمین و پیش‌بینی طول عمر تجهیزات ریزشبکه نظیر واحدهای ذخیره‌ساز و منابع تولید ❖ پیش‌بینی تولید منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، ظرفیت پاسخگویی بار و الگوهای رانندگی یا تقاضای جمع شده خودروهای برقی محض و هیبرید به منظور مشارکت بهینه آن‌ها در تأمین بار و برنامه‌ریزی بهینه کوتاه‌مدت ریزشبکه‌ها ❖ پیش‌بینی میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از عملکرد واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر سوخت‌های فسیلی ❖ پیش‌بینی رخدادهای تأثیرگذار در کیفیت توان با استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین ❖ پیش‌بینی بار خودروهای برقی مبتنی بر خوشه‌بندی الگوهای رفتاری با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین ❖ پیش‌بینی خطا و مکان^{۱۴} آن در ریزشبکه‌ها با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین
مدیریت سیستم (بهینه‌سازی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشبکه)	❖ تعیین نوع و ظرفیت بهینه منابع تولیدپراکنده (مبتنی بر سوخت‌های فسیلی یا مبتنی بر انرژی‌های پاک) و سیستم‌های ذخیره‌ساز و دیسپچ اقتصادی – زیست‌محیطی بار بین آن‌ها و تعیین نوع بارها (الکتریسته، حرارت، برودت) و گروه‌های مختلف آن‌ها (از قبیل صنعتی، خانگی، تجاری) ❖ مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها با در نظر داشتن انواع مختلف بار (از قبیل برق، حرارت و برودت) و شرایط مختلفی چون تعرفه‌های متغیر برق یا سیاست‌های تشویقی و تنبیهی ❖ مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر تئوری بازی‌ها^{۱۵} و یادگیری ماشین ❖ بهره‌برداری از چند ریزشبکه در تعامل با یکدیگر ❖ مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها در شرایط کمبود داده^{۱۶} ❖ استفاده از رایانش ابری و لبه‌ای^{۱۷} و روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای کنترل و مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها ❖ کاهش تلفات در ریزشبکه‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و تشکیل ائتلاف^{۱۸} ❖ پاسخگویی بار^{۱۹} هوشمند و پاسخگویی بار خودکار^{۲۰} در ریزشبکه‌ها با استفاده از اینترنت اشیا و یادگیری ماشین ❖ مدیریت انرژی تطبیقی^{۲۱} ریزشبکه‌ها با استفاده از پایش داده^{۲۲} و یادگیری ماشین

^۱ Situational awareness

^۲ Bad data detection and identification

^۳ Micro-Phasor Measurement Units (μ-PMUs)

^۴ Intelligent Electronic Devices (IEDs)

^۵ Smart meters

^۶ False data detection

^۷ Anomaly detection

^۸ Failure

^۹ Activity-based load disaggregation

^{۱۰} Cyber Physical

^{۱۱} Delay Sensitivity-Aware Aggregation

^{۱۲} Low-Latency Communications

^{۱۳} Feature selection approach

^{۱۴} Location prediction

^{۱۵} Game theory

^{۱۶} Data interruption

^{۱۷} Edge and Cloud Computing

^{۱۸} Coalition formation

^{۱۹} Demand response

^{۲۰} Automated

^{۲۱} Adaptive protection

^{۲۲} Data monitoring

❖ بهینه‌سازی توزیع‌شده^۱ شارش توان در ریزشبکه‌ها با استفاده از روش‌های تجزیه دوگان^۲ ❖ مدیریت انرژی مبتنی بر پیش‌بینی^۳ در ریزشبکه‌ها ❖ بهره‌برداری با قابلیت بازآرایی فعال از ریزشبکه‌های شهر هوشمند	
❖ کنترل تطبیقی ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه‌های جزیره‌ای ❖ تسریع شناسایی رویدادهای منجر به بهره‌برداری جزیره‌ای ریزشبکه^۴ ❖ کنترل فرکانس هوشمند و تطبیقی ریزشبکه‌ها و نیز شبکه ریزشبکه‌ها ❖ کنترل بار – فرکانس هوشمند (حذف بار کنترل شده بر مبنای اولویت‌بندی بارها) ❖ کنترل مبتنی بر داده^۵ ریزشبکه‌ها ❖ حفاظت تطبیقی ریزشبکه‌ها به کمک روش‌های مختلف یادگیری ماشین ❖ بهبود عملکرد حفاظتی انواع ریزشبکه‌ها تحت شرایط مختلف با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین ❖ شناسایی هوشمندانه، دسته‌بندی، مکان‌یابی و ایزولاسیون انواع خطاها به کمک روش‌های مختلف یادگیری ماشین ❖ بازیابی^۶ ریزشبکه ❖ استفاده از روش کنترل شناختی^۷ برای عملکرد بهینه ریزشبکه در شرایط ارتباطات بی‌سیم ناپایدار^۸ ❖ استفاده از روش تجزیه موجک^۹ به منظور دسته‌بندی انواع خطا در ریزشبکه‌ها ❖ شناسایی و دسته‌بندی اغتشاشات ریزشبکه^{۱۰} با استفاده از روش تجزیه موجک^{۱۱} ❖ راهبرد تعاملی فیزیکی-سایبری^{۱۲} برای کنترل ریزشبکه‌های در مواجهه با قطعی در ارتباطات^{۱۳} ❖ کنترل ریزشبکه‌ها در شرایط وقوع اغتشاشات در داده‌های ارتباطی^{۱۴} ❖ شناسایی پارامترهای مدل بار به منظور مطالعات پایداری ریزشبکه‌ها ❖ خوسه‌بندی رخداد‌های مختلف در ریزشبکه‌ها به کمک روش‌های یادگیری ماشین ❖ کنترل مبتنی بر پیش‌بینی توان^{۱۵} در ریزشبکه‌ها	کنترل و حفاظت
❖ پیش‌بینی قیمت برق جهت مشارکت بارهای مختلف ریزشبکه در برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا ❖ مدیریت انرژی زمان-واقعی ریزشبکه‌ها و توسعه چهارچوب تعاملی مدیریت انرژی و توان در شبکه ریزشبکه‌ها ❖ مدل‌سازی رفتار عامل‌های مختلف در ریزشبکه‌ها در ارتباط با یکدیگر ❖ مدل‌سازی رفتار هر ریزشبکه به عنوان یک عامل در تعامل با نهادهای دیگر یا در شبکه ریزشبکه‌ها ❖ تبادلات هم‌تا به هم‌تا و تعاملات انرژی بین نهادهای مختلف • پاسخگویی بار در ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی با مدلسازی تعامل استراتژیک بین ایستگاه و کاربران (تعیین قیمت بهینه شارژ به منظور بهینه‌سازی درآمد بلندمدت ایستگاه‌های شارژ و رفاه اجتماعی کاربران) • مدلسازی مکانیزم‌های حراج^{۱۶} بین ریزشبکه‌ها با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین • مدلسازی رویکرد بازاری^{۱۷} ورود منابع تولیدپراکنده و خوردروهای برقی در ریزشبکه‌های هوشمند با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین	بازار برق، تبادلات انرژی و چارچوب تعاملی بین نهادهای مختلف
❖ اکتساب دانش^{۱۸} به کمک داده‌های در دسترس از انواع مختلف ریزشبکه‌ها (از قبیل ریزشبکه‌های صنعتی و خانگی) ❖ شناسایی جزیره‌ای شدن^{۱۹} ریزشبکه‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌کاوی ❖ حفاظت ریزشبکه در مقابل خطاهای مختلف با استفاده از روش‌های داده‌کاوی ❖ تعیین مشخصات^{۲۰} در تحلیل کلان‌داده^{۲۱} برای تصمیم‌گیری‌های داده-محور^{۲۲} ❖ استفاده از روش‌های داده‌کاوی در پیش‌بینی رفتار خودروهای برقی	داده‌کاوی

Distributed optimization^۱

Dual decomposition^۲

Prediction-based^۳

Faster detection of microgrid islanding events^۴

Data-driven^۵

Restoration^۶

Cognitive control approach^۷

Unstable wireless communication^۸

Wavelet decomposition^۹

Microgrid disturbances^{۱۰}

Wavelet transform^{۱۱}

Cyber-physical cooperative response strategy^{۱۲}

Communication interruption^{۱۳}

Communication data disturbance^{۱۴}

Control strategy based on power forecasting^{۱۵}

Auction^{۱۶}

Market oriented^{۱۷}

Knowledge discovery^{۱۸}

Islanding detection^{۱۹}

Attributes^{۲۰}

Big data^{۲۱}

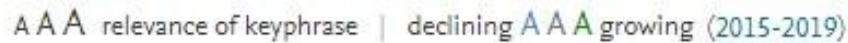
Data-driven decision making^{۲۲}

۸-۹- متن کاوی در حوزه "مطالعات کیفیت توان سیستم‌های قدرت"

۸-۹-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "کیفیت توان سیستم‌های قدرت"

گسترش و فراوانی مستندات علمی پیرامون کیفیت توان در سیستم‌های قدرت، شاهی بر اهمیت مطالعات این محور است. در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بیش از ۲۰۰۰۰ مستندات علمی (با محدود نمودن نتایج جستجوها در حوزه‌های Engineering، Energy و Computer Science) پیرامون کیفیت توان انتشار یافته است که بیان گر توجه بالای پژوهشگران به این حوزه است. حوزه‌ها و موضوعات متنوعی در ارتباط با کیفیت توان وجود دارد؛ بنابراین، زمانی که پیرامون کیفیت توان صحبت می‌شود، ممکن است هر یک از این حوزه‌ها و موضوعات مورد نظر باشد. جهت بسترسازی برای پرداختن به بررسی کاربردهای فناوری یادگیری ماشین در مطالعات کیفیت توان، مهم‌ترین مفاهیم مرتبط به کیفیت توان در شکل ۸-۱۰۵ و

جدول ۸-۹۴ آمده است:



جدول ۹۴-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با کیفیت توان در سیستم‌های قدرت

موضوع	ردیف	موضوع	ردیف	موضوع	ردیف
Inverter	۱۳	Grid	۷	Harmonic	۱
Electric Potential	۱۴	Electric Power Distribution	۸	Voltage Sag	۲
Electric Vehicle	۱۵	Reactive Power	۹	Microgrid	۳

Solar Energy	۱۶	Direct Current	۱۰	Harmonic Distortion	۴
Photovoltaic System	۱۷	Asynchronous Generator	۱۱	Distributed Power Generation	۵
Synchronous Generator	۱۸	Static Synchronous Compensator	۱۲	Converter	۶

نتایج بالا حاصل جستجوی محور موردنظر در اسکاپوس بوده که نحوه جستجوی منطقی مورد استفاده به صورت زیر است:

(Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND Power Quality

دقت شود، نتایج برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و در حوزه Energy, Engineering و Computer Science محدود شده

است. با توجه به محدودیت‌های سایول، نتایج جستجو برای ۲۰۰۰ مستند اخیر تحلیل و حاصل شده است.

برای نمونه، ۱۰ مستند علمی برتر در زمینه کیفیت توان (در سال ۲۰۲۰) که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول ۸-۹۵ نشان

داده است.

جدول ۸-۹۵: پراچ‌ترین مراجع در حوزه کیفیت توان

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Double Hidden Layer Output Feedback Neural Adaptive Global Sliding Mode Control of Active Power Filter, IEEE Transactions on Power Electronics	۳۳
۲	A Transformer Integrated Filtering System for Power Quality Improvement of Industrial DC Supply System, IEEE Transactions on Industrial Electronics	۲۸
۳	A review of strategic charging-discharging control of grid-connected electric vehicles, Journal of Energy Storage	۱۹
۴	Grid-connected renewable energy sources: Review of the recent integration requirements and control methods, Journal of Cleaner Production	۱۷
۵	Design-Oriented Transient Stability Analysis of PLL-Synchronized Voltage-Source Converters, IEEE Transactions on Power Electronics	۱۴
۶	Impact of rapid PV fluctuations on power quality in the low-voltage grid and mitigation strategies using electric vehicles, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۱۴
۷	Energy management system for smart grid: An overview and key issues, International Journal of Energy Research	۱۱
۸	Assessment of power quality in the utility grid integrated with wind energy generation, IET Power Electronics	۱۱
۹	A Fast and Robust Real-Time Detection Algorithm of Decaying DC Transient and Harmonic Components in Three-Phase Systems, IEEE Transactions on Power Electronics	۱۰

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱۰	An optimal current control scheme in grid-tied hybrid energy system with active power filter for harmonic mitigation, International Transactions on Electrical Energy Systems	۱۰

مطابق نتایج متن کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شده، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین اسناد دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

- 1) B. Singh;
- 2) F. Blaabjerg;
- 3) M. J. H. Bollen;
- 4) J. Mayer;
- 5) K. Al Haddad;
- 6) X. Xiao;
- 7) S. Kewat;
- 8) S. Kumar;
- 9) S. R. Arya;
- 10) C. B. Jacobina.

همچنین، مؤسسات زیر بیش‌ترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

- 1) Indian Institute of Technology, Delhi;
- 2) Aalborg University;
- 3) North China Electric Power University
- 4) State Grid Corporation of China;
- 5) Anna University;
- 6) Jawaharlal Nehru Technological University;
- 7) Hunan University;
- 8) Sichuan University;
- 9) Xi'an Jiaotong University;
- 10) Ministry of Education, China.

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:
(۱) چین؛

- (۲) هند؛
- (۳) آمریکا؛
- (۴) اسپانیا؛
- (۵) برزیل؛
- (۶) ایتالیا؛
- (۷) انگلیس؛
- (۸) روسیه؛
- (۹) ایران؛
- (۱۰) دانمارک.

طبق رویه انتخاب شده جهت متن‌کاوی متون علمی و استخراج روند مطالعات انجام شده پیرامون مطالعات کیفیت توان در ابتدا بایستی واژگان کلیدی مورد نظر جهت انجام متن‌کاوی انتخاب و معرفی شود. طبیعی است با تغییر واژگان کلیدی نتایج ارائه شده نیز متفاوت خواهد بود، اما سعی شده که واژگان کلیدی انتخابی علاوه بر اینکه در مستندات علمی شناخته شده باشند، تا حد امکان با زیرمجموعه‌های تخصصی محور مورد نظر نیز متناظر و مرتبط بوده باشند. واژگان کلیدی انتخابی برای محور مطالعات کیفیت توان در نه دسته به صورت زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

- ✓ (Machine Learning) AND (Power Quality);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Harmonic OR Harmonic Distortion);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Active Filter OR Active Power Filter);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Voltage Control OR Reactive Power Control);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Voltage Unbalance OR Frequency Variation);
- ✓ (Machine Learning) AND (Voltage Swell OR Overvoltage);
- ✓ (Machine Learning) AND (Voltage Sag OR Voltage Dip);
- ✓ (Machine Learning) AND (Power Quality) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Disturbance OR Transient);

- ✓ (Machine Learning) AND (Power Quality) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (FACTS OR Inverter OR Converter)

در ادامه به ارائه نتایج به‌دست آمده با استفاده از ابزار علم‌سنجی SciVal و به کمک متن‌کاوی انجام شده به‌وسیله نمایه استنادی Scopus برای واژگان و عبارات کلیدی انتخابی می‌پردازیم. شایان ذکر است مقیاس زمانی مورد مطالعه در این تحقیق بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بوده است. همچنین جهت استخراج تحقیقات علمی پیرامون کاربردهای فناورانه یادگیری ماشین مرتبط با واژگان کلیدی مورد نظر، واژه "یادگیری ماشین" به صورت منطقی با واژه کلیدی مد نظر AND شده است. یادآور می‌شود که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه" های مستندات علمی موجود انجام شده است.

۲-۹-۸- نتایج حاصل از متن‌کاوی در حوزه محور پژوهشی مطالعات کیفیت توان

در این قسمت نتایج حاصل از متن‌کاوری در حوزه محور پژوهشی مطالعات کیفیت توان به تفکیک کلیدواژه‌های انتخابی ارائه می‌شوند.

❖ دسته اول:

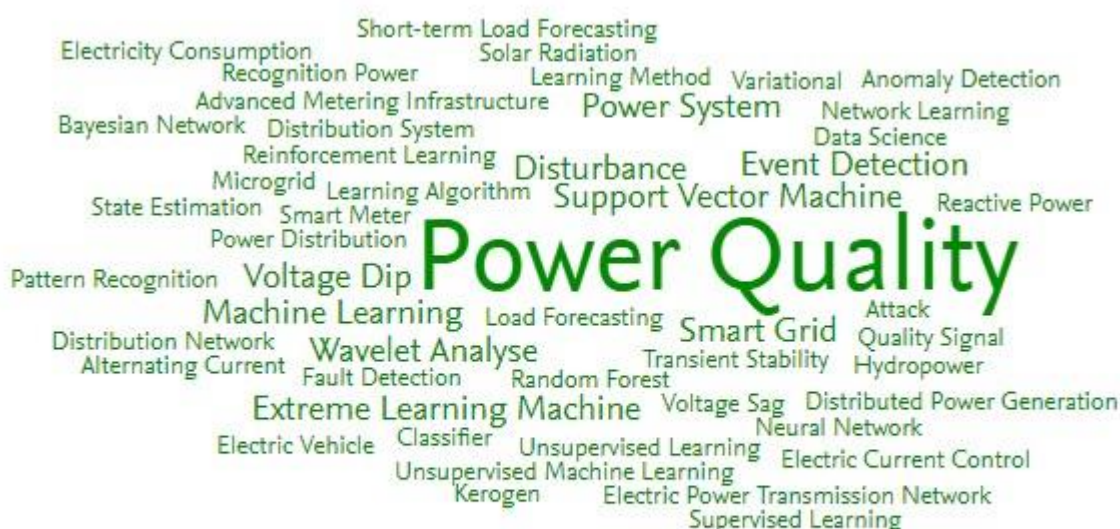
(Machine Learning) AND (Power Quality)

با محدود نمودن مطالعات حوزه کیفیت توان در زمینه Machine learning، تعداد ۱۳۴ مستند (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. در جدول ۹۶-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل ۱۰۶-۸ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول است. پراچ‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۹۷-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در شکل ۱۰۷-۸ نشان داده شده است.

جدول ۹۶-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول مطالعات کیفیت توان

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University
۲	Firat University
۳	Bingol University
۴	Chalmers University of Technology
۵	Delhi Technological University
۶	Luleå University of Technology
۷	Sarvajanik College of Engineering & Technology
۸	SINTEF
۹	University of California at Riverside
۱۰	University of Pune
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف

Dandil, Beşir, Firat University	۱
Sahani, Mrutyunjaya, Institute of Technical Education and Research of Siksha O Anusandhan University	۲
Ucar, Ferhat, Firat University	۳
Alçin, Ömer Faruk, Malatya Turgut Ozal University	۴
Ata, Fikret, Bingol University	۵
Andresen, C. A., SINTEF	۶
Arghandeh, Reza, Western Norway University of Applied Sciences	۷
Bagheri, Azam, Chalmers University of Technology	۸
Balouji, Ebrahim, Chalmers University of Technology	۹
Bollen, M. H.J., Luleå University of Technology	۱۰



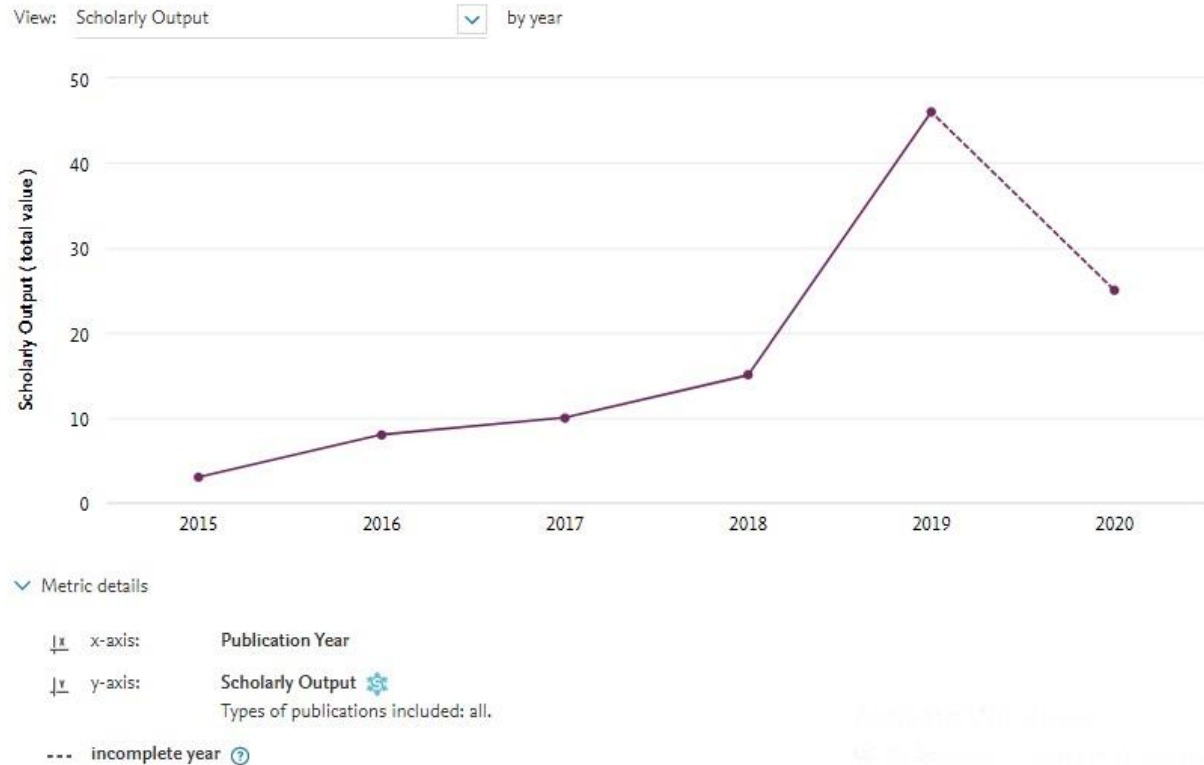
A A A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۱۰۶-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته اول مطالعات کیفیت توان

جدول ۹۷-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته اول مطالعات کیفیت توان

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A review of classification problems and algorithms in renewable energy applications, 2016, Energies	۴۲

۲۶	Variational mode decomposition and weighted online sequential extreme learning machine for power quality event patterns recognition, 2018, Neurocomputing	۲
۲۶	A Robust Transform-Domain Deep Convolutional Network for Voltage Dip Classification, 2018, IEEE Transactions on Power Delivery	۳
۲۶	Boosting performance of power quality event identification with KL Divergence measure and standard deviation, 2018, Journal of the International Measurement Confederation	۴
۲۵	A Machine Learning Approach to Meter Placement for Power Quality Estimation in Smart Grid, 2016, IEEE Transactions on Smart Grid	۵
۲۲	Power quality disturbance detection and classification using signal processing and soft computing techniques: A comprehensive review, 2019, International Transactions on Electrical Energy Systems	۶
۱۹	A LSTM-based deep learning method with application to voltage dip classification, 2018, Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP	۷
۱۹	The Power Quality Forecasting Model for Off-Grid System Supported by Multiobjective Optimization, 2017, IEEE Transactions on Industrial Electronics	۸
۱۹	Power quality event detection using a fast extreme learning machine, 2018, Energies	۹
۱۶	Improved characterization of multi-stage voltage dips based on the space phasor model, 2018, Electric Power Systems Research	۱۰



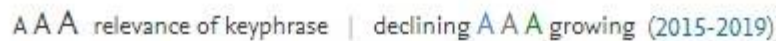
شکل ۱۰۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول مطالعات کیفیت توان

❖ دسته دوم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Harmonic OR Harmonic Distortion)

در شکل ۱۰۸-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم نشان داده شده است. پراچاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۹۸-۸

اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۱۰۹-۸ نشان داده شده است.



جدول ۹۸-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم مطالعات کیفیت توان

۳۷۴

۳۹	Comparative analysis of data-driven methods online and offline trained to the forecasting of grid-connected photovoltaic plant production, 2017, Applied Energy	۷
۳۶	Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting, 2019, Energy	۸
۳۵	An ensemble prediction intervals approach for short-term PV power forecasting, 2017, Solar Energy	۹
۳۰	Laboratory Education of Modern Power Systems Using PHIL Simulation, 2017, IEEE Transactions on Power Systems	۱۰

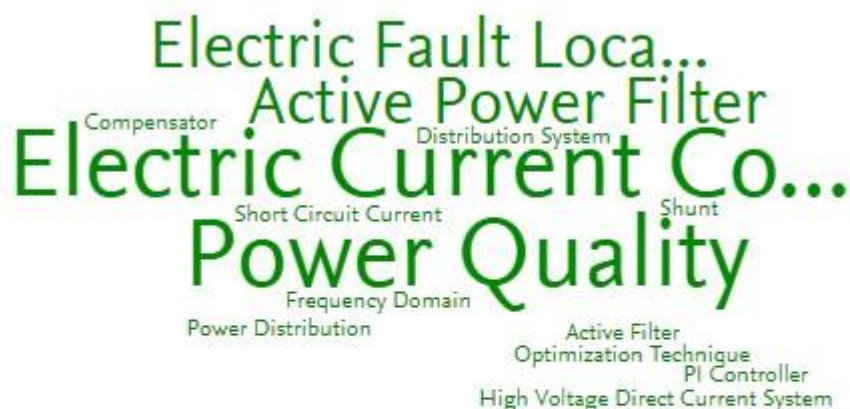


شکل ۱۰۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم مطالعات کیفیت توان

❖ دسته سوم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Active Filter OR Active Power Filter)

در این دسته تنها ۶ عدد مقاله پیدا شد. در شکل ۸-۱۱۰ کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۹۹ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۱۱۱ نشان داده شده است.



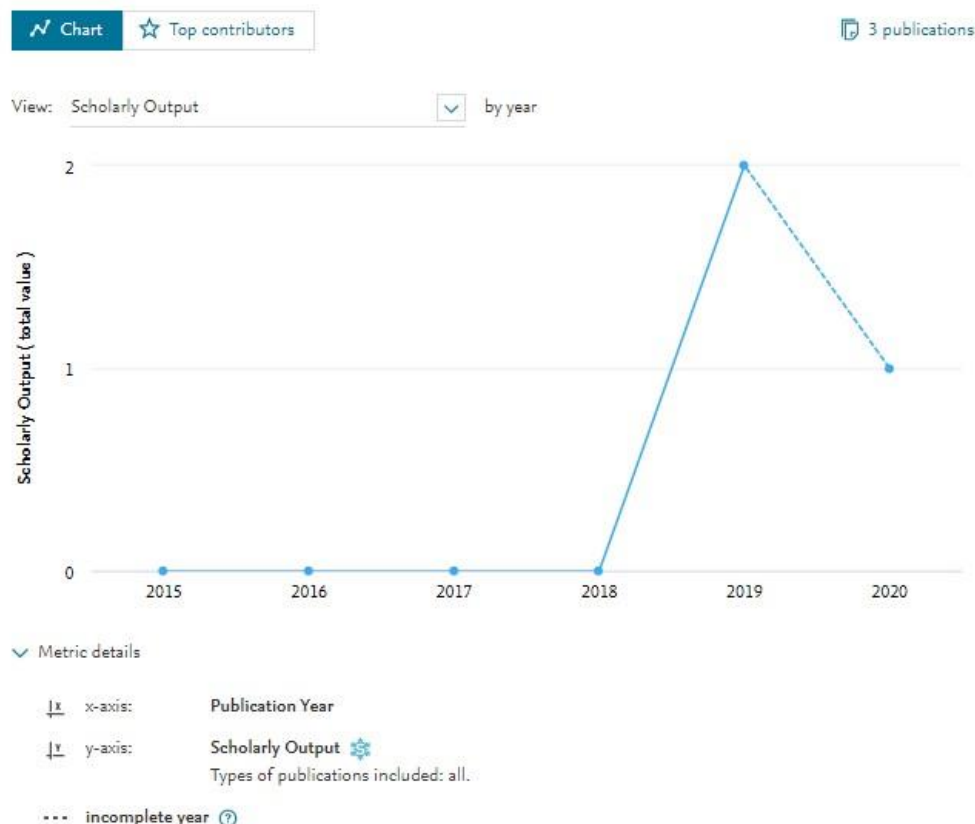
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۸-۱۱۰: کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم مطالعات کیفیت توان

جدول ۸-۹۹: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم مطالعات کیفیت توان

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Performance evaluation of 3-phase series active filter in a grid tied PV-system employing sinusoidal current control strategy, 2019, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering	۲
۲	Design and Simulation of Active Power Filter Based on Feed Forward Neural Network for Harmonic Detection and Elimination, 2020, 2020 International Conference on Computer, Electrical and Communication Engineering, ICCECE 2020	۰
۳	Design of shunt active power filter with optimal PI controller - A comparative analysis, 2019, Proceedings - 2019 International Conference on Applied Machine Learning, ICAML 2019	۰
۴	Power Quality Improvement by Using Active Power Filter and STATCOM of Renewable Power Distribution System, 2020, Lecture Notes in Electrical Engineering	۰

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۵	Locating short-circuit faults in HVDC systems using automatically selected frequency-domain features, 2019, International Transactions on Electrical Energy Systems	۰
۶	Q-Learning-Based Smart Selective Harmonic Current Mitigation-PWM (S2HCM-PWM) for Grid-Connected Converters, 2020, ECCE 2020 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition	۰

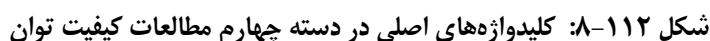


شکل ۱۱۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم مطالعات کیفیت توان

❖ دسته چهارم:

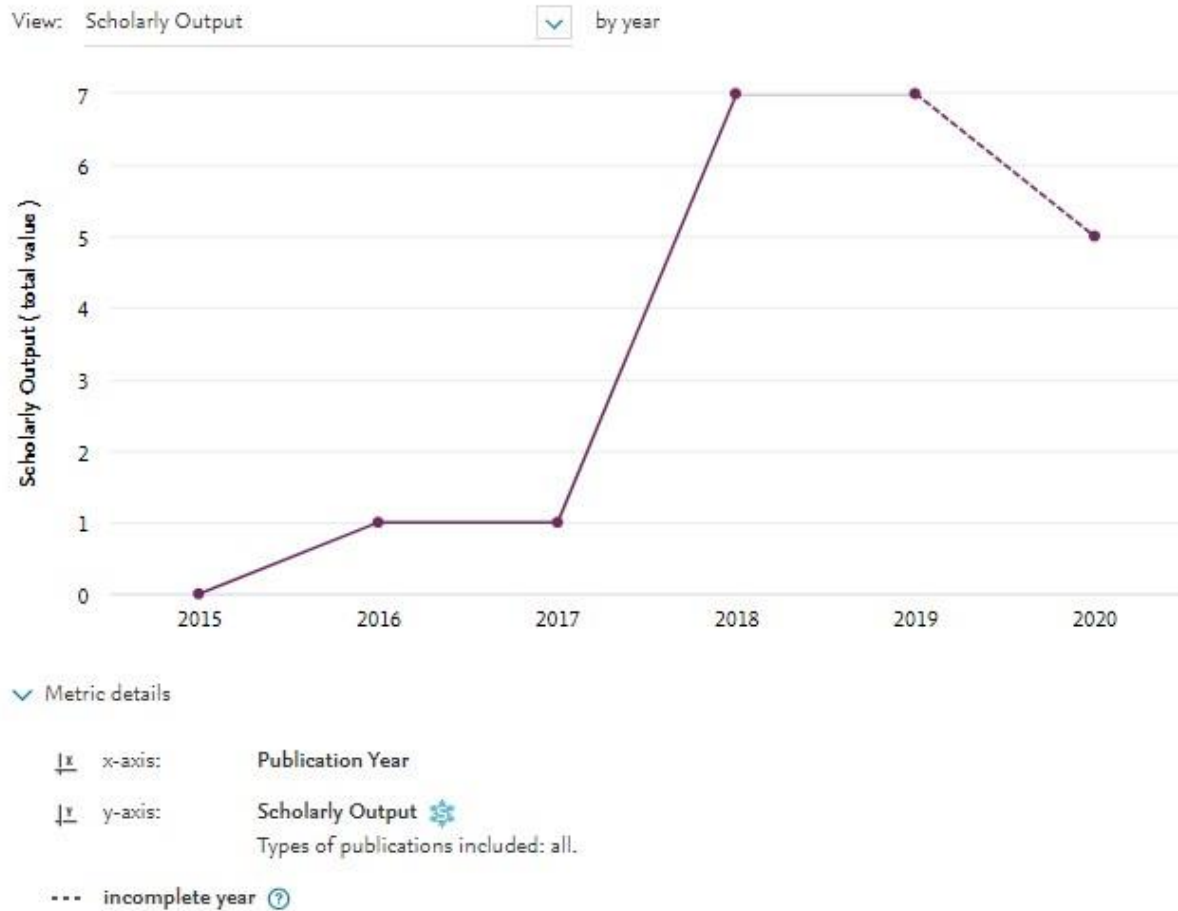
(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Voltage Control OR Reactive Power Control)

در شکل ۱۱۲-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته چهارم نشان داده شده است. پراچاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۱۰۰-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۱۱۳-۸ نشان داده شده است.



ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Deep-Reinforcement-Learning-Based Autonomous Voltage Control for Power Grid Operations, 2020, IEEE Transactions on Power Systems	۱۷
۲	On the Classification of low voltage feeders for network planning and hosting capacity studies, 2018, Energies	۱۰
۳	Volt-VAR control in power distribution systems with deep reinforcement learning, 2019, 2019 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, SmartGridComm 2019	۴
۴	Grid Integration of Solar Photovoltaic System Using Machine Learning-Based Virtual Inertia Synthetization in Synchronverter, 2020, IEEE Access	۴
۵	Unsupervised feature learning for online voltage stability evaluation and monitoring based on variational autoencoder, 2020, Electric Power Systems Research	۳
۶	Voltage/VAR Control and Optimization: AI approach, 2018, IFAC-PapersOnLine	۳
۷	Mini/micro-grid adaptive voltage and frequency stability enhancement using Q-learning mechanism through the offset of	۳

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
	PID controller, 2019, Journal of Operation and Automation in Power Engineering	
۸	Online voltage stability monitoring of distribution system using optimized Support Vector Machine, 2016, 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems, ICPS 2016	۳
۹	Identifying voltage stability critical areas using k-means clustering technique, 2017, 2016 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition-Latin America, PES T and D-LA 2016	۱
۱۰	Autonomous Decentralized Control of Distribution Network Voltage using Reinforcement Learning, 2018, IFAC-PapersOnLine	۱

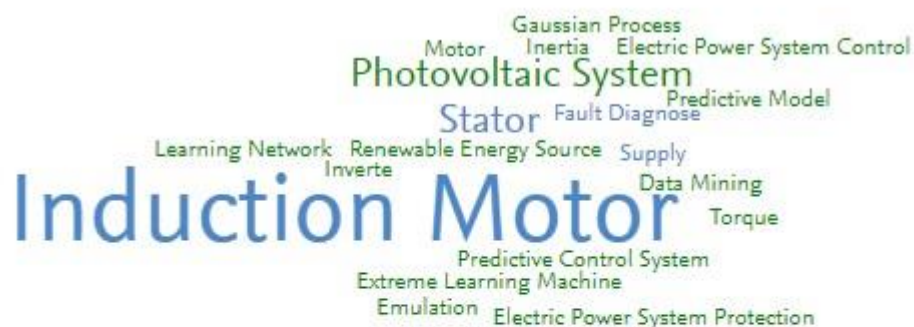


شکل ۱۱۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم مطالعات کیفیت توان

❖ دسته پنجم:

(Machine Learning) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Voltage Unbalance OR Frequency Variation)

در این دسته تنها ۶ مقاله پیدا شد. در شکل ۱۱۴-۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته پنجم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۱۰۱-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۱۱۵-۸ نشان داده شده است.

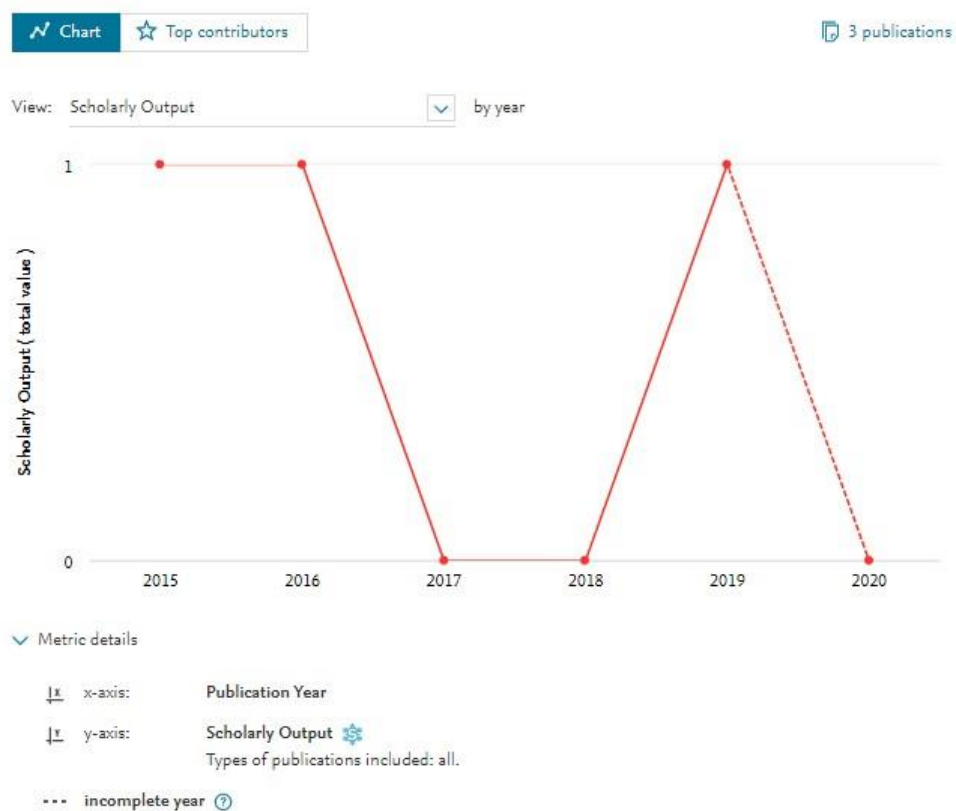


AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۱۱۴-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته پنجم مطالعات کیفیت توان

جدول ۱۰۱-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته پنجم مطالعات کیفیت توان

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Simulative and experimental investigation on stator winding turn and unbalanced supply voltage fault diagnosis in induction motors using Artificial Neural Networks, 2015, ISA Transactions	۳۱
۲	Determining the operational status of a three phase induction motor using a predictive data mining model, 2019, International Journal of Power Electronics and Drive Systems	۱۱
۳	Gaussian process regression based inertia emulation and reserve estimation for grid interfaced photovoltaic system, 2018, Renewable Energy	۶
۴	Cellular computational extreme learning machine network based frequency predictions in a power system, 2017, Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks	۲
۵	Research on direct torque predictive control system of induction motor based on three-level inverter, 2016, Proceedings - International Conference on Machine Learning and Cybernetics	۰
۶	Power Efficiency Tracking of Induction Furnaces, 2020, Proceedings of CONECCT 2020 - 6th IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies	۰



شکل ۱۱۵-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته پنجم مطالعات کیفیت توان

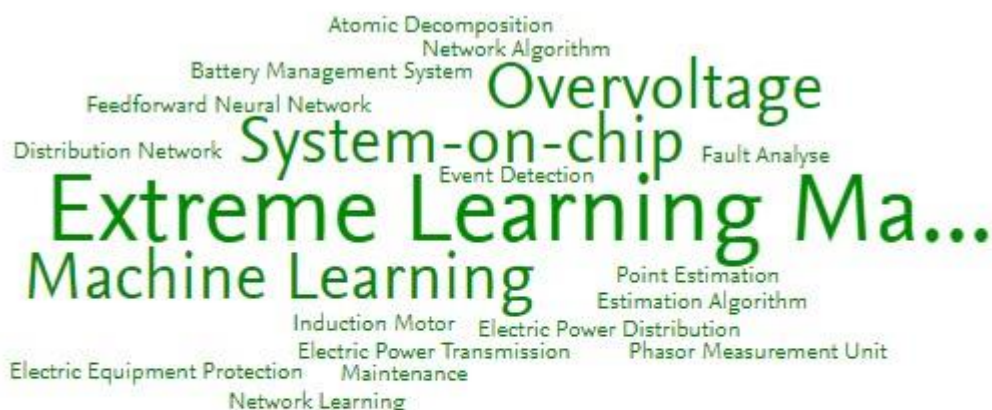
❖ دسته ششم:

(Machine Learning) AND (Voltage Swell OR Overvoltage)

در این دسته تنها ۷ مقاله پیدا شد. در شکل ۱۱۶-۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته ششم نشان داده شده است. پر ارجاع‌ترین مراجع

در این دسته نیز در جدول ۱۰۲-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۱۱۷-۸ نشان داده

شده است.

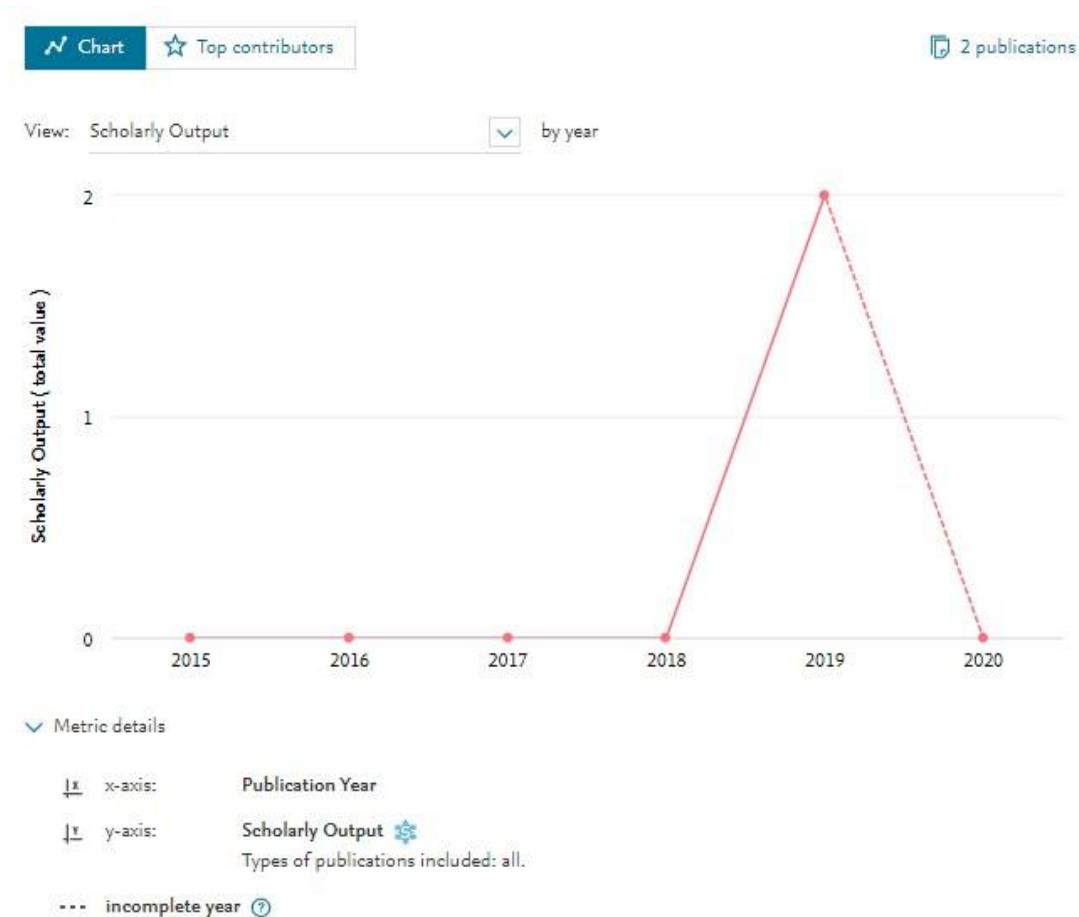


AA A relevance of keyphrase | declining AA A growing (2015-2019)

شکل ۱۱۶-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته ششم مطالعات کیفیت توان

جدول ۱۰۲-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته ششم مطالعات کیفیت توان

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Bundle extreme learning machine for power quality analysis in transmission networks, 2019, Energies	۲
۲	Fault Analysis and Predictive Maintenance of Induction Motor Using Machine Learning, 2018, 3rd International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques, ICECCOT 2018	۰
۳	Classification of partial discharge images using deep convolutional neural networks, 2020, Energies	۰
۴	Recognition Technology of Internal Overvoltage in Distribution Network Based on AD-CNN Algorithm, 2019, Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering	۰
۵	Design of Modular Battery Management System with Point-to-point SoC Estimation Algorithm, 2020, 2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC 2020	۰
۶	Learning Based Capacitor Voltage Ripple Reduction of Modular Multilevel Converters under Unbalanced Grid Conditions with Different Power Factors, 2020, 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2020	۰
۷	Reverse Power Flow Detection Using Optimally Placed μ PMUs in a Distribution System, 2020, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST	۰

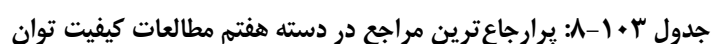


شکل ۱۱۷-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته ششم مطالعات کیفیت توان

❖ دسته هفتم:

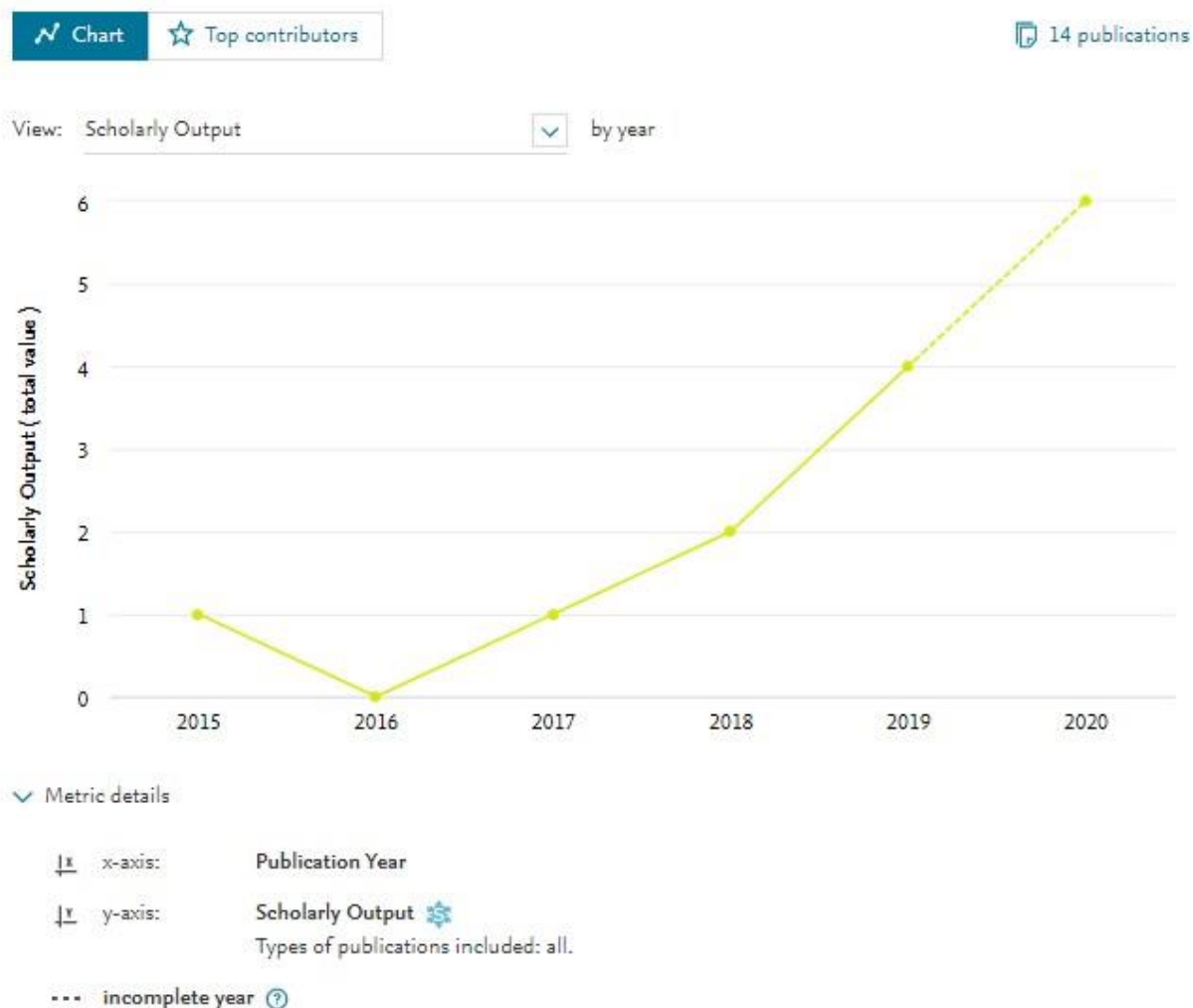
(Machine Learning) AND (Voltage Sag OR Voltage Dip)

در شکل ۱۱۸-۸ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هفتم نشان داده شده است. پراچاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۱۰۳-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۱۱۹-۸ نشان داده شده است.



३१५

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۷	Machine learning-based voltage dip measurement of smart energy meter, 2018, PDGC 2018 - 2018 5th International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing	۴
۸	Online power quality events detection using weighted Extreme Learning Machine, 2018, Proceedings - 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, ICSG 2018	۳
۹	Adaptive S transform for feature extraction in voltage sags, 2019, Applied Soft Computing Journal	۳
۱۰	Self-tuning kalman filter and machine learning algorithms for voltage dips upstream or downstream origin detection, 2016, Renewable Energy and Power Quality Journal	۲



شکل ۱۱۹-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هفتم مطالعات کیفیت توان

❖ دسته هشتم:

(Machine Learning) AND (Power Quality) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (Disturbance OR Transient)

در شکل ۸-۱۲۰ پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هشتم نشان داده شده است. پراچاترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۱۰۴ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۱۲۱ نشان داده شده است.



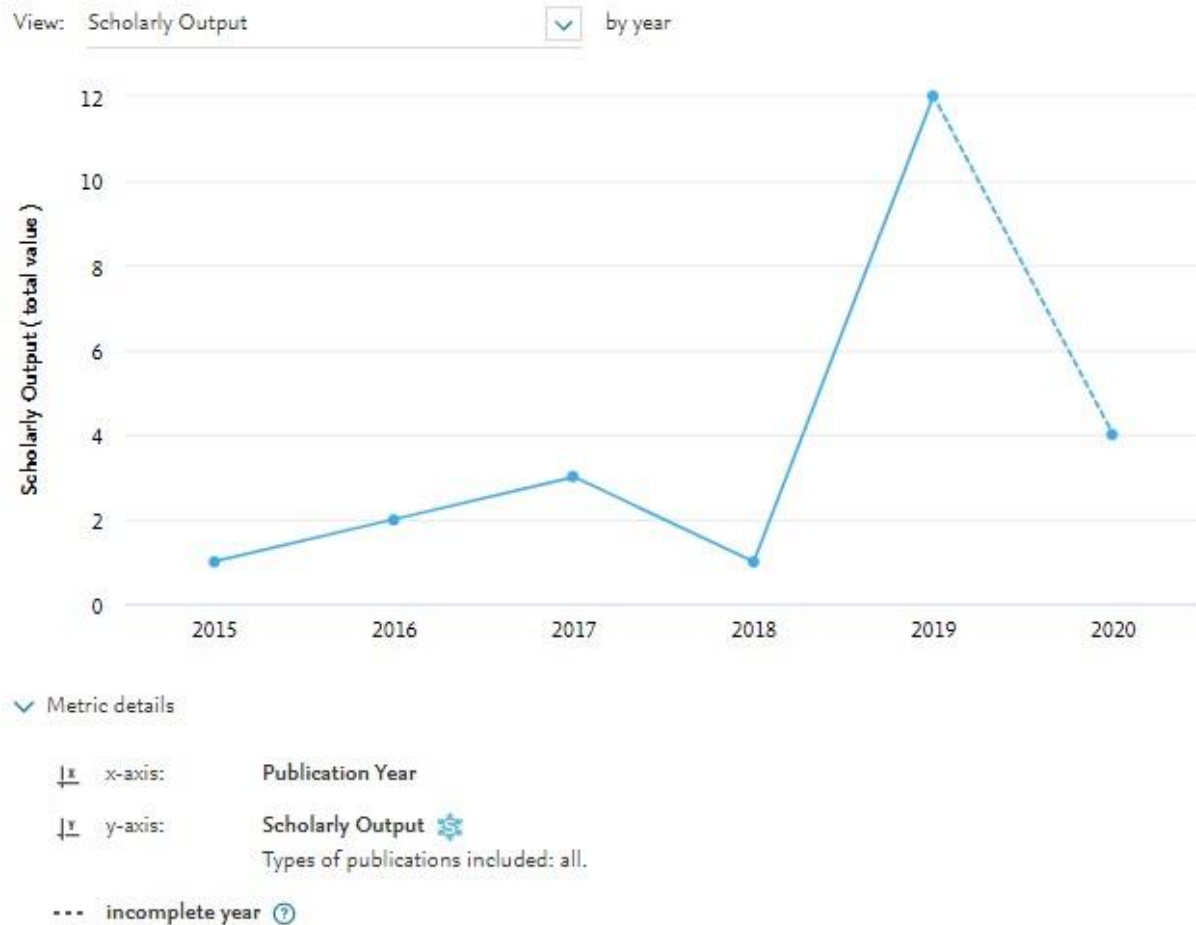
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۸-۱۲۰: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته هشتم مطالعات کیفیت توان

جدول ۸-۱۰۴: پراچاترین مراجع در دسته هشتم مطالعات کیفیت توان

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Power quality disturbance detection and classification using signal processing and soft computing techniques: A comprehensive review, 2019, International Transactions on Electrical Energy Systems	۲۲
۲	The Power Quality Forecasting Model for Off-Grid System Supported by Multiobjective Optimization, 2017, IEEE Transactions on Industrial Electronics	۱۹

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۳	Real-time transient stability status prediction using cost-sensitive extreme learning machine, 2016, Neural Computing and Applications	۱۲
۴	Is Machine Learning in Power Systems Vulnerable?, 2018, 2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, SmartGridComm 2018	۱۱
۵	A Review of Machine Learning Approaches to Power System Security and Stability, 2020, IEEE Access	۵
۶	Grid Integration of Solar Photovoltaic System Using Machine Learning-Based Virtual Inertia Synthetization in Synchronverter, 2020, IEEE Access	۴
۷	Recognition and classification of power quality disturbances by DWT-MRA and SVM classifier, 2019, International Journal of Advanced Computer Science and Applications	۲
۸	Design and Implementation of an Intelligent Single Line to Ground Fault Locator for Distribution Feeders, 2019, 2019 International Conference on Control, Automation and Diagnosis, ICCAD 2019 - Proceedings	۲
۹	Advanced signal processing and machine learning techniques for voltage sag causes detection in an electric power system, 2020, International Transactions on Electrical Energy Systems	۲
۱۰	Transient Voltage Stability Assessment Based on Sequential Trajectory Feature Learning, 2019, Dianwang Jishu/Power System Technology	۲



شکل ۱۲۱-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته هشتم مطالعات کیفیت توان

❖ دسته نهم:

(Machine Learning) AND (Power Quality) AND (Power System OR Distribution System OR Distribution Network OR Smart Grid OR Microgrid) AND (FACTS OR Inverter OR Converter)

در این دسته تنها ۸ مقاله پیدا شد. در شکل ۱۲۲-۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته نهم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۱۰۵-۸ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۱۲۳-۸ نشان داده شده است.



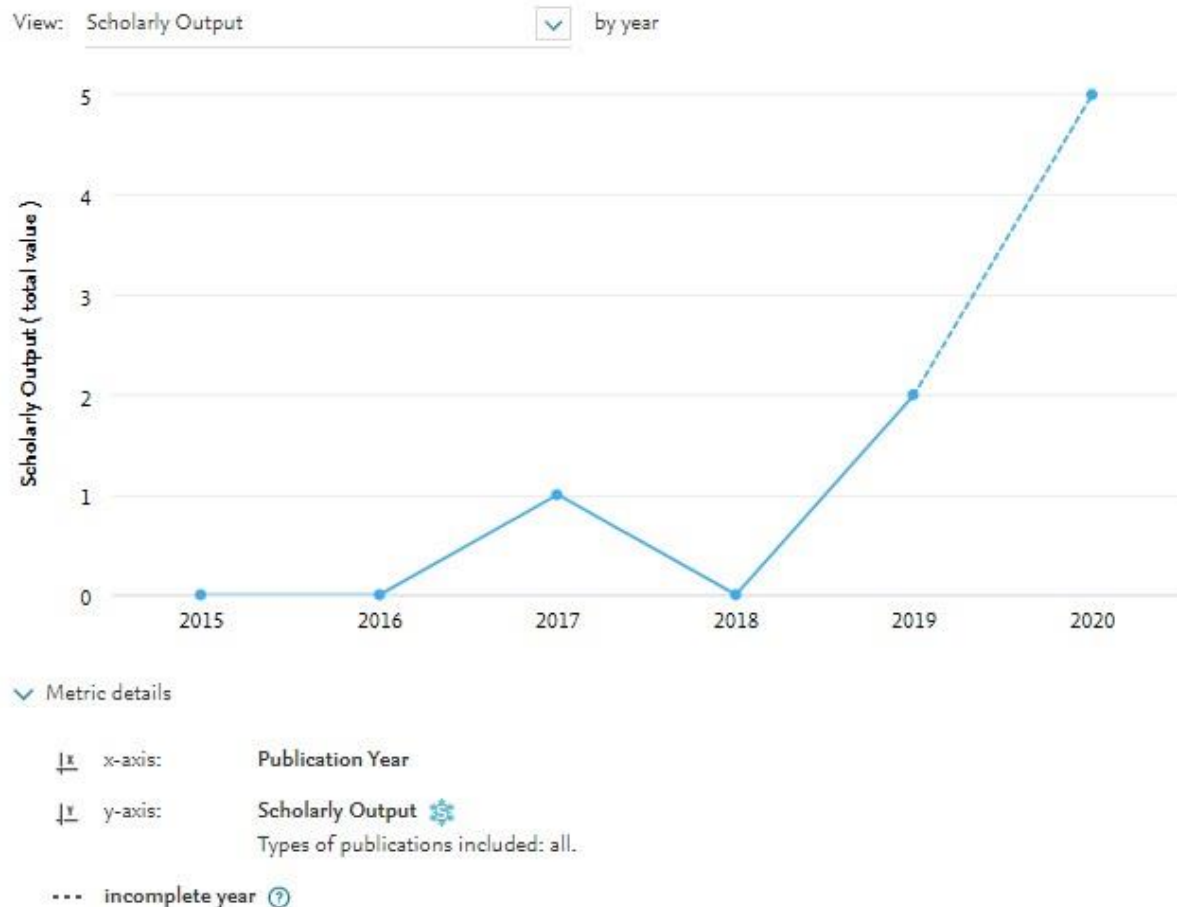
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۱۲۲-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته نهم مطالعات کیفیت توان

جدول ۱۰۵-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته نهم مطالعات کیفیت توان

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Support Vector Machine-Based Islanding and Grid Fault Detection in Active Distribution Networks, 2020, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics	۵
۲	Preemptive mode-change triggering for inverters in response to unintentional islanding situations in high solar PV penetration distribution networks, 2017, IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2016	۳
۳	Special issue “analysis for power quality monitoring”, 2020, Energies	۲
۴	Machine learning based impedance estimation in power system, 2019, IET Conference Publications	۰
۵	Cooperative secondary voltage control of static converters in a microgrid using model-free reinforcement learning, 2019, 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019 ECCE Europe	۰

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۶	Power Quality Improvement by Using Active Power Filter and STATCOM of Renewable Power Distribution System, 2020, Lecture Notes in Electrical Engineering	۰
۷	Predictive machine learning and data acquisition for power quality improvement in facts devices with optimum power flow control based on cross difference progression and coordination examining algorithm, 2020, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing	۰
۸	Power Quality Problems Mitigation by DVR Using SC Structured Cascaded MPAC, 2020, Lecture Notes in Electrical Engineering	۰



شکل ۱۲۳-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته نهم مطالعات کیفیت توان

در ادامه، با بررسی متن کاوی صورت پذیرفته توسط پایگاه داده اسکاپوس و ابزار سایول و بر مبنای مطالعه برخی از مهم‌ترین اسناد منتشرشده در حوزه مطالعات کیفیت توان، این گزارش به دنبال شناخت برخی کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه مذکور خواهد بود.

۳-۹-۸- موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات کیفیت توان"

برخی از موضوعات تحقیقاتی که انتظار می‌رود در زمینه کاربردهای یادگیری ماشین در حوزه محور پژوهشی "مطالعات کیفیت توان" قابل انجام بوده و مفید باشد در جدول ۱۰۶-۸ بیان شده است.

جدول ۱۰۶-۸: موضوعات تحقیقاتی در حوزه کاربردهای یادگیری ماشین در محور پژوهشی "مطالعات کیفیت توان"

کاربردها	موضوعات تحقیقاتی
تشخیص و شناسایی	- تشخیص الگوهای رویداد کیفیت توان - شناسایی اغتشاشات کیفیت توان - تشخیص برق‌دزدی - تشخیص جزیره‌ای شدن - تشخیص و مکان‌یابی خطای شبکه - شناسایی دلایل فرورفتگی ولتاژ - شناسایی و حذف هارمونیک توسط فیلتر اکتیو - اندازه‌گیری بارگذاری نامتعادل ترانسفورماتورها - ارزیابی پایداری ولتاژ گذرا - ارزیابی عملکرد فیلتر اکتیو
تحلیل و دسته‌بندی	- دسته‌بندی فرورفتگی ولتاژ - دسته‌بندی اغتشاشات کیفیت توان - تحلیل کیفیت توان - تحلیل داده - تحلیل و دسته‌بندی خطا - دسته‌بندی عدم تعادل انرژی - دسته‌بندی داده‌های اندازه‌گیری کیفیت توان
پیش‌بینی و تخمین	- پیش‌بینی کیفیت توان - پیش‌بینی وضعیت پایداری گذرا - پیش‌بینی رفتار مصرف‌کننده در مدیریت هوشمند انرژی - تخمین امپدانس - پیش‌بینی رویداد در شبکه‌های برق - پیش‌بینی توان راکتیو در شبکه‌های انتقال
	بهینه‌سازی توان راکتیو برای پایداری ولتاژ گذرا

• مدل‌سازی پروفیل شارژ/دشارژ سیستم‌های باتری • کنترل ولت-وار • مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی • بهبود کیفیت توان در ادوات FACTS • جایابی اندازه‌گیر برای تخمین کیفیت توان	کنترل و بهینه‌سازی

۸-۱۰- متن کاوی در حوزه "مدیریت پیک بار در سیستم‌های قدرت"

۸-۱۰-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "مدیریت پیک بار در سیستم‌های قدرت"

در سال‌های اخیر، به منظور مقابله با بحران انرژی در فصل تابستان، مطالعات ارزشمندی در زمینه مدیریت مصرف الکتریسیته انجام شده است. تعداد مستندات علمی منتشر شده در زمینه مدیریت پیک بار بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی در سه حوزه Energy, Engineering, و Computer Science بیش از ۴۴۷۵ بوده است. تحقیقات حوزه مدیریت پیک بار را می‌توان به سه گروه کلی برنامه‌های پاسخگویی بار، مطالعات بار و کنترل تجهیزات مصرف کننده انرژی الکتریکی طبقه‌بندی نمود. برای بررسی کاربردهای فناورانه یادگیری ماشین در محور مدیریت پیک بار، چهار گروه کلیدواژه به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

❖ گروه اول

(Peak Load Management) OR (Peak Demand Management)

❖ گروه دوم

“Machine Learning” AND ((Peak Load Management) OR (Peak Demand Management))

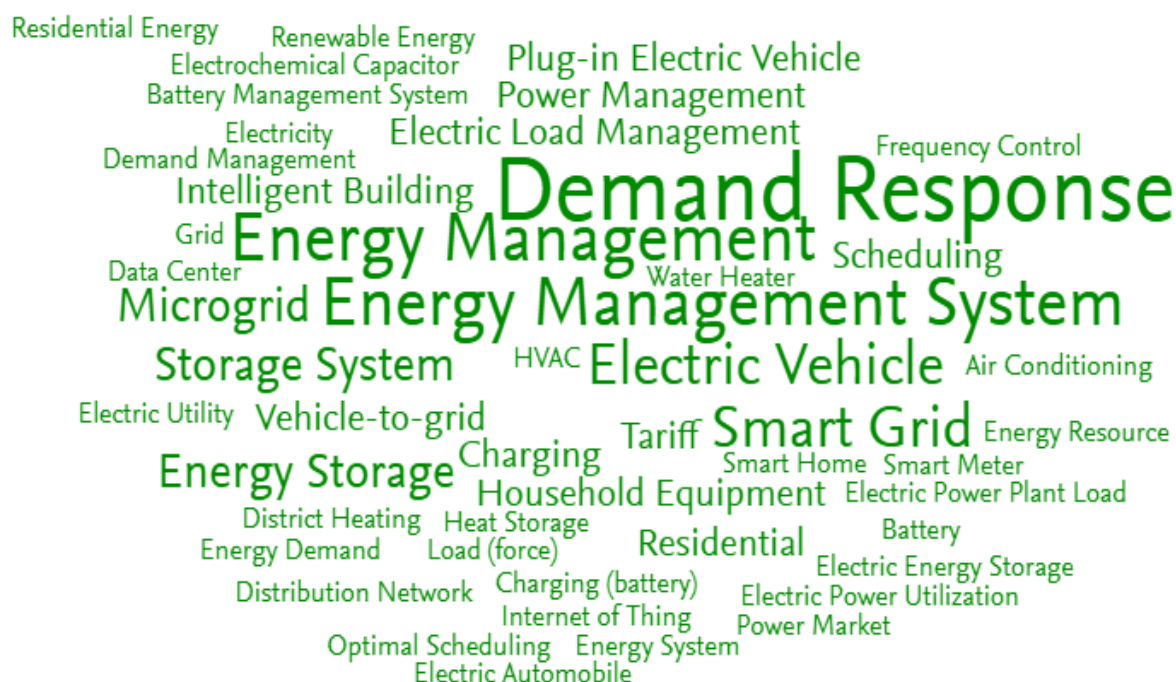
❖ گروه سوم

“Machine Learning” AND (Power OR Energy OR Electricity) AND ((Time-of-Use) OR (Real-Time Pricing) OR Incentive OR (Capacity Market Program) OR (Extreme-Day Pricing) OR (Critical Peak Pricing) OR (Demand Bidding) OR (Ancillary Services Market) OR (Direct Load Control) OR (Peak-Load Pricing) OR Contract)

❖ گروه چهارم

“Machine Learning” AND (Power OR Energy OR Electricity) AND (“Flexible Load” OR “Responsive Load” OR “Customer Participation” OR “Interruptible Load” OR (Curtaillable Load) OR (Load Factor) OR (Load Profile Characteristic) OR (Load Forecasting) OR (Load Prediction) OR (Load Estimation) OR (Non-Intrusive load monitoring) OR HVAC OR (Thermal Comfort))

لازم به ذکر است که کلیه نتایج برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ و برای سه حوزه Energy, Engineering, و Computer Science ارائه شده است. با توجه به محدودیت‌های سایول، نتایج جستجو برای ۲۰۰۰ داکيومنت اخیر استخراج و تحلیل شده است. مهمترین مفاهیم مرتبط با حوزه مدیریت پیک بار بر اساس جستجوی کلیدواژه‌های دسته اول بدون در نظر گرفتن عبارت یادگیری ماشین، به صورت شکل ۸-۱۲۴ و جدول ۸-۱۰۷ بوده است.



A A A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

جدول ۱۰۷-۸: مهم ترین مفاهیم مرتبط با مدیریت بیک بار

موضوع	ردیف	موضوع	ردیف	موضوع	ردیف
Battery management system	۱۳	Energy storage	۷	Demand-side management	۱
Air conditioning	۱۴	Household equipment	۸	Demand response	۲
Data center	۱۵	Intelligent building	۹	Energy management system	۳
District heating	۱۶	Tariff	۱۰	Electric vehicle	۴
Internet-of-Things (IOT)	۱۷	Smart home	۱۱	Smart grid	۵
Frequency control	۱۸	Smart meter	۱۲	Microgrid	۶

برای نمونه، ۱۰ مستند علمی برتر در زمینه مدیریت پیک بار که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول (۱-۱۰۸) نشان داده است.

جدول ۱۰۸-۸: پراچاع‌ترین مراجع در حوزه مدیریت پیک بار

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques, 2019, Applied Energy	۱۰۶
۲	Energy Demand Side Management within micro-grid networks enhanced by blockchain, 2018, Applied Energy	۱۰۴
۳	Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications, 2018, Renewable and Sustainable Energy Reviews	۱۰۰
۴	Optimisation of demand response in electric power systems, a review, 2019, Renewable and Sustainable Energy Reviews	۸۶
۵	A Decentralized Renewable Generation Management and Demand Response in Power Distribution Networks, 2018, IEEE Transactions on Sustainable Energy	۶۹
۶	A review on price-driven residential demand response, 2018, Renewable and Sustainable Energy Reviews	۶۸
۷	Lithium-ion battery charging management considering economic costs of electrical energy loss and battery degradation, 2019, Energy Conversion and Management	۵۸
۸	Stochastic multi-objective energy management in residential microgrids with combined cooling, heating, and power units considering battery energy storage systems and plug-in hybrid electric vehicles, 2018, Journal of Cleaner Production	۵۸
۹	A decentralized energy management framework for energy hubs in dynamic pricing markets, 2018, IEEE Transactions on Smart Grid	۵۳
۱۰	A Survey and Evaluation of the Potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer Transactive Energy Exchanges in Local Energy Markets, 2019, IEEE Systems Journal	۵۲

مطابق نتایج متن‌کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شده، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین اسناد دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

1. Nadeem R. Javaid
2. João P.S. Catalão
3. Ghulam Hafeez
4. Zahoor Ali Khan
5. Khizir Mahmud
6. Md Jahangir Hossain
7. Imran Khan
8. Behnam Mohammadi-Ivatloo

9. Jayashri Ravishankar

10. Ozan Erdinç

همچنین، مؤسسات زیر بیش‌ترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

1. COMSATS University Islamabad

2. North China Electric Power University

3. State Grid Corporation of China

4. Islamic Azad University

5. CNRS

6. Ministry of Education, China

7. University of New South Wales

8. Aalborg University

9. Zhejiang University

10. Tsinghua University

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

1. China

2. United States

3. India

4. United Kingdom

5. Iran

6. Pakistan

7. Italy

8. Australia

9. South Korea

10. Canada

در ادامه به ارائه نتایج به‌دست آمده با استفاده از ابزار علم‌سنجی SciVal و به کمک متن‌کاوی تحت پایگاه استنادی Scopus برای سه گروه واژگان و عبارات کلیدی منتخب می‌پردازیم. یادآور می‌شود که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" و "کلیدواژه" های مستندات علمی موجود برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی انجام شده است.

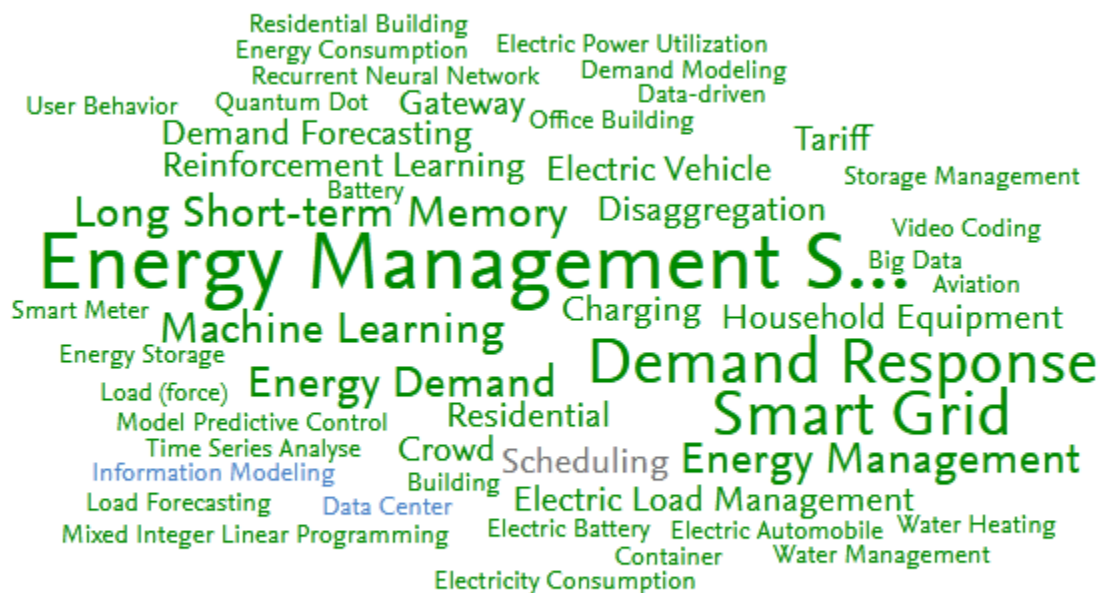
• دسته دوم واژگان محور مدیریت پیک بار

“Machine Learning” AND ((Peak Load Management) OR (Peak Demand Management))

با محدود نمودن مطالعات حوزه مدیریت پیک بار در زمینه Machine learning، تعداد ۷۹ داکيومنت (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. در جدول ۸-۱۰۹، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل ۸-۱۲۵ نشان‌دهنده پنجاه کلیدواژه اصلی در دسته دوم است. پراچ‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۱۱۰ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم در شکل ۸-۱۲۶ نشان داده شده است.

جدول ۸-۱۰۹: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم واژگان محور مدیریت پیک بار

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	City University of Hong Kong
۲	Nanyang Technological University
۳	National Taiwan University of Science and Technology
۴	Flemish Institute for Technological Research
۵	Hong Kong Polytechnic University
۶	Southern University of Science and Technology
۷	Sri Sivasubramaniya Nadar College of Engineering, Chennai
۸	The University of Tokyo
۹	University of Da Nang
۱۰	University of Virginia
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Juisheng Chou, National Taiwan University of Science and Technology
۲	Syed Shahbaaz Ahmed, Unknown institution
۳	Krzysztof Gajowniczek, Warsaw University of Life Sciences
۴	Hantao Huang, Nanyang Technological University
۵	Rai Suleman Khalid, Nanyang Technological University
۶	Hiroyuki Morikawa, University of Tokyo
۷	Ngoc Tri Ngo, University of Da Nang
۸	Tin Petrovic, University of Tokyo
۹	Raghavendran Thiruvengadam, Unknown institution
۱۰	Vineeth Vijayaraghavan, Unknown institution



relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

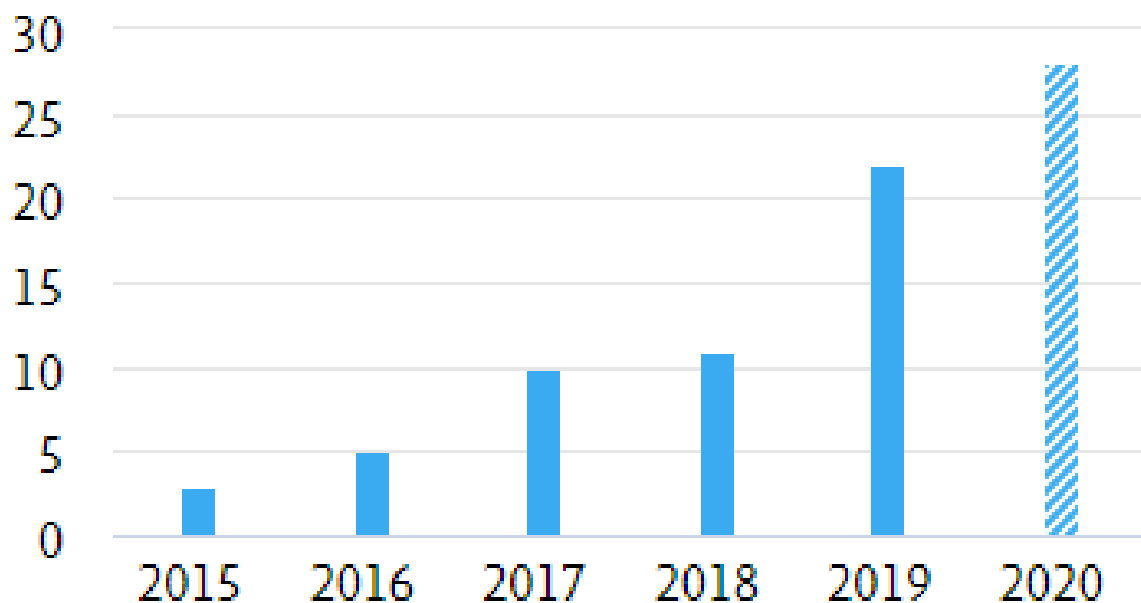
شکل ۱۲۵-۸: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته دوم در محور مدیریت پیک بار

جدول ۱۱۰-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته دوم واژگان محور مدیریت پیک بار

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques, 2019, Applied Energy	۱۰۴
۲	A novel hybrid algorithm for electricity price and load forecasting in smart grids with demand-side management, 2016, Applied Energy	۱۰۱
۳	Real time optimal schedule controller for home energy management system using new binary backtracking search algorithm, 2017, Energy and Buildings	۸۸
۴	Market-Based Coordination of Thermostatically Controlled Loads - Part I: A Mechanism Design Formulation, 2016, IEEE Transactions on Power Systems	۸۴
۵	Capacity and output power estimation approach of individual behind-the-meter distributed photovoltaic system for demand response baseline estimation, 2019, Applied Energy	۴۳
۶	Agent-Based Modeling of Retail Electrical Energy Markets with Demand Response, 2018, IEEE Transactions on Smart Grid	۴۲
۷	Energy flexible building through smart demand-side management and latent heat storage, 2018, Applied Energy	۳۶
۸	Demand response algorithms for smart-grid ready residential buildings using machine learning models, 2019, Applied Energy	۳۳

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۹	Demand-side management using deep learning for smart charging of electric vehicles, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۳۱
۱۰	Trading strategy optimization for a prosumer in continuous double auction-based peer-to-peer market: A prediction-integration model, 2019, Applied Energy	۲۴

Scholarly Output ⓘ



▨ Incomplete year ⓘ

شکل ۱۲۶-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته دوم واژگان محور مدیریت پیک بار

• دسته سوم

“Machine Learning” AND (Power OR Energy OR Electricity) AND ((Time-of-Use) OR (Real-Time Pricing) OR Incentive OR (Capacity Market Program) OR (Extreme-Day Pricing) OR (Critical Peak Pricing) OR (Demand Bidding) OR (Ancillary Services Market) OR (Direct Load Control) OR (Peak-Load Pricing) OR Contract)

پنجاه کلیدواژه اصلی، تعداد مستندات به تفکیک سال و پرارجاع‌ترین مراجع در دسته سوم به صورت شکل ۸-۱۲۸ و شکل ۸-۱۲۷ و جدول ۸-۱۱۱ به دست آمده است.



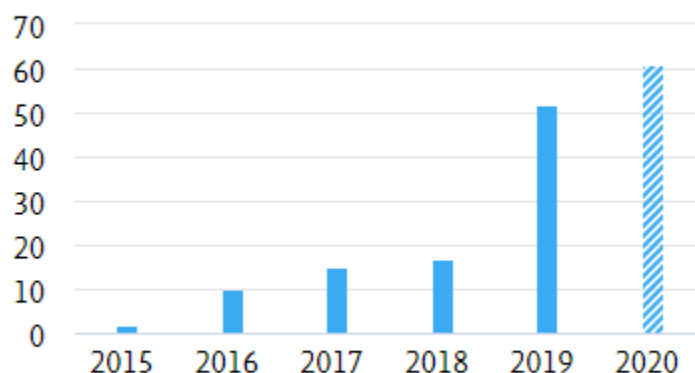
AAA relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۸-۱۲۷: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته سوم در محور مدیریت پیک بار

جدول ۱۱۱-۸: پراچاع‌ترین مراجع در دسته سوم واژگان محور مدیریت پیک بار

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Detecting stealthy false data injection using machine learning in smart grid, 2017, IEEE Systems Journal	۱۱۹
۲	Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques, 2019, Applied Energy	۱۰۵
۳	Short-term electricity demand forecasting with MARS, SVR and ARIMA models using aggregated demand data in Queensland, Australia, 2018, Advanced Engineering Informatics	۷۵
۴	Design Automation of Cyber-Physical Systems: Challenges, Advances, and Opportunities, 2017, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems	۵۷
۵	An electricity price forecasting model by hybrid structured deep neural networks, 2018, Sustainability (Switzerland)	۵۷
۶	Accelerating Materials Development via Automation, Machine Learning, and High-Performance Computing, 2018, Joule	۵۴
۷	Capacity and output power estimation approach of individual behind-the-meter distributed photovoltaic system for demand response baseline estimation, 2019, Applied Energy	۴۴
۸	Experience curve development and cost reduction disaggregation for fuel cell markets in Japan and the US, 2017, Applied Energy	۳۶
۹	Demand response algorithms for smart-grid ready residential buildings using machine learning models, 2019, Applied Energy	۳۴
۱۰	Demand-side management using deep learning for smart charging of electric vehicles, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۳۳

Scholarly Output ⓘ



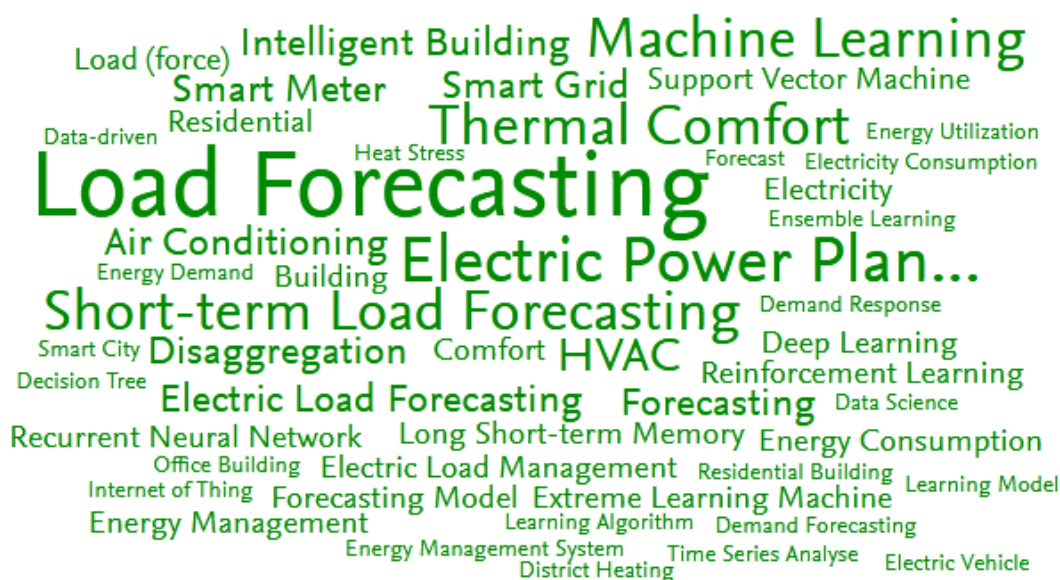
▨ Incomplete year ⓘ

شکل ۱۲۸-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته سوم واژگان محور مدیریت پیک بار

• دسته چهارم

“Machine Learning” AND (Power OR Energy OR Electricity) AND (“Flexible Load” OR “Responsive Load” OR “Customer Participation” OR “Interruptible Load” OR (Curtable Load) OR (Load Factor) OR (Load Profile Characteristic) OR (Load Forecasting) OR (Load Prediction) OR (Load Estimation) OR (Non-Intrusive load monitoring) OR HVAC OR (Thermal Comfort))

پنجاه کلیدواژه اصلی، تعداد مستندات به تفکیک سال و پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم به صورت شکل ۸-۱۲۹ و شکل ۸-۱۳۰ جدول ۸-۱۱۲ به دست آمده است.



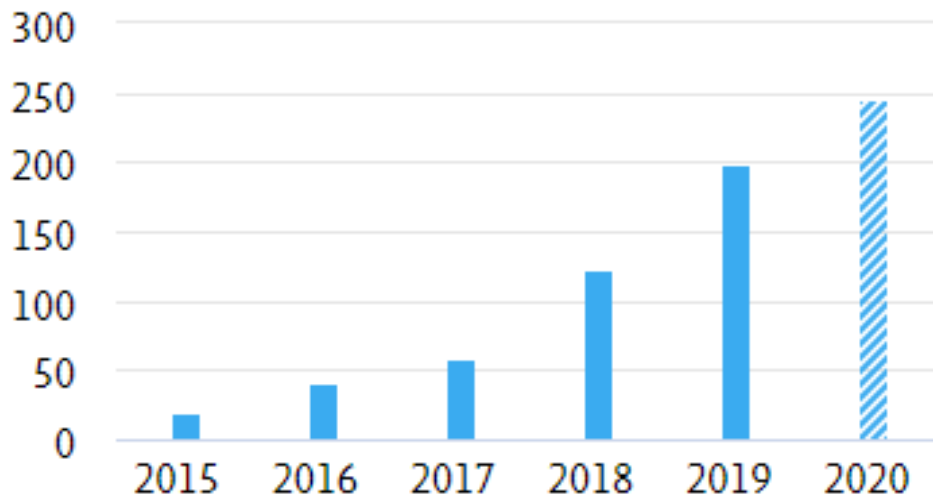
AAA relevance of keyphrase | declining AAA growing (2015-2019)

شکل ۸-۱۲۹: پنجاه کلیدواژه اصلی دسته چهارم در محور مدیریت پیک بار

جدول ۱۱۲-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در دسته چهارم واژگان محور مدیریت پیک بار

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Deep Learning for Household Load Forecasting-A Novel Pooling Deep RNN, 2018, IEEE Transactions on Smart Grid	۲۴۳
۲	A short-term building cooling load prediction method using deep learning algorithms, 2017, Applied Energy	۲۱۳
۳	Predicting electricity consumption for commercial and residential buildings using deep recurrent neural networks, 2018, Applied Energy	۱۶۸
۴	Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges, 2019, IEEE Transactions on Smart Grid	۱۶۶
۵	A review and analysis of regression and machine learning models on commercial building electricity load forecasting, 2017, Renewable and Sustainable Energy Reviews	۱۴۵
۶	Toward Non-Intrusive Load Monitoring via Multi-Label Classification, 2017, IEEE Transactions on Smart Grid	۱۳۳
۷	Optimal deep learning LSTM model for electric load forecasting using feature selection and genetic algorithm: Comparison with machine learning approaches, 2018, Energies	۱۳۲
۸	Deep neural network based demand side short term load forecasting, 2018, Energies	۱۲۵
۹	Personal comfort models: Predicting individuals' thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning, 2018, Building and Environment	۱۲۵
۱۰	A Novel RBF Training Algorithm for Short-Term Electric Load Forecasting and Comparative Studies, 2015, IEEE Transactions on Industrial Electronics	۱۲۴

Scholarly Output ⓘ



▨ Incomplete year ⓘ

شکل ۱۳۰-۸: تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته چهارم واژگان محور مدیریت پیک بار

۲-۱۰-۸- کاربردهای الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در محور "مدیریت پیک بار" و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با آن

بر اساس متن‌کاوی انجام شده در پایگاه Scopus و با استفاده از ابزار SciVal تمامی مستندات موجود در سه گروه کلیدواژه مطرح شده، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، پایگاه Google Scholar نیز به عنوان ابزار دوم برای تعیین کاربردهای الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در برنامه‌های کاهش پیک بار شبکه قدرت بررسی گردید. در نهایت، چهار گروه کاربرد به همراه موضوعات تحقیقاتی مرتبط به صورت جدول ۱۱۳-۸ به دست آمده است.

جدول ۱۱۳-۸: کاربردهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در محور مدیریت پیک بار و موضوعات تحقیقاتی مرتبط

کاربرد	موضوعات تحقیقاتی
پیش‌بینی	- پیش‌بینی و تحلیل بار ساختمان‌های مسکونی بر اساس الگوی مصرف برق و سبک زندگی ساکنان (عادات مصرف)^۱ جهت تعیین میزان مشارکت مشترکین در برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا - پیش‌بینی قیمت برق در سطح مشترکین و تجمیع‌کننده‌های پاسخگویی بار - تقسیم‌بندی یا خوشه‌بندی بار یا مصرف‌کنندگان^۲ - پیش‌بینی بار بروندی ساختمان‌ها - پایش بار لوازم خانگی (NILM)^۳ جهت تفکیک^۴ کل توان مصرفی مشترکین خانگی به توان مصرفی هر وسیله^۵ به منظور مدیریت بهینه انرژی در ساختمان با جابه‌جایی زمان استفاده از برخی از لوازم خانگی از ساعات پیک به کم‌باری (Time-of-Use) - استخراج رفتار حرارتی ساختمان با کاربرد یادگیری ماشین در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع (HVAC)^۶ ساختمان‌های هوشمند به منظور کاهش هزینه انرژی مصرفی ساختمان و مصرف برق در ساعات پیک بار ضمن برآوردن آسایش حرارتی ساکنین - برنامه‌ریزی بهینه یک ریزشبه فعال توصرف‌کننده^۷ جهت تولید، خرید یا فروش برق از یا به تجمیع‌کننده‌ها یا ریزشبه‌های مجاور با پیش‌بینی وضع هوا، بار و توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر - پیش‌بینی سولار و دیمانند الکتریسیته در سیستم‌های تولید آب گرم خانگی (DHW)^۸ در ساختمان‌های هوشمند به منظور مدیریت سمت تقاضا و عملکرد بهینه ذخیره‌ساز انرژی و حرارت - پیش‌بینی دمای هوای داخل ساختمان و توان مصرفی سیستم‌های HVAC به منظور تنظیم بهینه نقطه عملکرد آنها^۹ - پیش‌بینی تولید منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، ظرفیت پاسخگویی بار و الگوهای راندگی یا تقاضای تجمیع شده خودروهای برقی محض و هیبرید به منظور مشارکت بهینه آن‌ها در تأمین بار و پیک‌سایی - دسته‌بندی بار (به عنوان مثال، بار پایه (کنترل‌ناپذیر) و بار کنترل‌پذیر یا منعطف) به منظور تعیین نوع و ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز و همچنین تعیین اولویت بارها جهت مشارکت در طرح‌های مدیریت مصرف نظیر کاهش یا قطع بار برنامه‌ریزی صنایع
امنیت سایبر-فیزیکال	تشخیص حملات سایبری (نوع و دامنه آنها) به کنتورهای هوشمند^{۱۰}، زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته (AMI)^{۱۱} و لینک‌های مخابراتی که در قرائت خودکار مصرف، مدیریت سمت تقاضا و قیمت‌گذاری Time-of-Use تأثیرگذارند.

Usage habits^۱

Load/consumer segmentation or clustering^۲

Load disaggregation^۳

Nonintrusive Appliance Load Monitoring (NILM)^۴

Appliance-level power consumption^۵

Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) systems^۶

Prosumer^۷

Domestic Hot Water (DHW)^۸

Set point^۹

Smart meters^{۱۰}

Advanced Metering Infrastructure (AMI)^{۱۱}

طراحی برنامه‌های تشویقی محور برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا	• طراحی برنامه‌های تشویقی محور (تعیین نرخ‌های تشویقی در هر ساعت جهت ماکزیمم کردن سود تولیدکنندگان^۱ و مصرف‌کننده نهایی^۲ با پیش‌بینی قیمت برق عمده‌فروشی روز بعد و توان تولیدی فتوولتائیک و بار) • پاسخگویی بار در ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی با مدلسازی تعامل استراتژیک بین ایستگاه و کاربران (تعیین قیمت بهینه شارژ به منظور بهینه‌سازی درآمد بلندمدت ایستگاه‌های شارژ و رفاه اجتماعی کاربران) • پیش‌بینی ظرفیت برنامه‌های قطع بار^۳ به منظور کاهش هرگونه انحرافات از ظرفیت برنامه‌ریزی شده پاسخگویی بار (DR)^۴ به ویژه برای ساختمان‌های بزرگ • بهینه‌سازی استراتژی تجارت انرژی توصیف‌کننده‌ها در بازارهای هم‌تا به هم‌تا^۵ • مطالعه رفتار بازارهای انرژی الکتریکی خرده‌فروشی زمان – واقعی یا روز پیش‌رو^۶ با DR مبتنی بر قیمت
داده‌کاوی	تحلیل حجم زیاد اطلاعات ^۷ جمع‌آوری شده از کتورهای هوشمند به منظور استخراج الگوی بار

۸-۱۱- متن کاوی در حوزه "مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت"

۸-۱۱-۱- معرفی کلیدواژه‌های محور پژوهشی "مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت"

گسترش و فراوانی مستندات علمی پیرامون مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت، شاهی بر اهمیت مطالعات این محور است. در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی حدود ۵۰۰ مستندات علمی (با محدود نمودن نتایج جستجوها در حوزه‌های Energy, Computer Science و Engineering) پیرامون مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت انتشار یافته است که بیانگر توجه بالای پژوهشگران به این حوزه است. حوزه‌ها و موضوعات متنوعی در ارتباط با مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت وجود دارد؛ بنابراین، زمانی که پیرامون مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت صحبت می‌شود، ممکن است هر یک از این حوزه‌ها و موضوعات مورد نظر باشد. جهت بسترسازی برای پرداختن به بررسی کاربردهای فناوریانه یادگیری ماشین در مطالعات مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت، مهم‌ترین مفاهیم مرتبط به مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت در شکل ۸-۱۳۱ و جدول ۸-۱۱۴ آمده است.

^۱Energy service providers

^۲End-users

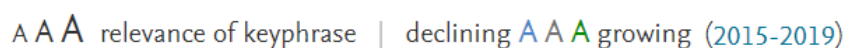
^۳Load curtailment based demand response capacity

^۴Demand Response (DR)

^۵Peer-to-Peer (P2P)

^۶Day-ahead

^۷Big data



جدول ۱۱۴-۸: مهم‌ترین مفاهیم مرتبط با مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت

موضوع	ردیف	موضوع	ردیف
Smart grid	۶	Power transformer	۱
aging	۷	Condition monitoring	۲
Life cycle management	۸	Partial discharge	۳
Maintenance reliability	۹	Circuit breaker	۴
Insulation	۱۰	Preventive maintenance	۵

("asset management" OR "infrastructure asset" OR "physical asset" OR "asset maintenance" OR "Power System Maintenance" OR "Equipment Life Cycle") AND ("electric power transmission system" OR "electric power distribution system" OR "power system" OR "transformer" OR "substation" OR "synchronous generator" OR "power plant" OR "distributed energy resource" OR "electric distribution network" OR "circuit breaker")

برای نمونه، ۱۵ مستند علمی برتر در زمینه مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت که بیشترین استناد را داشته‌اند، در جدول ۸-۱۱۵ نشان داده است.

جدول ۱۱۵-۸: پرارجاع‌ترین مراجع در حوزه مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Hybrid: Particle Swarm Optimization-Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization-Shuffled Frog Leaping Algorithm for long-term generator maintenance scheduling, 2015, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۴۸
۲	Smart transformer for smart grid - Intelligent framework and techniques for power transformer asset management 2015, IEEE, Transactions on Smart Grid	۴۴
۳	Intelligent engineering asset management system for power transformer maintenance decision supports under various operating conditions, 2015, Computers and Industrial Engineering	۳۷
۴	Smart Maintenance Decision Support Systems (SMDSS) based on corporate big data analytics, 2017, Expert Systems with Applications	۳۵
۵	Reliability modeling and availability analysis of combined cycle power plants, 2016, International Journal of Electrical Power and Energy Systems	۳۴
۶	Reliability, availability and maintainability study for failure analysis in series capacitor bank, 2018, Engineering Failure Analysis	۳۲
۷	Fuzzy logic approach for transformer remnant life prediction and asset management decision, 2016, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	۳۲
۸	Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies, 2019, Reliability Engineering and System Safety	۲۹
۹	Improved transformer maintenance plan for reliability centred asset management of power transmission system, 2016, IET Generation, Transmission and Distribution	۲۸
۱۰	Nonparametric regression-based failure rate model for electric power equipment using lifecycle data, 2015, IEEE Transactions on Smart Grid	۲۵
۱۱	Electrical Assessment by Lightning Phenomenon in Power Lines of Double Circuit, 2016, IEEE Latin America Transactions	۲۴
۱۲	Probabilistic Reliability Management Approach and Criteria for power system real-time operation, 2016, 19th Power Systems Computation Conference, PSCC 2016	۲۴
۱۳	Partial discharge diagnostic system for smart distribution networks using directionally calibrated induction sensors, 2015, Electric Power Systems Research	۲۴
۱۴	Determining Optimal Inspection Intervals in Maintenance Considering Equipment Aging Failures, 2017, IEEE Transactions on Power Systems	۲۳

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱۵	A multi-objective optimization framework for energy and asset management in an industrial Microgrid, 2016, Journal of Cleaner Production	۲۳

مطابق نتایج متن کاوی و با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده که بالاتر بیان شده، نویسندگان زیر به ترتیب بیشترین مستندات دانشی را در این حوزه منتشر نموده‌اند:

- 1) Hilber, P.
- 2) Khodaei, A.
- 3) Wang, Z.
- 4) Jarman, P.
- 5) Liu, Q.
- 6) Medina, R.D.
- 7) Ozdemir, A.
- 8) Romero, A.A.
- 9) Trkulja, B.
- 10) Fotuhi-Firuzabad, M.

همچنین، مؤسسات زیر بیش‌ترین انتشارات را در این حوزه داشته‌اند.

- 1) KONČAR - Institut za elektrotehniku, d.d.
- 2) The University of Manchester
- 3) The Royal Institute of Technology KTH
- 4) University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing
- 5) National Grid
- 6) Universidad Nacional de San Juan
- 7) Universidad Nacional de Colombia
- 8) University of Denver
- 9) Siemens AG Österreich
- 10) State Grid Corporation of China
- 11) Hydro-Quebec

ده کشور برتر از نظر تعداد انتشارات در این حوزه نیز به شرح زیر هستند:

- (۱) آمریکا
- (۲) چین
- (۳) بریتانیا
- (۴) کرواسی
- (۵) کانادا
- (۶) هند
- (۷) آلمان
- (۸) استرالیا
- (۹) سوئد
- (۱۰) ایتالیا

طبق رویه انتخاب شده جهت متن‌کاوی متون علمی و استخراج روند مطالعات انجام شده پیرامون مطالعات مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت، در ابتدا بایستی واژگان کلیدی مورد نظر جهت انجام متن‌کاوی انتخاب و معرفی شود. طبیعی است با تغییر واژگان کلیدی نتایج ارائه شده نیز متفاوت خواهد بود، اما سعی شده که واژگان کلیدی انتخابی علاوه بر اینکه در مستندات علمی شناخته شده باشند، تا حد امکان با زیرمجموعه‌های تخصصی محور مورد نظر نیز متناظر و مرتبط بوده باشند. واژگان کلیدی انتخابی برای محور مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت در سه دسته به صورت زیر تقسیم‌بندی شده‌اند. لازم به ذکر است که به دلیل تعداد بسیار کم مستندات این حوزه پژوهشی، علاوه بر عبارت کلیدی "machine learning" از عبارت کلیدی "artificial intelligence" هم استفاده شده است. این دو عبارت کلیدی با یکدیگر به صورت منطقی OR شده‌اند.

❖ دسته اول:

("machine learning" OR "artificial intelligence") AND ("asset management" OR "infrastructure asset" OR "physical asset" OR "asset maintenance") AND ("electric power transmission system" OR "electric power distribution system" OR "power system" OR transformer OR substation OR "synchronous generator" OR "power plant" OR "distributed energy resource" OR "electric distribution network" OR "circuit breaker")

❖ دسته دوم:

("machine learning" OR "artificial intelligence") AND "life cycle" AND ("electric power transmission system" OR "electric power distribution system" OR "power system" OR transformer OR substation OR "synchronous generator" OR "power plant" OR "distributed energy resource" OR "electric distribution network" OR "circuit breaker")

❖ دسته سوم:

("machine learning" OR "artificial intelligence") AND ("electric power transmission system" OR "electric power distribution system" OR "power system" OR transformer OR substation OR "synchronous generator" OR "power plant" OR "distributed energy resource" OR "electric distribution network" OR "circuit breaker") AND ("operation and maintenance" OR inspection)

در ادامه به ارائه نتایج به‌دست آمده با استفاده از ابزار علم‌سنجی SciVal و به کمک متن‌کاوی انجام شده به‌وسیله نمایه استنادی Scopus برای واژگان و عبارات کلیدی انتخابی می‌پردازیم. شایان ذکر است مقیاس زمانی مورد مطالعه در این تحقیق بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی بوده است. همچنین جهت استخراج تحقیقات علمی پیرامون کاربردهای فناورانه یادگیری ماشین مرتبط با واژگان کلیدی مورد نظر، واژه‌های "یادگیری ماشین" یا "هوش مصنوعی" به صورت منطقی با واژه کلیدی مد نظر AND شده است.

یادآور می‌شود که مجموعه جستجوها در "عنوان"، "چکیده" یا "کلیدواژه"های مستندات علمی موجود انجام شده است.

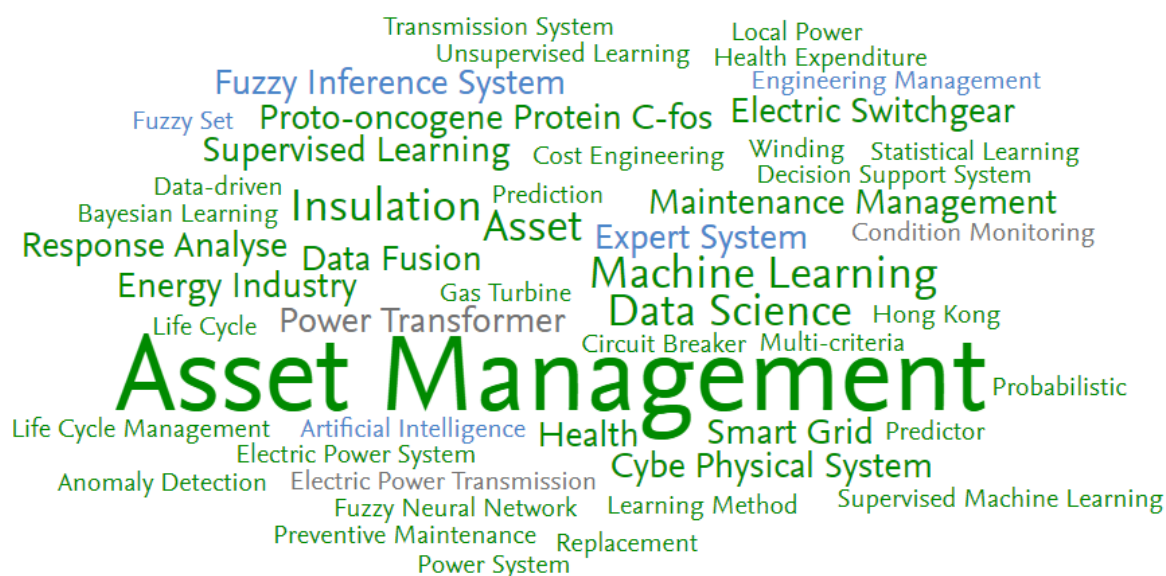
❖ دسته اول: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

("machine learning" OR "artificial intelligence") AND ("asset management" OR "infrastructure asset" OR "physical asset" OR "asset maintenance") AND ("electric power transmission system" OR "electric power distribution system" OR "power system" OR transformer OR substation OR "synchronous generator" OR "power plant" OR "distributed energy resource" OR "electric distribution network" OR "circuit breaker")

با محدود نمودن مطالعات حوزه مطالعات مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت در زمینه Machine و learning و یا Artificial intelligence، تعداد ۲۱ مستند (با در نظر داشتن محدودیت‌های اشاره شده در بخش‌های پیشین) شناسایی شدند. در جدول ۸-۱۱۶، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل ۸-۱۳۲ نشان‌دهنده کلیدواژه‌های اصلی در دسته اول است. پراچا‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۱۱۷ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در دسته اول در شکل ۸-۱۳۳ نشان داده شده است.

جدول ۸-۱۱۶: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	University of Manchester
۲	National Grid
۳	American University of Sharjah
۴	Research Organization of Information and Systems National Institute of Informatics
۵	University of Denver
۶	École de technologie supérieure
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Alqudsi, Alhaytham Y., École de technologie supérieure
۲	Fieldsend-Roxborough, Andrew, National Grid
۳	Jarman, Paul N., University of Manchester
۴	Mao, Xiaozhou, University of Manchester
۵	Wang, Zhongdong, University of Manchester
۶	El-Hag, Ayman H., University of Waterloo
۷	Hilber, Patrik, KTH Royal Institute of Technology
۸	Ichise, Ryutaro, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
۹	Khodaei, Amin, University of Denver
۱۰	Kozziel, Sylvie, KTH Royal Institute of Technology

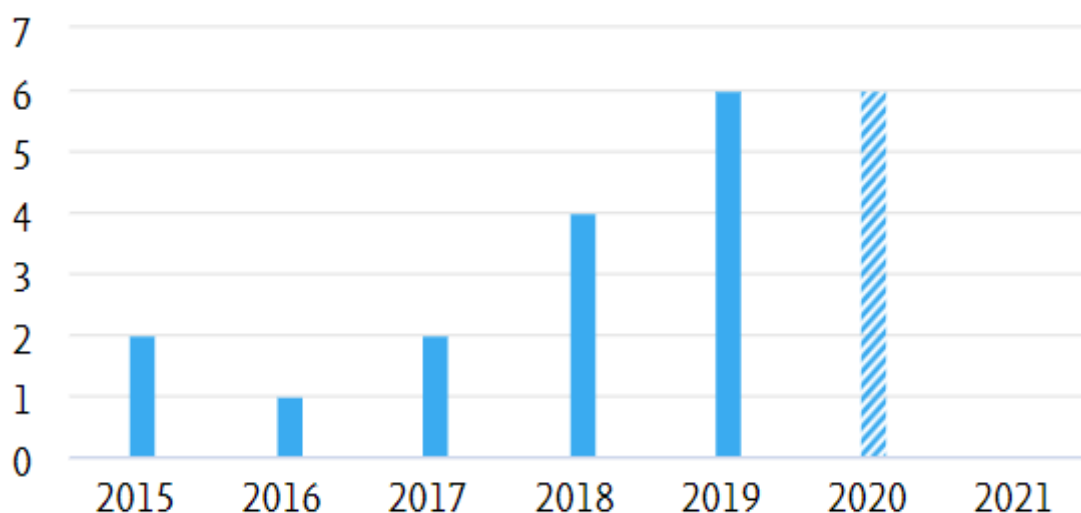


شکل ۱۳۲-۸: کلیدواژه اصلی، در دسته اول محور مدیریت دارایی، در سیستم‌های قدرت

جدول ۱۱۷-۸: پراچاع‌ترین مراجع در دسته اول محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Smart Maintenance Decision Support Systems (SMDSS) based on corporate big data analytics, 2017, Expert Systems with Applications	۳۵
۲	Expert system for engineering assets' management of utility companies, 2015, Proceedings - SDEMPED 2015: IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives	۲۳
۳	Multicriteria transformer asset management with maintenance and planning perspectives, 2016, IET Generation, Transmission and Distribution	۱۳
۴	Artificial intelligence based thermographic approach for high voltage substations risk assessment, 2015, IET Generation, Transmission and Distribution	۸
۵	Assessing the power transformer insulation health condition using a feature-reduced predictor mode, 2018, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	۷
۶	Attack Detection for Securing Cyber Physical Systems, 2019, IEEE Internet of Things Journal	۶
۷	Application of machine learning in transformer health index prediction, 2019, Energies	۳

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۸	A cost-effective artificial intelligence-based transformer insulation health index, 2018, 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, CATCON 2017 - Proceedings	۳
۹	Data Fusion and Machine Learning Integration for Transformer Loss of Life Estimation, 2018, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference	۲
۱۰	Machine learning applications in estimating transformer loss of life, 2018, IEEE Power and Energy Society General Meeting	۲



شکل ۱۳۳-۸: تعداد اسناد به تفکیک سال در دسته اول محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

❖ دسته دوم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

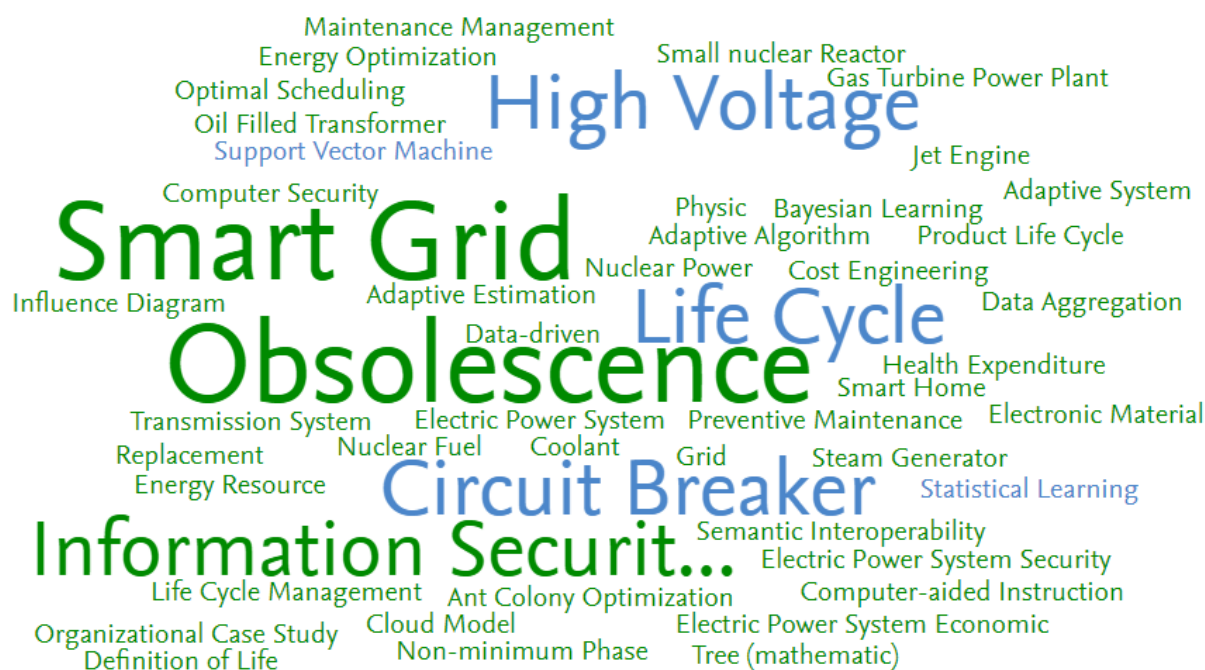
("machine learning" OR "artificial intelligence") AND "life cycle" AND ("electric power transmission system" OR "electric power distribution system" OR "power system" OR transformer OR substation OR "synchronous generator" OR "power plant" OR "distributed energy resource" OR "electric distribution network" OR "circuit breaker")

در جدول ۱۱۸-۸، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۳۴-۸ کلیدواژه‌های اصلی در دسته دوم نشان داده شده است. مراجع موجود در این دسته نیز بسیار محدود هستند و در جدول ۱۱۹-۸ نوشته شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۱۳۵-۸ نشان داده شده است.

جدول ۱۱۸-۸: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته دوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر

ردیف	نام مؤسسه
۱	Technische Universität Darmstadt
۲	Power China Huadong Engineering Corporation Limited
۳	Perusahaan Listrik Negara
۴	Pennsylvania State University
مؤلفان برتر	
ردیف	مؤلف
۱	Ayu, K.
۲	Yunusa-Kaltungo, A.
۳	Rhein, A.
۴	Balzer, G.
۵	Renz, P.



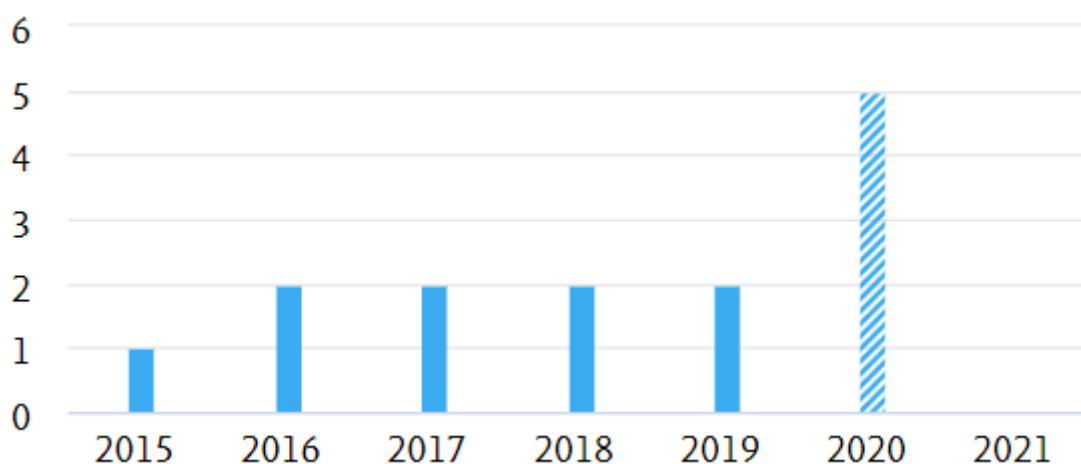
relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۱۳۴-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته دوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

جدول ۱۱۹-۸: مراجع موجود در دسته دوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	Forecasting obsolescence risk and product life cycle with machine learning, 2016, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology	۱۸
۲	Method of Data storing, collection and aggregation for definition of life-cycle resources of electromechanical equipment, 2017, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	۱۲
۳	Mechanical life prognosis of high voltage circuit breaker based on support vector machine, 2015, Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus	۱۲
۴	The cloud model theory of intelligent control method for non-minimum-phase and non-self-balancing system in nuclear power, 2018, International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE	۲
۵	Reliability-based improvement of life-cycle maintenance and replacement strategies in transmission systems using ant colony optimization, 2017, 2017 6th International Youth Conference on Energy, IYCE 2017	۲
۶	Optimal scheduling of power transformers preventive maintenance with Bayesian statistical learning and influence diagrams, 2020, Journal of Cleaner Production	۱
۷	Hybrid Data-Driven and Physics-Based Modelling for Prescriptive Maintenance of Gas-Turbine Power Plant, 2019, IFIP Advances in Information and Communication Technology	۱
۸	Pump bearing fault detection based on EMD and SVM, 2018, International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE	۱
۹	Semantic interoperability for holonic energy optimization of connected smart homes and distributed energy resources, 2016, eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the 11th European Conference on Product and Process Modelling, ECPPM 2016	۱
۱۰	The Life Cycle Integrated Management and Control Platform for Smart Hydropower Stations, 2020, Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, AEECA 2020	۰
۱۱	Fastest adaptive estimation algorithms for topological structure errors in smart grid networks, 2020, Computer Communications	۰
۱۲	Machine learning application for the high-voltage equipment lifecycle forecasting, 2020, 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2020 - Proceedings	۰
۱۳	A holistic framework for supporting maintenance and asset management life cycle decisions for power systems, 2020, Energies	۰

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱۴	An Information Security Prevention System of Power Grid Enterprises Based on Artificial Intelligence, 2019, Proceedings of 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization, IICSPI 2018	.



شکل ۱۳۵-۸: تعداد اسناد به تفکیک سال در دسته دوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

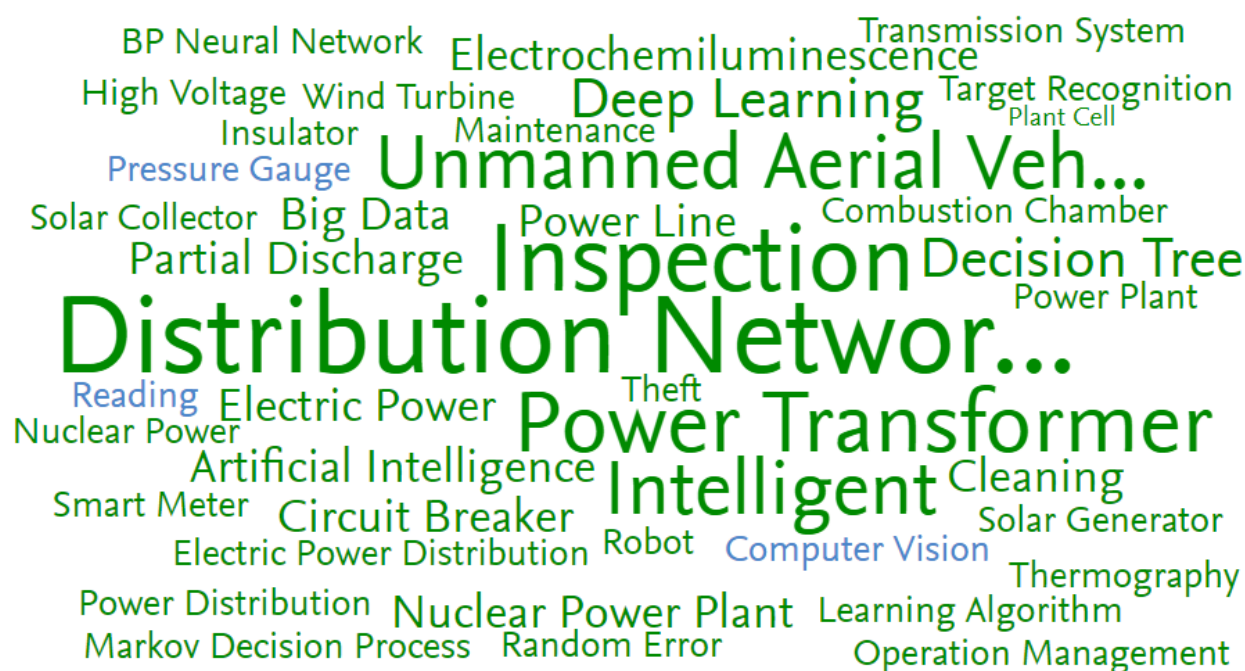
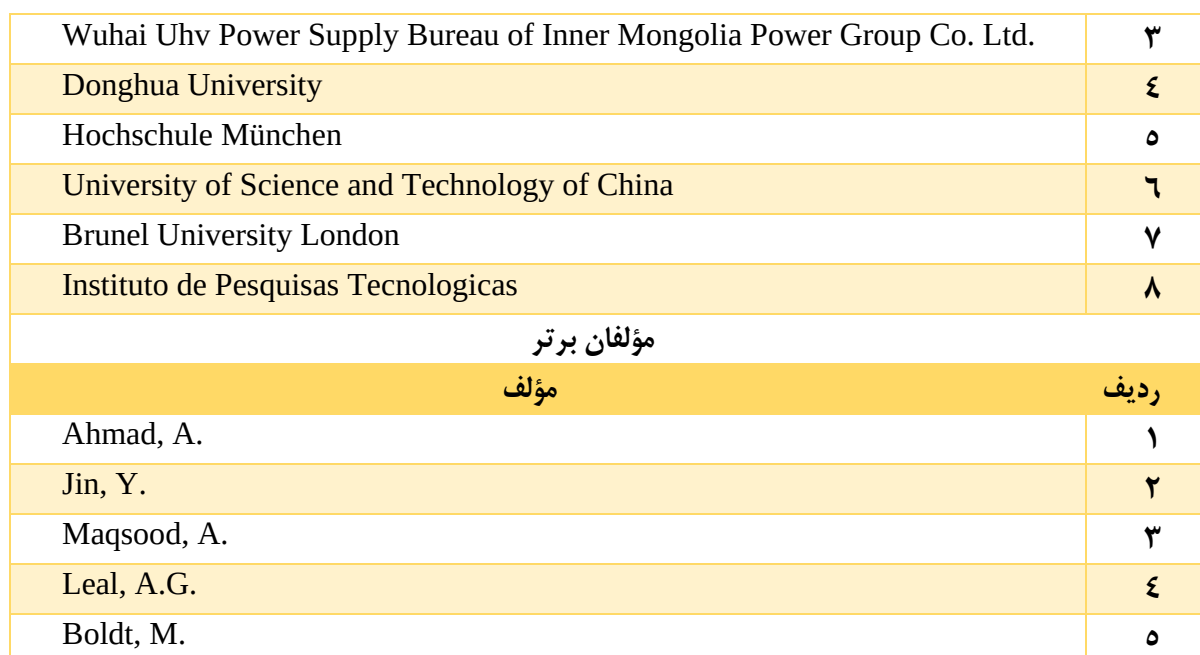
❖ دسته سوم: نتایج حاصل با استفاده از جستجوی کلیدواژه

("machine learning" OR "artificial intelligence") AND ("electric power transmission system" OR "electric power distribution system" OR "power system" OR transformer OR substation OR "synchronous generator" OR "power plant" OR "distributed energy resource" OR "electric distribution network" OR "circuit breaker") AND ("operation and maintenance" OR inspection)

در جدول ۸-۱۲۰، مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته اول نشان داده شده‌اند. در شکل ۸-۱۳۶ کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم نشان داده شده است. پرارجاع‌ترین مراجع در این دسته نیز در جدول ۸-۱۲۱ اشاره شده‌اند. همچنین، تعداد مستندات به تفکیک سال در این دسته در شکل ۸-۱۳۷ نشان داده شده است.

جدول ۸-۱۲۰: مؤسسات برتر و مؤلفان شاخص در دسته سوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

مؤسسات برتر	
ردیف	نام مؤسسه
۱	Zhejiang University
۲	State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company

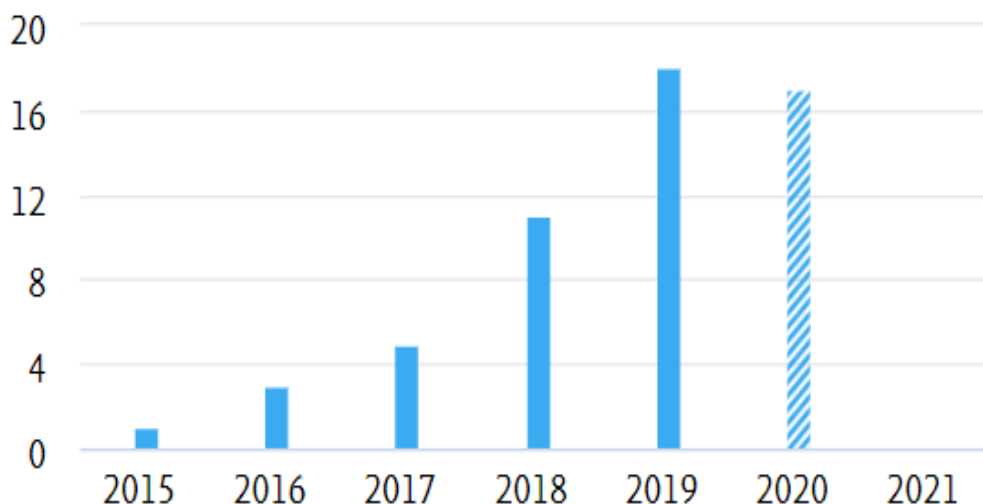


A A A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2015-2019)

شکل ۱۳۶-۸: کلیدواژه‌های اصلی در دسته سوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

جدول ۱۲۱-۸: پراچاع‌ترین مراجع در دسته سوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

ردیف	عنوان	تعداد کل ارجاعات
۱	A reinforcement learning framework for optimal operation and maintenance of power grids, 2019, Applied Energy	۲۸
۲	SCADA-based wind turbine anomaly detection using Gaussian process models for wind turbine condition monitoring purposes, 2018, IET Renewable Power Generation	۲۷
۳	Predictive maintenance of power substation equipment by infrared thermography using a machine-learning approach, 2017, Energies	۲۱
۴	One-class extreme learning machines for gas turbine combustor anomaly detection, 2016, Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks	۱۶
۵	Fault diagnosis of insulators from ultrasound detection using neural networks, 2019, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems	۱۰
۶	Robot unit for cost and time balance using automatic inspection on overhead lines, 2017, Proceedings of the 2016 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2016	۱۰
۷	On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants, 2018, Procedia Computer Science	۹۷
۸	An early warning method of transmission line galloping based on BP neural network, 2017, Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control	۷
۹	Design and Testing on Autonomous Multi-UAV Cooperation for High-voltage Transmission Line Inspection, 2017, Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	۶
۱۰	Analysis of training techniques of ANN for classification of insulators in electrical power systems, 2020, IET Generation, Transmission and Distribution	۶



شکل ۱۳۷-۸: تعداد اسناد به تفکیک سال در دسته سوم محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

۲-۱۱-۸- کاربردهای الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در محور "مدیریت دارایی سیستم‌های قدرت" و موضوعات تحقیقاتی مرتبط با آن

بر اساس متن‌کاوی انجام شده در پایگاه Scopus و با استفاده از ابزار SciVal تمامی مستندات موجود در سه گروه کلیدواژه مطرح شده، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، پایگاه Google Scholar نیز به عنوان ابزار دوم برای تعیین کاربردهای الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در زمینه مدیریت دارایی سیستم‌های قدرت بررسی گردید. در نهایت، دو گروه کاربرد به همراه موضوعات تحقیقاتی مرتبط به صورت جدول ۱۲۲-۸ به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کاربردهایی که تاکنون برای یادگیری ماشین در زمینه مدیریت دارایی و منابع سیستم‌های قدرت معرفی شده، بسیار محدود هستند و عمدتاً مربوط به پیاده‌سازی روش‌هایی هوشمند برای تخمین عمر از دست رفته تجهیزات و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری آن‌ها می‌باشند.

جدول ۱۲۲-۸: کاربردهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در محور مدیریت دارایی در سیستم‌های قدرت

کاربرد	موضوع تحقیقاتی
چرخ حیات ^۱ و عمر از دست رفته ^۲	○ تخمین عمر از دست رفته تجهیزات قدرت مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری الکتریکی و مکانیکی و یا پردازش انواع تصاویر مانند حرارتی و غیره ○ تشخیص خرابی فیزیکی تجهیزات شبکه‌های برق ■ نوع و مکان خرابی در ترانسفورماتور ■ نوع و مکان خرابی در ژنراتور ■ ...

^۱ Life cycle

^۲ Loss of life

○ مدیریت و کنترل هوشمند چرخه حیات شبکه برق ○ تخمین شاخص سلامتی فیزیکی تجهیزات شبکه برق ○ دسته‌بندی خرابی‌های فیزیکی ممکن برای هر یک از تجهیزات شبکه برق		
○ برنامه‌ریزی تعمیرات هوشمند و پیشگیرانه تجهیزات شبکه‌های برق ▪ ترانسفورماتور ▪ کلید قدرت ▪ ... و ...	○	برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری هوشمند و پیشگیرانه

۸-۱۲- پیشنهاد روند تحقیقات

با توجه به نتایج حاصل از بخش قبل، مهم‌ترین کارهای انجام‌شده با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در حوزه‌های مختلف مطالعاتی سیستم قدرت را می‌توان به پنج دسته کلی زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- تشخیص و شناسایی

۲- تحلیل و دسته‌بندی

۳- پیش‌بینی و تخمین

۴- کنترل و بهینه‌سازی

۵- مدل‌سازی و طراحی شبیه‌ساز

با جمع‌بندی مطالعات این فاز از پروژه، موضوعات تحقیقاتی پیشنهادی برای کاربرد روش‌های یادگیری ماشین در حوزه مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت برای هریک از دسته‌های پنج‌گانه بالا به شرح زیر می‌باشد:

تشخیص و شناسایی

- شناسایی و مکان‌یابی خطا
- ارزیابی حملات تأخیر زمانی
- شناسایی داده‌های اشتباه
- تشخیص حملات تزریق داده‌های اشتباه
- تشخیص جزیره‌ای شدن
- تشخیص تلفات غیرفنی در شبکه مانند برق‌دزدی
- تشخیص دلیل خطا

تحلیل و دسته‌بندی

- تحلیل و دسته‌بندی رخدادها
- دسته‌بندی اغتشاشات کیفیت توان
- تحلیل داده‌ها
- تفکیک یا خوشه‌بندی بار
- تحلیل همبستگی شرایط آب‌وهوایی و تولید واحدهای تجدیدپذیر

- دسته‌بندی وضعیت بهره‌برداری سیستم قدرت

پیش‌بینی و تخمین

- پیش‌بینی سرعت (توان) باد
- پیش‌بینی تابش (توان) خورشید
- پیش‌بینی قیمت برق
- پیش‌بینی بار
- پیش‌بینی تعرفه‌ها در برنامه‌های مدیریت مصرف
- پیش‌بینی رفتار مصرف‌کننده در مدیریت هوشمند انرژی
- پیش‌بینی رخدادها در شبکه‌های برق
- پایش خطای تجهیزات در شبکه هوشمند

کنترل و بهینه‌سازی

- کنترل تولید و بهینه‌سازی شبکه توزیع فعال
- تصمیم‌گیری در سیستم‌های سایر-فیزیکی
- مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی
- تعیین استراتژی جزیره‌ای کردن شبکه
- توزیع اقتصادی بار
- پخش توان بهینه
- فرآیند بازیابی سیستم

مدل‌سازی و طراحی شبیه‌ساز

- مدل‌سازی بازارهای معاملات انرژی
- مدل‌سازی بازارهای مبتنی بر قراردادهای دوجانبه
- شبیه‌ساز بازار
- مدل‌سازی بازار خرده‌فروشی

۸-۱۳- ذی‌نفعان پروژه

موضوعات تحقیقاتی مبتنی بر یادگیری ماشین مربوط به محورهای مختلف پژوهشی مطالعات سیستم‌های قدرت در بخش‌های قبل معرفی و بررسی شد. به‌منظور تعیین ذی‌نفعان پروژه انجام‌شده، در ابتدا کنشگران مرتبط با این پروژه مورد بررسی قرار می‌گیرند و پس از آن، نهادهایی که می‌توانند از نتایج این پروژه بهره‌مند شوند، معرفی خواهند شد.

۸-۱۳-۱- معرفی کنشگران مرتبط با پروژه

کنشگران هر صنعت مجموعه‌ای از نهادهای دولتی و خصوصی هستند که فعالیت‌ها و تعاملات آن‌ها، موجب شکل‌گیری، اصلاح و توسعه صنعت مورد نظر می‌شود. به‌طور کلی کنشگران صنعت را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود که در ادامه هر یک از آن‌ها معرفی و توضیح داده می‌شود.

۱- سیاست‌گذار^۱:

سیاست‌گذار نهادی است که برنامه‌هایی که باید توسط نهادهای موجود در صنعت مورد نظر دنبال شود را تعیین می‌کند. این نهاد از سیاست‌گذاری به عنوان یک فرآیند برای دستیابی به چشم‌انداز مورد نظر خود استفاده می‌کند.

۲- تنظیم‌کننده^۲:

تنظیم‌کننده نهادی است که با استفاده از ابزارهای در دسترس خود، شرایط را برای پیاده‌سازی سیاست‌های مورد نظر سیاست‌گذار مهیا می‌کند. از جمله این ابزارها می‌توان به تعیین مسئولیت‌ها و حقوق نهادها، تنظیم استانداردها، نظارت، حل دعاوی، صدور مجوزها و اطلاع‌رسانی اشاره کرد.

۳- تسهیل‌کننده:

نهادی است که معمولاً توسط دولت حمایت می‌شود و هدف آن آماده‌سازی شرایط برای ارائه بهتر خدمات است. از جمله کارکردهای تسهیل‌کننده می‌توان به آموزش، حمایت‌های مالی و غیر مالی و ارائه تجربیات اشاره نمود.

۴- ارائه‌کننده خدمات:

این نهاد، به ارائه خدمات برای جامعه هدف سیاست‌گذاری‌ها می‌پردازد. ارائه‌کنندگان خدمات می‌توانند به ارائه خدمات آموزشی و پژوهشی و یا خدمات مشاوره‌ای بپردازند. دسته اول شامل دانشگاه‌ها، پژوهشگاه‌ها و مؤسساتی هستند که در زمینه آموزش و پژوهش در حوزه دانشی مربوطه فعالیت می‌کنند و دسته دوم شامل نهادهایی می‌شوند که به ارائه خدمات مشاوره‌ای در آن حوزه دانشی می‌پردازند.

در ادامه نهادهای کنشگر مرتبط با این پروژه که می‌توانند در به ثمر رسیدن موضوعات تحقیقاتی تعیین‌شده، نقش داشته باشند ذکر شده و نقش آن‌ها نیز در داخل پرانتز بیان شده است:

- مجلس شورای اسلامی (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری، ارائه‌کننده خدمات آموزشی و پژوهشی)
- مجمع تشخیص مصلحت نظام (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری، ارائه‌کننده خدمات آموزشی و پژوهشی)
- وزارت علوم، تحقیقات و فن‌آوری (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری)
- معاونت علمی و فن‌آوری ریاست جمهوری (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری)
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور (سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری)
- سازمان پدافند غیرعامل (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری)
- سازمان ملی استاندارد ایران (تنظیم‌گری)
- سازمان حفاظت محیط زیست (سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری)
- معاونت برق و انرژی وزارت نیرو (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری)
- معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی وزارت نیرو (سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری)
- شرکت توانیر (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری)
- شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی ایران (سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری)
- شرکت مدیریت شبکه برق ایران (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری)
- شرکت‌های برق منطقه‌ای (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری)
- شرکت‌های توزیع نیروی برق (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری)
- ساتبا (سیاست‌گذاری، تسهیل‌گری، تنظیم‌گری)

^۱ Policy maker

^۲ Regulator

- پژوهشگاه نیرو (تسهیل‌گری، تنظیم‌گری، ارائه‌کننده خدمات آموزشی و پژوهشی، ارائه‌کننده خدمات مشاوره‌ای)
- دانشگاه‌ها (تسهیل‌گری، تنظیم‌گری، ارائه‌کننده خدمات آموزشی و پژوهشی، ارائه‌کننده خدمات مشاوره‌ای)
- مراکز رشد (پارک‌های علم و فن‌آوری) و شرکت‌های دانش‌بنیان (تسهیل‌گری، ارائه‌کننده خدمات آموزشی و پژوهشی، ارائه‌کننده خدمات مشاوره‌ای)
- شرکت‌های مهندسی مشاور (ارائه‌کننده خدمات مشاوره‌ای)

۲-۱۳-۸- معرفی نهادهای ذی‌نفع از پروژه

بر اساس مطالعات انجام‌شده در این پروژه، موضوعات تحقیقاتی مستخرج به پنج دسته زیر تقسیم‌بندی شده است:

- ۱- تشخیص و شناسایی
- ۲- تحلیل و دسته‌بندی
- ۳- پیش‌بینی و تخمین
- ۴- کنترل و بهینه‌سازی
- ۵- مدل‌سازی و طراحی شبیه‌ساز

با بررسی شرح وظایف نهادهای مختلفی که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در صنعت برق ایران قرار دارند، می‌توان نهادهای ذی‌نفع از هر کدام از دسته موضوعات فوق را تعیین نمود. جمع‌بندی نهادهای ذی‌نفع از دسته موضوعات تحقیقاتی در جدول ۱۲۳-۸ ارائه شده است.

نهادهایی مثل مجلس شورای اسلامی و مجمع تشخیص مصلحت نظام به‌طور مستقیم در صنعت برق ایران حضور ندارند، اما با کمک زیرمجموعه‌های پژوهشی خود، به ارائه گزارش‌های دوره‌ای از ارزیابی صنعت برق می‌پردازند. بنابراین تعدادی از موضوعات تحقیقاتی زیر مجموعه دسته تشخیص و شناسایی و همچنین پیش‌بینی و تخمین می‌تواند برای این نهادها مفید باشد.

سازمان پدافند غیر عامل نیز به‌طور مستقیم در صنعت برق حضور ندارد، اما با توجه به قابلیت‌های یادگیری ماشین در ارزیابی داده‌ها و همچنین تشخیص داده‌های اشتباه و حملات سایبری، تعدادی از عناوین زیر مجموعه تشخیص و شناسایی می‌توانند برای این سازمان کاربردی باشند.

به‌طور مشابه، سازمان حفاظت محیط زیست نیز به‌طور مستقیم در صنعت برق حضور ندارد، اما سیاست‌ها و مقررات زیست‌محیطی تأثیرات قابل توجه و مستقیمی بر صنعت برق دارد. قابلیت‌های پیش‌بینی یادگیری ماشین مانند پیش‌بینی سرعت باد، تابش خورشید و شرایط آب و هوایی می‌تواند برای این نهاد مفید باشد.

معاونت برق و انرژی وزارت نیرو به دلیل داشتن وظایفی از جمله، سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی کلان و نظارت بر اجرای طرح‌های توسعه در حد حصول اطمینان از تأمین برق مورد نیاز، ایجاد و توسعه رقابت در بخش‌های مختلف صنعت برق و تشویق و حمایت از سرمایه‌گذاری بخش غیردولتی در صنعت برق می‌تواند از تعدادی از موضوعات تحقیقاتی مستخرج بهره‌مند شود. از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به دسته‌های تشخیص و شناسایی، پیش‌بینی و تخمین و مدل‌سازی و طراحی شبیه‌ساز اشاره کرد.

معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی وزارت نیرو نیز به دلیل داشتن مسئولیت‌هایی از جمله تدوین و استقرار سیاست‌های توسعه رقابت در بازارهای آب و برق، تدوین سیاست‌های راهبری بازار آب و برق و تدوین سیاست‌های تشویقی و حمایت از بخش خصوصی و سرمایه‌گذاری غیردولتی و خارجی می‌تواند از عناوین تحقیقاتی زیر مجموعه دسته‌های کنترل و بهینه‌سازی و مدل‌سازی و طراحی شبیه‌ساز بهره‌مند شود.

شرکت توانیر نیز به دلیل داشتن وظایفی از جمله مدیریت راهبری و پایش شبکه سراسری برق، ایجاد سازوکارهای لازم برای توسعه رقابت در امر تولید، خرید و فروش برق و تهیه طرح‌های لازم برای توسعه تأسیسات تولید، انتقال و توزیع برق

می‌تواند از عناوین تحقیقاتی زیر مجموعه دسته‌های تشخیص و شناسایی، پیش‌بینی و تخمین، کنترل و بهینه‌سازی و مدل‌سازی و طراحی شبیه‌ساز استفاده کند.

نهادهای زیر به دلیل شرح وظایف مختلفی که پیش‌رو دارند به‌طور مستقیم با چالش‌های مختلفی در صنعت برق مواجه هستند و تقریباً می‌توانند از تمام دسته عناوین تحقیقاتی بهره‌مند شوند:

- شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی ایران
- شرکت مدیریت شبکه برق ایران
- شرکت‌های برق منطقه‌ای
- شرکت‌های توزیع نیروی برق
- ساتبا
- پژوهشگاه نیرو
- دانشگاه‌ها
- مراکز رشد (پارک‌های علم و فن‌آوری) و شرکت‌های دانش‌بنیان
- شرکت‌های مهندسی مشاور

جدول ۱۲۳-۸: دسته موضوعات تحقیقاتی قابل استفاده توسط نهادهای مختلف

عنوان دسته					نام نهاد
تشخیص و شناسایی	تحلیل و دسته‌بندی	پیش‌بینی و تخمین	کنترل و بهینه‌سازی	مدل‌سازی و طراحی شبیه‌ساز	
✓		✓			مجلس شورای اسلامی
✓		✓			مجمع تشخیص مصلحت نظام
✓					سازمان پدافند غیر عامل
		✓			سازمان حفاظت محیط زیست
✓		✓		✓	معاونت برق و انرژی وزارت نیرو
✓		✓		✓	معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی وزارت نیرو
✓		✓	✓	✓	شرکت توانیر
✓	✓	✓	✓	✓	شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی ایران
✓	✓	✓	✓	✓	شرکت مدیریت شبکه برق ایران
✓	✓	✓	✓	✓	شرکت‌های برق منطقه‌ای

✓	✓	✓	✓	✓	شرکت‌های توزیع نیروی برق
✓	✓	✓	✓	✓	ساتبا
✓	✓	✓	✓	✓	پژوهشگاه نیرو
✓	✓	✓	✓	✓	دانشگاه‌ها
✓	✓	✓	✓	✓	مراکز رشد (پارک‌های علم و فن‌آوری) و شرکت‌های دانش‌بنیان
✓	✓	✓	✓	✓	شرکت‌های مهندسی مشاور

۱۴-۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این گزارش، با استفاده از ابزارهای متن‌کاوی مبتنی بر پایگاه داده اسکاپوس و ابزار سایول، مطالعات صورت گرفته با استفاده از مفهوم یادگیری ماشین در حوزه‌های مختلف برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت بررسی و دسته‌بندی شد. در این راستا، اطلاعات روندی و سایر اطلاعات مفید پیرامون مطالعات انجام شده در هر یک از محورهای تخصصی دوازده‌گانه ارائه شدند. در این مرحله، علاوه بر شناسایی کاربردها، متخصصین و مراکز پیشرو در هر کدام از حوزه‌های مختلف برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت شناسایی شدند. در ادامه، کاربردهای فناورانه تکنیک‌های یادگیری ماشین با توجه به محورهای تخصصی گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت بررسی شدند. بدین منظور، گزارشات علمی دسته‌بندی شده و کاربردهای فناورانه یادگیری ماشین در حوزه‌های مذکور مورد تحقیق و تحلیل قرار گرفت. بنابراین، با توجه به نتایج حاصل از مطالعات و تحلیل‌های صورت گرفته، کاربردهای یادگیری ماشین در هر کدام از حوزه‌ها استخراج شدند. در پایان، بر اساس نتایج اقدامات و تحلیل‌های صورت گرفته در مراحل پیشین، نمونه‌هایی از عناوین و موضوعات تحقیقاتی پیشنهاد شده و مبتنی بر کاربردها و به تفکیک محورهای تخصصی دسته‌بندی شد.

بر اساس مطالعات صورت‌پذیرفته، جایگاه و اهمیت استفاده از مفاهیم یادگیری ماشین در حوزه‌های مطالعاتی سیستم‌های قدرت به روشنی مشاهده می‌شود. در تمامی دسته‌بندی‌ها ملاحظه می‌شود تحقیقات جدید و مهمی در راستای استفاده از مفاهیم یادگیری ماشین با هدف ارتقا و بهبود اهداف مطالعاتی در حال انجام است و روند تحقیقات نیز کاملاً رو به گسترش است که به نوبه خود اهمیت آن را در مطالعات آینده سیستم قدرت نشان می‌دهد. بنابراین، نیاز است برنامه‌ریزی مناسبی جهت کسب دانش فنی کافی و به روز ساختن دانش موجود در زمینه مفاهیم مرتبط با یادگیری ماشین انجام شود.

۸-۱۵- مراجع

[۱] www.scopus.com

[۲] googlescholar.com