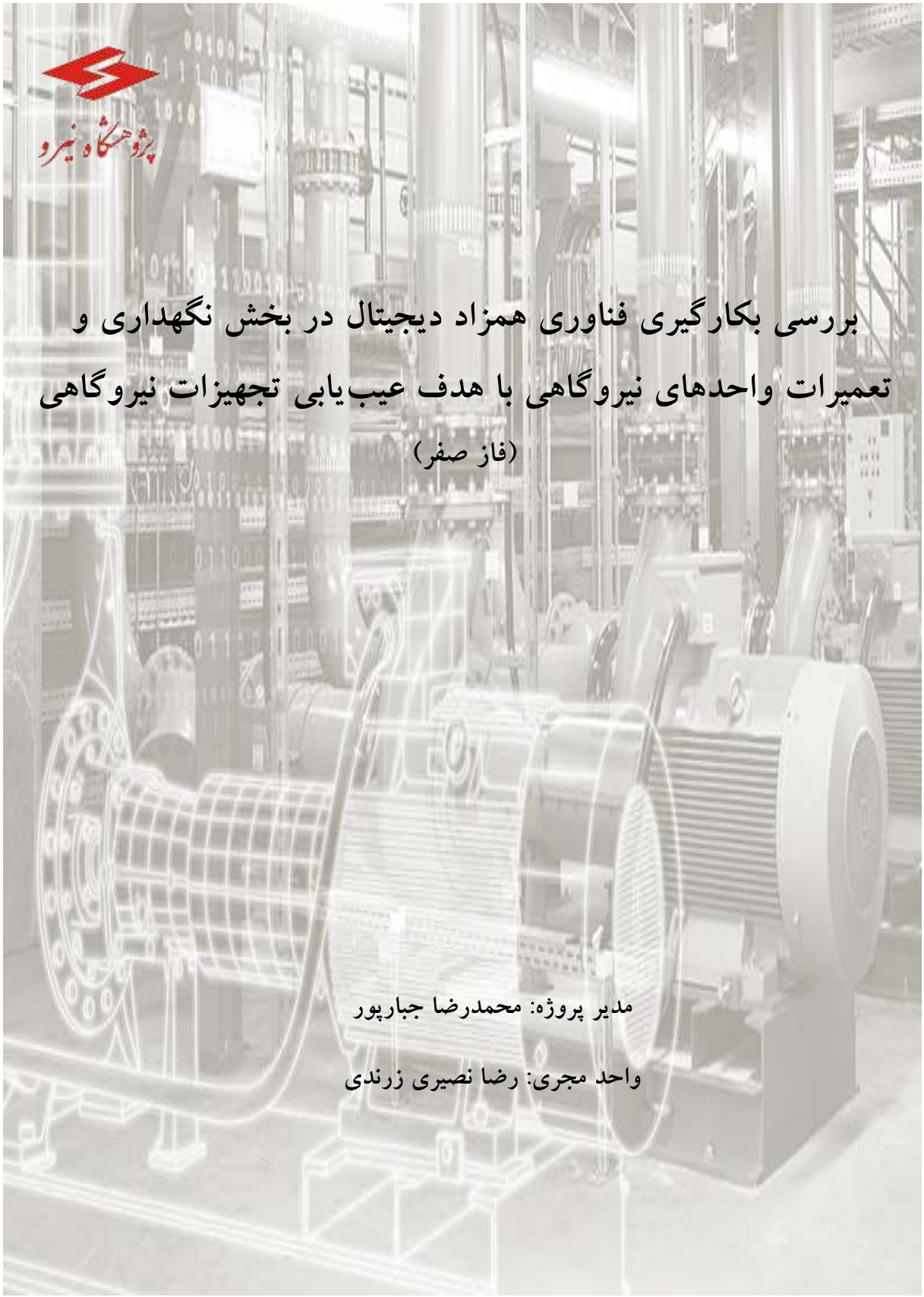


پژوهشگاه نیرو

بررسی بکارگیری فناوری همزاد دیجیتال در بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی با هدف عیب‌یابی تجهیزات نیروگاهی

(فاز صفر)

مدیر پروژه: محمدرضا جبارپور

واحد مجری: رضا نصیری زرندی

NRI-ER-966-PPOPN05-9-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.204


بسم الله الرحمن الرحيم

بررسی بکارگیری فناوری همزاد دیجیتال در بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی با هدف عیب یابی تجهیزات نیروگاهی (فاز صفر)

مدیر پروژه: محمدرضا جباپور

گروه پژوهشی پشتیبان: گروه فناوری اطلاعات و ارتباطات

همکاران پروژه: صبریه چوبکار، محسن ظهیر، محمد مهدی عباسی، مهدی مظفری‌پور

واحد مجری: طرح توسعه زیرساخت‌ها و فناوری‌های نوین بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات در بخش تولید صنعت برق با هدف بهینه‌سازی آن‌ها

انتشارات پژوهشگاه نیرو

آبان ۱۴۰۱

کد ثبت گزارش: NRI-ER-966-PPOPN05-9-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.204

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. طرح توسعه زیرساخت‌ها و فناوری‌های نوین بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات در بخش تولید صنعت برق با هدف بهینه‌سازی آن‌ها

بررسی بکارگیری فناوری همزاد دیجیتال در بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی با هدف عیب یابی تجهیزات نیروگاهی (فاز صفر)/ مدیر پروژه: محمدرضا جبارپور. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۵۲ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. چوبکار، صبریه، همکار پروژه. ۲. ظهیر، محسن، همکار پروژه . ۳. عباسی، محمد مهدی، همکار پروژه . ۴. مظفری‌پور، مهدی، همکار پروژه . ۵. گروه فناوری اطلاعات و ارتباطات

انتشارات پژوهشگاه نیرو

طرح توسعه زیر ساخت ها و فناوری های نوین بهره برداری، نگهداری و تعمیرات در بخش تولید صنعت برق با هدف بهینه سازی آن ها

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به نام کارفرما و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

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

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: *www.nri.ac.ir*

پست الکترونیک انتشارات: *publications@nri.ac.ir*

پیشگفتار

در سال‌های اخیر انقلاب صنعتی چهارم و فناوری‌های مربوطه بسیار مورد توجه مراکز، شرکت‌های صنعتی و دانشگاه‌های معتبر جهان قرار گرفته است. انقلاب صنعتی چهارم نامی است که برای حوزه‌های مختلف از جمله اتوماسیون صنعتی در فناوری تولید در نظر گرفته شده است. امروزه تجهیزات و ابزارهای صنعتی به فناوری‌های مختلفی از جمله رایانش

ابری، اینترنت اشیاء، امنیت سایبری، واقعیت مجازی و ... مجهز شده‌اند که منجر به هوشمند شدن تولیدات و اتصال به شبکه شده است. شبکه‌های ارتباطی باعث همگرایی دنیای فیزیکی و مجازی شده و مفهوم سیستم‌های سایبر-فیزیکی (Cyber-Physical System) به وجود آورده است که یکی از اصلی‌ترین هسته‌های انقلاب صنعتی ۴,۰ به شمار می‌شود. بهینه‌سازی و سفارشی‌سازی از اصلی‌ترین مزایای انقلاب صنعتی چهارم محسوب می‌شوند. فناوری‌های گسترده‌ای در این حوزه مطرح هستند که در این بین همزاد دیجیتال با ترکیب فناوری‌های مختلف راهکارهای مناسبی برای بهبود بهره‌وری صنایع مختلف به ویژه صنعت برق فراهم کرده است.

فنآوری همزاد دیجیتال از فنآوری‌های استراتژیک و تاثیرگذار در سالهای اخیر بوده است و این فنآوری در حال تبدیل شدن به پدیده‌ای مهم در تحولات صنعتی است. برای دستیابی و پیاده‌سازی این فناوری، فناوری‌های مختلف ارتباطی و اطلاعاتی مورد نیاز است که از آن جمله می‌توان به فناوری‌هایی همچون اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، رایانش ابری، واقعیت مجازی و واقعیت افزوده و شبکه سلولی 5G و ... اشاره کرد. در ابتدای سال ۱۳۹۹، پروژه «امکان‌سنجی استفاده از مجازی‌سازی (همزاد دیجیتال) در صنعت برق» در گروه پژوهشی فناوری اطلاعات و ارتباطات تعریف و انجام شد. این پروژه مطالعات مفهومی ساختار کلی همزاد دیجیتال و بررسی دانش هر فناوری زیرمجموعه را مورد بررسی قرار داد.

با توجه به اهمیت موضوع نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی و پایش وضعیت (Condition Monitoring) تجهیزات آنها در صنعت برق و انرژی، شرکت‌هایی مانند زیمنس، جنرال الکتریک و ABB به این فنآوری پرداخته اند و محصولات با ارزش افزوده بالایی تولید نموده‌اند. پایش وضعیت تجهیزات روش متداول پیشگیری از بروز عیب و به حداکثر رساندن زمان بهره‌برداری است. مدیریت نگهداری و تعمیرات مؤثر بستگی به پیش‌بینی و تشخیص دقیق مشکلات ماشین‌آلات و تجهیزات دارد. با استفاده از تکنیک نگهداری و تعمیر صحیح، می‌توان زمان، هزینه و منابع را به نحوه مناسب مدیریت کرد و زمان بهره‌برداری، قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینان واحدهای نیروگاهی را افزایش داد. با توجه به پیچیدگی تجهیزات نیروگاهی نیاز می باشد از فناوری‌های نوین مانند همزاد دیجیتال به منظور پیش‌بینی و تشخیص دقیق مشکلات استفاده شود.

در این پروژه مفاهیم و فناوری‌های مرتبط با انقلاب صنعتی چهارم مورد بررسی قرار خواهند گرفت. لازم به ذکر است مروری بر مفاهیم انقلاب صنعتی پنجم که اخیرا مطرح شده است نیز انجام خواهد شد. با توجه به اینکه همزاد دیجیتال با به کارگیری مجموعه‌ای از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم راهکارهای مناسبی را برای نگهداری و تعمیرات دارایی-های واحدهای نیروگاهی فراهم می‌کند، مفاهیم مرتبط با این فناوری مورد بررسی قرار می‌گیرند. بررسی کاربردهای همزاد دیجیتال در صنایع گوناگون با تمرکز بر بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی و مدیریت دارایی‌های فیزیکی نسل چهارم از دیگر اهداف این پروژه می‌باشد. در نهایت هم با هدف توسعه زیرساخت‌های مرکز پایش وضعیت ناوگان نیروگاه‌های کشور تجهیزات اولویت‌دار واحدهای نیروگاهی شناسایی و امکان پیاده‌سازی همزاد دیجیتال آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد، و در صورت امکان برای پیاده‌سازی، نیازمندی‌های همزاد دیجیتال برای تجهیز انتخاب شده استخراج خواهد شد.

این گزارش مربوط به پروژه بررسی بکارگیری فناوری همزاد دیجیتال در بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی با هدف عیب یابی تجهیزات نیروگاهی (فاز صفر) است که پشتیبانی آن، بر عهده گروه پژوهشی فناوری اطلاعات و ارتباطات و نظارت بر/داوری آن، بر عهده سرکار خانم/جناب آقای دکتر سیدکمال حسینی ثانی بوده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱- بکارگیری فناوری همزاد دیجیتال در بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی با هدف عیب یابی تجهیزات نیروگاهی ۱۱
۱-۱ مقدمه ۱۲
۱-۲ بررسی روند انقلاب صنعتی چهارم و پنجم ۱۳
۱-۲-۱ روند انقلابهای صنعتی ۱۳
۱-۲-۲ فناوریهای اصلی در صنعت ۴,۰ ..... ۱۵
۱-۳ بررسی اسناد بالادستی ۱۵
۱-۴ بررسی همزاد دیجیتال و مفاهیم مرتبط در انقلاب صنعتی چهارم ۱۷
۱-۴-۱ تعریف همزاد دیجیتال ۱۷
۱-۴-۲ مدل معماری مرجع برای همزاد دیجیتال در انقلاب صنعتی چهارم ۱۸
۱-۴-۳ فناوریهای تشکیل دهنده همزاد دیجیتال ۲۰
۱-۵ سوابق به کارگیری فناوری همزاد دیجیتال در صنعت برق با تمرکز بر بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی ۲۱
۱-۵-۱ تحول در شبکه برق ۲۱
۱-۵-۱-۱ مدیریت اطلاعات شبکه برق در همزاد دیجیتال ۲۲
۱-۵-۱-۲ چالشهای صنعت برق و راهکارهای همزاد دیجیتال ۲۳
۱-۶ بررسی پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای به کارگیری فناوری همزاد دیجیتال در صنایع به صورت عام ۲۵
۱-۶-۱ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم در حوزه مدیریت داده ۲۵
۱-۶-۲ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالشهای یکپارچهسازی سیستم ۲۶
۱-۶-۳ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالشهای ارتباطی ۲۶
۱-۶-۴ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالشهای امنیتی ۲۷
۱-۶-۵ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالشهای کارایی ۲۸
۱-۶-۶ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالشهای سازمانی ۲۹
۱-۶-۷ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالشهای محیطی ۳۰
۱-۷ بررسی نیازمندیهای پیادهسازی همزاد دیجیتال به صورت کلی ۳۱
۱-۷-۱ مشخصات سیستم ۳۳
۱-۷-۱-۱ الزامات عملکردی ۳۳
۱-۷-۱-۲ طراحی فرآیند ۳۵
۱-۷-۱-۳ طراحی معماری ۳۶

۱-۷-۲ مدلسازی همزاد دیجیتال..... ۳۸
۱-۷-۲-۱ یکپارچهسازی مدلهای اجزای سیستم..... ۴۱
۱-۷-۳ ایجاد همزاد دیجیتال..... ۴۳
۱-۷-۳-۱ پروتکلهای ارتباطی و همگام سازی دادهها..... ۴۳
۱-۷-۳-۲ بسترها و ابزارهای آزمایشی..... ۴۵
۱-۸ جمعبندی..... ۴۷
مراجع..... ۴۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱. روند تحولات در بخش انرژی [۱] ۱۳
شکل ۱-۲. روند انقلاب‌های صنعتی [۲] ۱۴
شکل ۱-۳. فناوری‌های اصلی در صنعت ۴,۰ ۱۵
شکل ۱-۴. مدل معماری مرجع برای همزاد دیجیتال در انقلاب صنعتی چهارم [۴] ۱۹
شکل ۱-۵. همزاد دیجیتال و فناوری‌های تشکیل‌دهنده آن ۲۱
شکل ۱-۶. همزاد دیجیتال برای مدیریت سراسری در شبکه برق و انرژی [۹] ۲۲
شکل ۱-۷. الزامات مشخصات سیستم و خروجی آن [۲۹] ۳۲
شکل ۱-۸. مراحل طراحی معماری همزاد دیجیتال [۲۹] ۳۲
شکل ۱-۹. فرآیند مدلسازی DT ۳۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱. فناوریهای اصلی نه گانه در صنعت ۴,۰ و نقش اصلی آنها [۳]..... ۱۵
جدول ۱-۲. تعاریف همزاد دیجیتال [۶-۸]..... ۱۷
جدول ۱-۳. تعدادی از چالشها در حوزه‌های شبکه هوشمند و راهکارهای همزاد دیجیتال..... ۲۳

فصل اول

۱- بکارگیری فناوری همزاد دیجیتال در بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی با هدف عیب یابی تجهیزات نیروگاهی

۱-۱ مقدمه

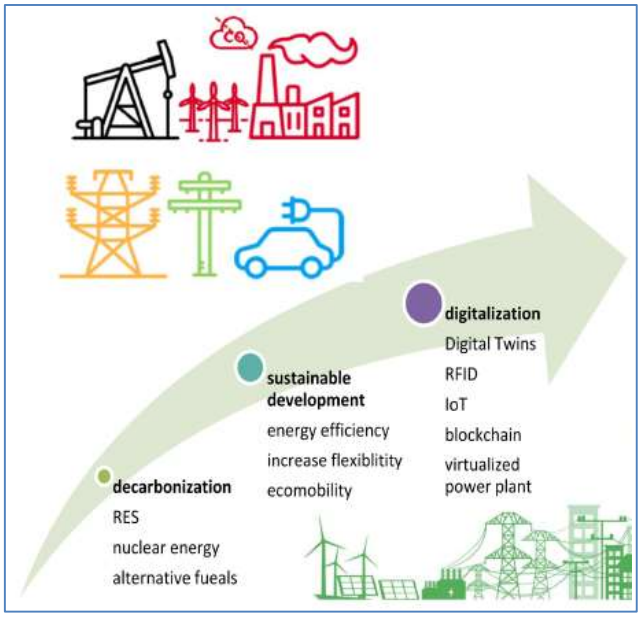
در جهان امروز، چالش‌های اقتصادی ناشی از تحولات فناورانه و اجتماعی باعث شده است شرکت‌های صنعتی، چابکی و پاسخگویی خود را به منظور مدیریت کل زنجیره ارزش افزایش دهند. از این رو، شرکت‌ها برای فراهم کردن قابلیت‌های همکاری و سازگاری در کسب و کار و عملیات خود نیازمند کمک فناوری‌های مختلف هستند. بنابراین آشنایی با راهبردهای انقلاب صنعتی چهارم و چگونگی بهره‌گیری از آن، ابزاری برای پیشرفت صنایع مختلف خواهد بود. صنعت قرن بیست و یکم، شامل مجموعه‌ای از نوآوری‌ها، پیشرفت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT)، سامانه‌های سایبر فیزیکی (CPS[1])، ابزار و خدمات معرفی شده در فرآیند تولید می‌باشد که می‌توانند تأثیر به سزایی در رقابت شرکت‌ها داشته باشند. انقلاب صنعتی چهارم در حال حاضر به یک شعار جهانی تبدیل شده است که ایده‌های آن می‌تواند در توسعه صنعت و سیاست‌های دیجیتال‌سازی مورد توجه قرار گیرد و در اولویت قراردادن آن منجر به بهبود قدرت رقابت نه تنها شرکت‌ها بلکه کشورها خواهد شد.

اصلاح مدل‌های موجود در صنایع تولیدی در شرایط رقابتی امروز و به دلیل کاهش مداوم مواد خام، افزایش هزینه انرژی و تغییرات جمعیتی به شدت ضروری می‌باشد. نمایشگاه هانوفر در سال ۲۰۱۱ یک دوره جدید در صنعت آلمان را برگزار نمود که در این نمایشگاه برای اولین بار از یک پروژه علمی جدید، به نام انقلاب صنعتی چهارم، رونمایی شد. خروجی این پروژه در سال‌های آتی منجر به تولید محصولات هوشمند در کارخانجات هوشمند برای بازار جهانی شد.

فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی در انقلاب صنعتی چهارم به سرعت در حال گسترش هستند. در عصر حاضر، پیشرفت و تحقق بسیاری از فناوری‌ها زمینهٔ عملیاتی شدن مفهوم مجازی‌سازی و ساخت نسخه دیجیتال از انواع سیستم‌ها و ماشین‌آلات را فراهم کرده است. در خصوص حوزه انرژی نیز دو انقلاب مهم فناوری که درحال شکل دادن به طلوع قرن بیست و یکم هستند، در رابطه با توسعه اینترنت و تغییر به سمت یک سیستم انرژی جهانی بدون کربن می‌باشند و عبارتند از (شکل ۱-۱):

- حرکت به سمت جهان بدون کربن با بیانیه کشورهای گروه هفت در سال ۲۰۱۵ (حذف سوخت های فسیلی تا سال ۲۱۰۰)
- تحول بخش انرژی (تولید، انتقال و توزیع) با کربن زدایی، توسعه پایدار و دیجیتالی شدن

[1] Cyber-Physical System



شکل ۱-۱. روند تحولات در بخش انرژی [۱]

۱-۲ بررسی روند انقلاب صنعتی چهارم و پنجم

در این بخش روند انقلاب‌های صنعتی با تمرکز بر انقلاب‌های صنعتی چهارم و پنجم مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲-۱روند انقلاب‌های صنعتی

با بررسی رخدادهای صنعتی، پنج انقلاب با ویژگی‌های زیر قابل بیان هستند: (شکل ۱-۲)

۱) اولین انقلاب صنعتی (قرن ۱۸) تولید با موتورهای بخار:
مشخصه اصلی اولین انقلاب صنعتی تغییرات تولیدات دستی به ماشینی با بهره‌مندی از ماشین بخار و آب است. در این دوره پیاده‌سازی فناوری‌های جدید بسیار زمان‌بر بود و شامل بازه زمانی ۱۷۶۰ تا ۱۸۴۰ در اروپا و آمریکا می‌شود. تأثیرات این انقلاب بر صنعت تولید پارچه بسیار چشمگیر بود. این تغییرات را در صنایع دیگری مانند معدن و کشاورزی هم می‌توانیم ردیابی کنیم که در قالب مکانیزه شدن رخ داد.

۲) انقلاب دوم صنعتی (پایان قرن ۱۹) تولید انرژی الکتریکی:
این انقلاب در سال‌های ۱۸۷۱ تا ۱۹۱۴ اتفاق افتاد و نتیجه‌ی این انقلاب، اختراع موتور احتراق داخلی، رشد تقاضا برای فولاد، سنتز شیمیایی و روش‌های ارتباطی همچون تلگراف و تلفن بود که تبادل سریع‌تر مردم و ایده‌ها را امکان‌پذیر کرد. اختراع الکتریسیته در این بازه زمانی، به کارخانه‌ها امکان گسترش خطوط تولید مدرن را داد. در این دوره اقتصاد رشد سریعی داشت و بهره‌وری افزایش یافت. انقلاب صنعتی دوم مشکلاتی را هم برای جامعه در پی داشت مانند افزایش بیکاری در راستای ماشینی شدن بیشتر کارها در کارخانه‌ها. اختراع خودرو و هواپیما از دیگر دستاورهای این انقلاب مهم محسوب می‌شوند.

۳) انقلاب سوم صنعتی (اواسط قرن بیستم) تولید خودکار با ظهور اینترنت:

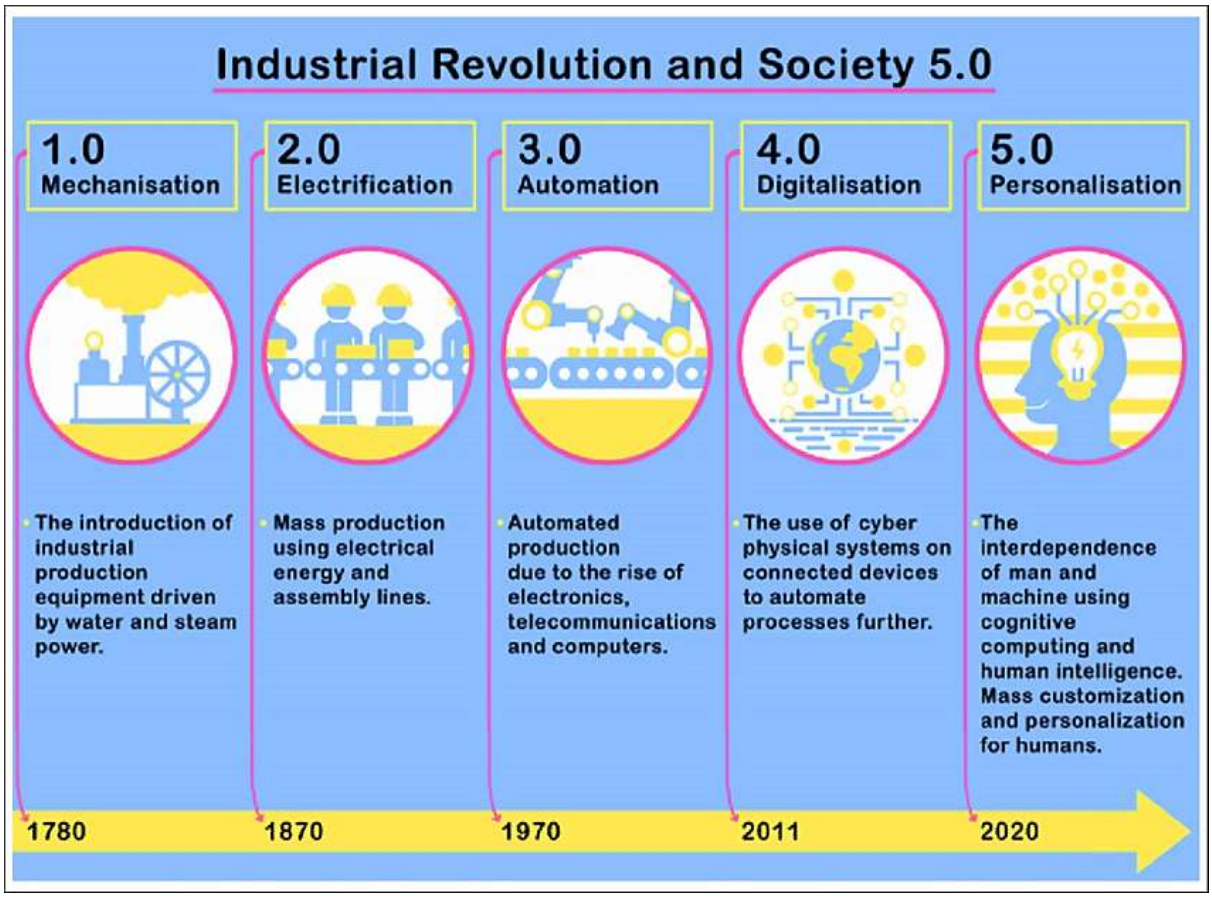
انقلاب صنعتی سوم که به اسم انقلاب دیجیتال نیز شناخته می‌شود اواخر قرن ۲۰ام، بعد از پایان دو جنگ جهانی، در نتیجه کاهش پیشرفت‌های فناورانه و صنعتی شدن رخ داد. تولید اولین رایانه *z1* در دهه بعد، آغازگر پیشرفت‌های دیجیتال بیشتری بود. پیشرفت چشم‌گیر بعدی با حضور ابررایانه رخ داد که ارتباطات را در فرایند تولید آسان می‌کردند.

۴) انقلاب چهارم صنعتی یا صنعت ۴,۰ (انتهای قرن ۲۰) تولید بر اساس سامانه سایبری-فیزیکی:

این انقلاب عصر دستگاه‌های هوشمند، سیستم‌های ذخیره‌سازی و تجهیزات تولیدی است که می‌توانند به صورت مستقل تبادل اطلاعات کرده و بدون دخالت انسان تجهیزات را کنترل و امور محوله را انجام دهند. به صورت خلاصه این انقلاب با بهره‌مندی از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، اینترنت اشیا صنعتی، رایانش ابری، محاسبات شناختی و هوش مصنوعی درک ما را از دنیای پیرامون‌مان تغییر خواهد داد.

۵) انقلاب پنجم صنعتی یا صنعت ۵,۰ (ابتدای قرن ۲۱) تولید بر اساس سامانه شناختی (حسی) سایبری-فیزیکی:

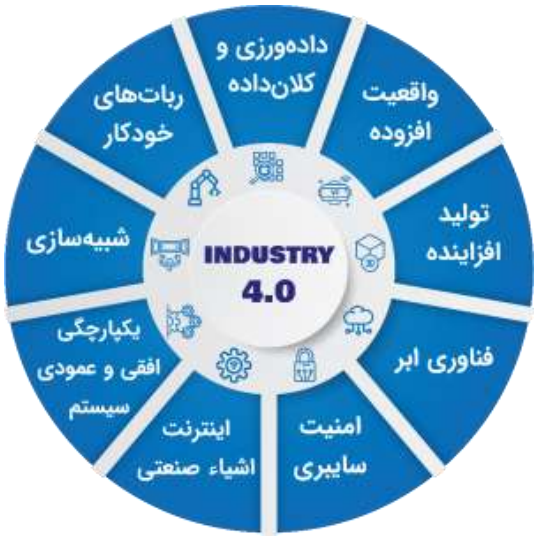
در حالی که انقلاب صنعتی چهارم بر روی هوشمندسازی کارخانه‌ها از طریق فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء، محاسبات شناختی، رایانش ابری و کاهش مشارکت انسان تاکید داشت، انقلاب صنعتی پنجم بر روی بازگشت مشارکت انسان بر روی چارچوب صنعتی متمرکز است و بر روی ادغام و مشارکت هوش مصنوعی و هوش انسانی تاکید دارد.



شکل ۱-۲. روند انقلاب‌های صنعتی [۲]

۱-۲-۲ فناوری‌های اصلی در صنعت ۴,۰

فناوری اصلی صنعت ۴,۰ که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، اجزای اصلی هستند که تولید واحد ایزوله را به یک جریان تولید کاملاً بهینه، یکپارچه و خودکار تبدیل می‌کنند. ترکیب این فناوری‌ها اساساً منجر به راندمان تولید بالاتر در بین تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مشتریان و همچنین بین ماشین‌ها و ماشین‌ها و بین ماشین‌ها و انسان‌ها می‌شود. چارچوب صنعت ۴,۰ با فناوری‌های تشکیل دهنده و نقش اصلی آنها در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳. فناوری‌های اصلی در صنعت ۴,۰

جدول ۱-۱. فناوری‌های اصلی نه گانه در صنعت ۴,۰ و نقش اصلی آنها [۳]

فناوری اصلی	نقش اصلی
ربات‌های خودکار (خودمختار)	انجام وظایف با حداقل یا بدون دخالت انسانی
شبیه‌سازی	ایجاد دنیای مجازی و پیش‌بینی نتایج یک عمل
یکپارچگی افقی و عمودی سیستم	ارتباط، تعامل و همکاری افقی و عمودی
اینترنت اشیاء صنعتی	ایجاد ارتباط اشیاء با یکدیگر و با انسان
امنیت سایبری	حفاظت از سیستم‌ها و شبکه‌های محاسباتی
رایانش ابری	دسترسی به اطلاعات از هر جایی با استفاده از اینترنت
تولید افزوده	ایجاد اشیاء سه بعدی با افزودن لایه به لایه مواد
واقعیت افزوده	انجام وظایف در محیط واقعی به صورت تعاملی با اشیاء مجازی

۱-۳ بررسی اسناد بالادستی

با بررسی سند راهبردی شورای عالی تحقیقات و فناوری (عتف) با عنوان "سیاستها و اولویتهای پژوهش و فنّاوری کشور در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰"، ملاحظه گردید که ۲۲ طرح کلان ملی اولویت‌دار وجود دارند که دو مورد آن با عناوین ذیل، در رابطه با بخش تولید هستند:

- توسعه فناوری و ساخت توربین‌های مگاواتی ملی توربین بادی (۲ مگاوات)
- طراحی و ساخت توربین گازی ۲۰۰ کیلوواتی با قابلیت CHP برای تولید پراکنده

همچنین ۱۳ طرح کلان ملی وجود دارند که نیازمند به بازنگری هستند؛ که دو طرح آن به شرح زیر وابسته به تولید و بکارگیری روش‌های هوشمندسازی هستند:

- شبکه هوشمند برق ایران و پیاده‌سازی طرح نمونه
- بومی‌سازی و ساخت توربین گاز ۲۵ مگاوات (قابلیت افزایش تا ۳۰ مگا وات)

همچنین اولویت‌های پژوهش در زمینه‌های انرژی و فناوری اطلاعات و ارتباطات به شرح زیر هستند:

الف) اولویت‌های پژوهش در زمینه فناوری اطلاعات و ارتباطات

- توسعه و تقویت سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای مورد نیاز زیرساخت‌های ارتباطی، پردازشی و ذخیره‌سازی
- توسعه فنّاوری‌های افزایش دهنده سرعت دسترسی به شبکه
- توسعه زیرساختهای یکپارچه و تعامل‌پذیر تبادل و مدیریت اطلاعات در بستر شبکه ملی اطلاعات
- بومی‌سازی زیرساخت‌های شبکه‌های اجتماعی
- افزایش سامانه‌های کنترل کیفی دیجیتال جهت نظارت بر بنگاه‌ها
- توسعه ابزارها و رویکردهای امن‌سازی اطلاعات و شبکه‌های ارتباطی
- توسعه نسل‌های جدید شبکه‌های ارتباطی
- تولید و توسعه فنّاوری‌های سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و راه‌های مقابله با بدافزارهای مرتبط با سامانه‌های هوشمند ردیابی، نشت و پایش در بخشهای مختلف کشور به‌ویژه انرژی، آب و محیط زیست و اقلیم
- طراحی و ساخت سامانه‌های جامع مدیریت بحران در حوزه‌های عملکردی مختلف (سیل، طوفان، ریزگردها، سرمازدگی و امواج گرما)
- توسعه سامانه‌های رباتیک، دستیار هوشمند و سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT)، میکرو و نانو رباتها، تله مانیتورینگ و پردازش دادگان حجیم (Big Data) در حوزه‌های کاربردی مختلف.

ب) اولویت‌های پژوهش در زمینه انرژی

از میان ۱۹ فناوری بیان شده در سند مزبور، موارد زیر با پروژه حاضر در ارتباط هستند:

۱. فناوری‌های افزایش بهره‌وری و بهینه‌سازی در تولید، خطوط انتقال و توزیع انرژی

۲. فناوری‌های افزایش هوشمندسازی سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل به‌منظور مدیریت یکپارچه زنجیره ارزش انرژی

۳. فناوری‌های بهینه‌سازی و هوشمندسازی شبکه‌های انتقال، توزیع و مصرف برق

با بررسی موارد فوق ملاحظه می‌شود که بسیاری از فناوری‌های مورد استفاده در صنعت ۴,۰ در زمره اولویت‌های پژوهشی کشور و در اسناد بالادستی می‌باشند. به این‌ترتیب اگرچه شاید در این اسناد به صورت مستقیم نامی از صنعت ۴,۰ برده نشده باشد، ولی روح آنها شامل مفاهیم مورد نظر است.

۱-۴ بررسی همزاد دیجیتال و مفاهیم مرتبط در انقلاب صنعتی چهارم

حرکت و تغییر به سمت دیجیتال شدن سیستم‌ها یکی از شاخه‌های اصلی انقلاب صنعتی چهارم به شمار می‌رود. همزاد دیجیتال به عنوان یک فناوری نوین دیجیتال، بر پایه داده گردآوری شده از منابع متنوع، می‌تواند ویژگی‌های هوشمندی را در اختیار کاربر قرار دهد. محصول همزاد دیجیتال که به صورت یک نمونه محاسباتی مجازی است، به صورت یک سیستم فیزیکی-سایبری در راستای ویژگی‌های انقلاب صنعتی چهارم دسته‌بندی می‌شود.

از زاویه دیگر می‌توان گفت که پیشرفت انقلاب صنعتی چهارم در هوشمند کردن سیستم‌ها با توسعه فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء، CPS، سیستم‌های مخابراتی پرسرعت، محاسبات ابری و هوش مصنوعی در حال تحقق است. این فناوری‌های نوین و رو به رشد، درکنار هم قرار می‌گیرند تا همزاد دیجیتال را ارایه دهند و ویژگی‌های پیشرفته و قابلیت‌های منحصر به فرد این فناوری، مزایای جدیدی برای کاربرد در صنایع را ارایه دهد [۴].

۱-۴-۱ تعریف همزاد دیجیتال

همزاد دیجیتال، به دوگانی از یک موجودیت فیزیکی گفته می‌شود که از ساختار یک نگاشت دوطرفه و پویا بین شیء فیزیکی و زوج دیجیتالی آن بدست می‌آید. همزاد دیجیتال در ابتدا توسط دکتر مایکل گریوز از دانشگاه میشیگان در سال ۲۰۰۲ به عنوان معادل دیجیتال یک دارایی فیزیکی ارائه شد [۵]. بعد از آن محققین با توجه به حوزه‌های مختلف، این تعریف را مورد بازبینی قرار داده‌اند. برخی از این تعاریف در جدول ۱-۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱-۲. تعاریف همزاد دیجیتال [۶-۸]

تعریف همزاد دیجیتال	سال
یک شبیه‌سازی یکپارچه، چند بعدی و مبتنی بر احتمال شامل چندمدل فیزیکی از یک وسیله نقلیه یا سیستم است که با استفاده از مدل‌های فیزیکی، داده‌های بلادرنگ حسگرها، اطلاعات پیشین و رفتار آن را منعکس می‌کند.	۲۰۱۲
یک مدل جفت شده از ماشین واقعی که در بستر ابری فعالیت می‌کند و صحت عملکرد را با دانش یکپارچه از الگوریتم تحلیلی داده محور و همچنین سایر دانش‌های فیزیکی موجود شبیه‌سازی می‌کند.	۲۰۱۳
مجموعه‌ای از اطلاعات مجازی است که تماماً امکان توصیف محصولات فیزیکی (یا بالقوه قابل ساخت) از سطح پایین اتمی تا سطح بالای هندسی را فراهم می‌کند. در صورت طراحی بهینه، همه اطلاعات شیء فیزیکی را می‌توان از همزاد دیجیتال استخراج کرد.	۲۰۱۶
استفاده از نسخه دیجیتالی از سیستم فیزیکی برای انجام بهینه‌سازی زمان اجرا.	۲۰۱۷
نقشه‌برداری واقعی از همه مؤلفه‌های چرخه عمر محصول با استفاده از داده‌های فیزیکی، داده‌های مجازی و داده‌های مبادله شده بین آنها است.	۲۰۱۸
یک مدل مجازی است که یک جسم فیزیکی یا یک فرآیند در سراسر چرخه عمر خود را قرینه‌سازی می‌کند. با فراهم کردن یک پل نزدیک به زمان واقعی بین دنیای فیزیکی و دیجیتال، این فن‌آوری این امکان را می‌دهد که تجهیزات و سیستم‌ها را از راه دور پایش و کنترل نمود.	۲۰۱۹
همزاد دیجیتال ویژگی‌های یک دارایی فیزیکی را تکرار می‌کند. شرکت‌های مختلف را قادر می‌سازند تا با تصمیم‌گیری‌های متکی بر حقایق در برابر چالش‌های این صنعت واکنش نشان دهند.	۲۰۲۰
یک بازنمایی دیجیتالی از یک دارایی فیزیکی و / یا فرایندهای آن است، که می‌تواند با داده‌های در دسترسِ میدانی تعامل داشته باشد.	۲۰۲۰

تعریف همزاد دیجیتال	سال
همزاد دیجیتال را می‌توان به عنوان بازنمایی مجازی از یک دارایی فیزیکی که از طریق داده‌ها و شبیه‌سازها برای پیش‌بینی زمان واقعی، بهینه‌سازی، پایش، کنترل، و بهبود تصمیم‌گیری تعریف کرد.	۲۰۲۰
به فرایندها و روش‌هایی برای توصیف و مدل‌سازی خصوصیات، رفتار، فرآیند شکل‌گیری و عملکرد اشیا فیزیکی با استفاده از فن‌آوری دیجیتال اشاره دارد.	۲۰۲۰
یک بازنمایی دیجیتالی از یک دارایی فیزیکی، فرآیند یا سیستم، و همچنین ارایه‌دهنده اطلاعات است که به کاربران اجازه می‌دهد تا عملکرد آنرا را درک کرده و مدل کنند. همزاد دیجیتال را می‌توان به طور مداوم از منابع متعدد، از جمله حسگرها و پیمایش مستمر، برای نشان دادن وضعیت زمان واقعی، وضعیت کار یا موقعیت خود، همزمان‌سازی کرد.	۲۰۲۱
یک بازنمایی مجازی از یک جسم یا سیستم فیزیکی است؛ اما خیلی بیشتر از یک هم‌چهره فنآورانه پیشرفته[۲] است. همزادهای دیجیتال از داده‌ها، یادگیری ماشین، و اینترنت اشیاء برای کمک به بهینه‌سازی، نوآوری و ارائه خدمات جدید استفاده می‌کنند.	۲۰۲۱

۱-۴-۲ مدل معماری مرجع برای همزاد دیجیتال در انقلاب صنعتی چهارم

همزاد دیجیتال ابزار توانمندی است که تحول عظیمی را در صنایع ایجاد خواهد کرد. خروجی این فناوری، بر اساس نتایجی که هریک از فناوری‌های زیرمجموعه آن ارایه می‌دهد می‌تواند ارزش افزوده قابل توجهی را در بخش‌های مختلف در انقلاب صنعتی چهارم ایجاد کند.

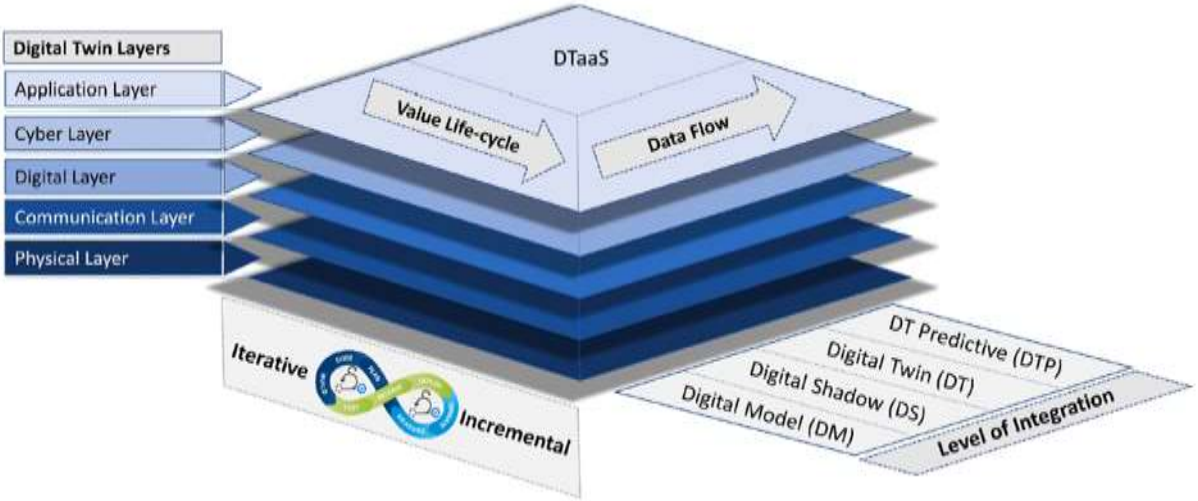
مدل معماری مرجع که برای انقلاب صنعتی چهارم تحت عنوان RAMI 4.0[۳] شناخته شده است مبتنی بر یک نگاه کلی به صنایع بوده و یک چارچوب جامع و نقشه سه‌بعدی از المان‌های لازم برای توسعه و رشد در آینده و همچنین بهبود مدل‌های کسب و کار را در اختیار آنها قرار می‌دهد. RAMI 4.0 یک مفهوم مشترک از صنایعی که با فناوری‌های دیجیتال ادغام شده‌اند، شامل طراحی، ساخت و توسعه را دربر می‌گیرد که مشابه با مدل معروف ۷ لایه‌ای ISO/OSI (مدل مرجع پروتکل‌های شبکه) می‌باشد. مزیت اصلی استفاده از این مدل، ارایه یک نگاه مشترک برای استفاده در صنایع است. RAMI 4.0 یک معماری مبتنی بر سرویس (SOA[۴]) را نشان می‌دهد که انواع مختلفی از سرویس‌ها را ارایه می‌دهد. اساس و بنیاد SOA مستقل از محصولات و شرکت‌ها است. این مدل معماری می‌تواند فعالیت‌های پیچیده را در راستای مفاهیم و قابلیت‌های انقلاب صنعتی چهارم، به ماجول‌های ساختاری ساده‌تر و کوچکتر بشکند [۴]. شکل ۱-۴ یک مدل معماری مرجع برای همزاد دیجیتال در انقلاب صنعتی چهارم را نشان می‌دهد. این مدل چندلایه و سه‌بعدی در سه بعد متوازن، همه ویژگی‌های پایه همزاد دیجیتال را توصیف می‌کند. در این شکل، ساختار پیچیده همزاد دیجیتال به دسته‌های ساده‌تر و کوچکتر شکسته شده است که عبارتند از: ۵ لایه اصلی همزاد دیجیتال، چرخه ایجاد ارزش و ساختار سلسه‌مراتبی همزاد دیجیتال.

---

[۲] Hightech lookalike

[۳] Reference Architecture Model Industry(RAMI)

[۴] Service-Oriented Architecture



شکل ۱-۴. مدل معماری مرجع برای همزاد دیجیتال در انقلاب صنعتی چهارم [۴]

ارزش مدل فوق در این است که طیف گسترده‌ای از حوزه‌ها را نشان می‌دهد و ارتباط ساختاری بین داده، اطلاعات، آگاهی و دانش را نشان می‌دهد. در ادامه توضیح محورهای این شکل ارایه می‌شود:

۱. محور سمت چپ، از پایین‌ترین لایه یعنی لایه فیزیکی آغاز می‌شود و تا لایه بالایی مربوط به کاربرد ادامه می‌یابد. لایه فیزیکی این محور، با ساختار جمع‌آوری داده از حسگرهای هوشمند در IoT متناظر است و در ادامه این اطلاعات در لایه سایبری و با کمک تحلیل کلان‌داده به صورت یک آگاهی (نتیجه‌گیری از داده و اطلاعات) نمایان می‌شود. در نهایت و در لایه کاربرد، دانشی از وقایعی که رخ می‌دهد استخراج می‌شود. باید توجه داشت که در صورت لزوم، از برخی از لایه‌های فوق می‌توان عبور کرد و مستقیم به لایه بالاتر رفت، مانند سیستم‌هایی که بخشی از داده خود را نه مستقیماً از لایه فیزیکی و حسگرهای موجود بلکه از ابر داده حاوی اطلاعات خام یا تحلیل شده و در لایه‌های بالاتر خود (لایه سایبری) دریافت می‌کنند. نمونه ملموس این ساختار، دریافت اطلاعات و یا آگاهی موجود از بانک داده هواشناسی می‌باشد. دقت در مدل معماری مرجع برای همزاد دیجیتال نشان می‌دهد که در بالاترین سطح، لایه همزاد دیجیتال اضافه شده است که ارتباط آن با محور سمت راست (یکپارچگی[۵] همزاد دیجیتال) به عنوان یک مزیت مهم به شمار می‌رود.

۲. در محور سمت راست، چهار سطح یکپارچگی همزاد دیجیتال به سلسله‌مراتب تحول داده اولیه و نتایج مستخرج از تحلیل آنها را اشاره دارد. انواع مختلف همزاد دیجیتال بر اساس انتخاب تکنیک‌های پایه در این چهار سطح توصیف و مشخص می‌شوند. تفاوت این چهار سطح در نحوه جمع‌آوری و دریافت اطلاعات در سطح سایبری، مدل‌ها، شبیه‌سازی‌ها و ارتباط بلادرنگ و یا ناپیوسته در ارتباط بین شیء فیزیکی و همزاد مجازی آن است. در بالاترین سطح یعنی همزاد دیجیتال پیشگویانه، دانش نهایی استخراج شده و بکار گرفته می‌شود.

۳. محور میانی حلقه تکراری از فعالیت و رشد یک محصول و چرخه ایجاد ارزش آن را نشان می‌دهد. در حقیقت، همه لایه‌های نشان داده شده در محورهای راست و چپ، در حلقه پیوسته رشد و توسعه میانی

[۵] Integration

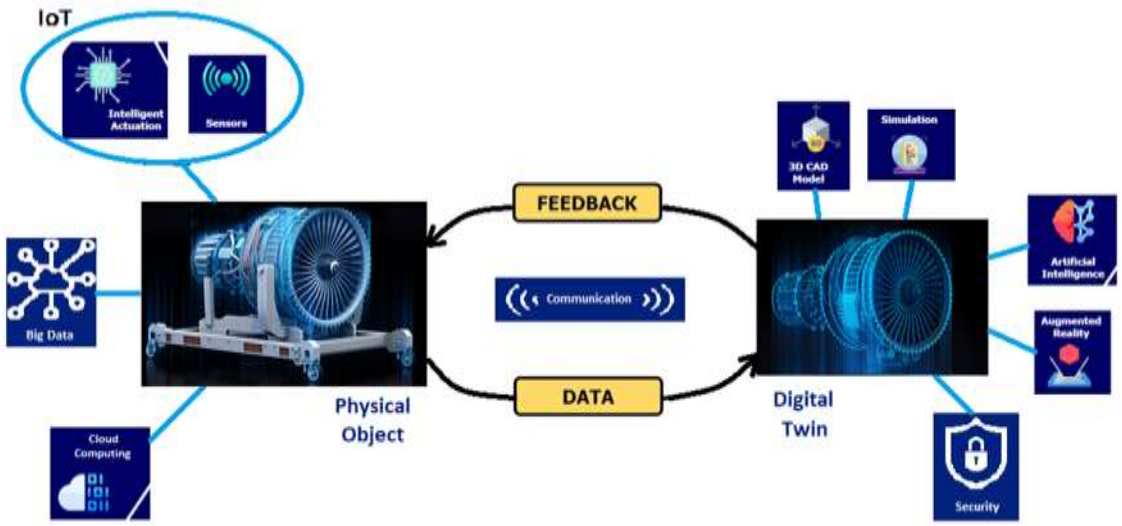
به هم متصل می‌شوند. همچنین این محور نشان می‌دهد که با تغییر داده، نمونه دیجیتال (در محور سمت راست) توسعه یافته و تغییرات را بازتاب می‌کند. به علاوه، چرخه ایجاد ارزش می‌تواند با مقایسه سناریوهای گذشته و نحوه پاسخ همزاد دیجیتال به پیشگویی آینده پرداخته و نقش مهمی را در ایم مدل ایفا کند.

۱-۴-۳ فناوری‌های تشکیل دهنده همزاد دیجیتال

همه تعاریفی که از همزاد دیجیتال در انقلاب صنعتی چهارم ارایه شده‌اند بر ارتباط دو طرفه بین شیء فیزیکی و همزاد مجازی آن تأکید دارند. در حقیقت، دستیابی به همزاد دیجیتال در هر سه حوزه دنیای فیزیکی، سیستم ارتباطی و بخش مجازی نیازمند فناوری‌ها و ابزارهایی هستند که تعیین کامل آنها به استخراج چرایی رویکرد به این فناوری و نتیجه مورد انتظار از آن در یک کاربرد خاص نیاز دارد. لذا اگرچه فناوری‌های تشکیل‌دهنده همزاد دیجیتال باید با دانش نوین بکارگرفته شوند، اما لزوماً با فناوری‌های پیشرو در انقلاب صنعتی چهارم منطبق نیستند. این مطلب ناظر بر این موضوع است که در مقالات، پروژه‌ها و پیاده‌سازی‌های مختلفی که از همزاد دیجیتال در دسترس می‌باشد تعاریف و فناوری‌های تشکیل‌دهنده همزاد دیجیتال می‌تواند کمی متفاوت باشند.
بررسی‌ها نشان می‌دهد که به طور عمومی، همزاد دیجیتال به فناوری‌های زیرساختی نیاز دارد که برخی از آنها در حد تکامل یافته قابل استفاده هستند و برخی به سرعت درحال رشد و توسعه می‌باشند. در گزارش حاضر، این فناوری‌ها به دو دسته فناوری‌های پایه و توانمندساز تقسیم‌بندی می‌شوند. این دو دسته که زیرساخت‌های اصلی را در بر می‌گیرد، شامل فناوری‌های زیر هستند:

۱. فناوری‌های پایه:
   i. محاسبات ابری و زیرساخت‌های پردازشی،
   ii. اینترنت اشیاء (IoT)
   iii. تحلیل کلان داده‌ها.
۲. فناوری‌های توانمندساز:
   i. مدل‌سازی و شبیه‌سازی،
   ii. هوش مصنوعی،
   iii. بصری‌سازی، واقعیت مجازی و واقعیت افزوده،
   iv. زیرساخت‌های ارتباطی و مخابراتی
   v. امنیت اطلاعات.

شکل ۱-۵ ساختار یک همزاد دیجیتال را نشان می‌دهد که در آن، فناوری‌های فوق به تصویر کشیده شده‌اند.



شکل ۱-۵. همزاد دیجیتال و فناوری‌های تشکیل‌دهنده آن

۱-۵ سوابق به کارگیری فناوری همزاد دیجیتال در صنعت برق با تمرکز بر بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی

۱-۵-۱ تحول در شبکه برق

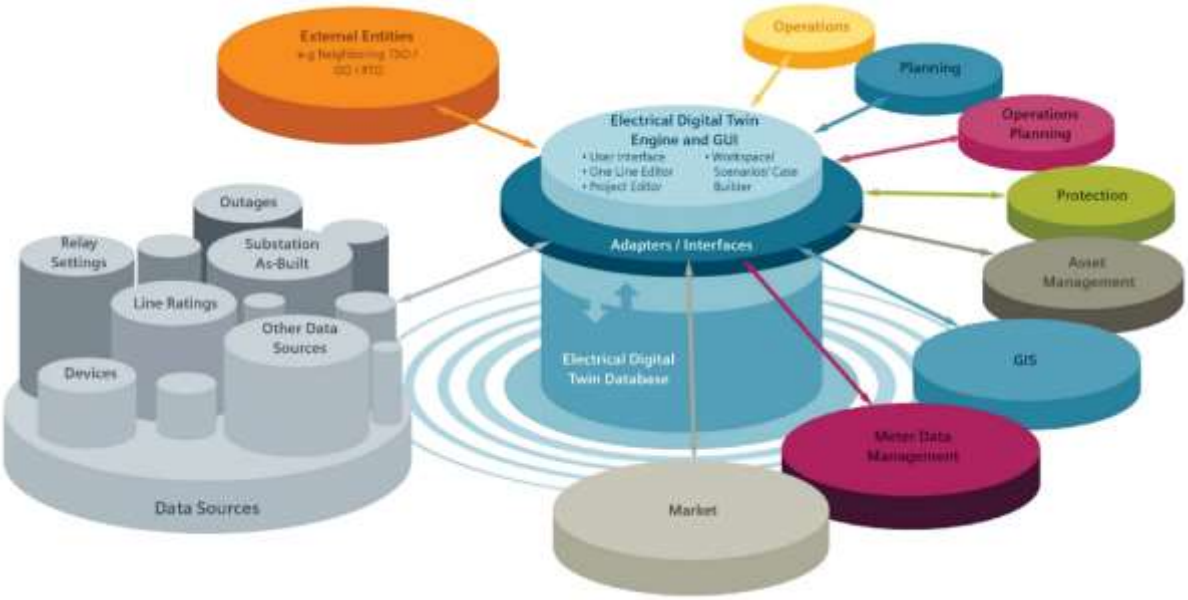
بیش از یک قرن از تولید اولین سیستم‌های انرژی الکتریکی می‌گذرد. در این مدت، شبکه و صنعت برق دچار تغییرات و تحولات بسیاری شده است، به طوری که امروزه این صنعت به یکی از بزرگترین و پیچیده‌ترین شبکه‌های ساخت انسان، از جنبه‌های مختلف مانند اقتصادی، استراتژیکی و تکنولوژیکی تبدیل شده است. امروزه فناوری‌های بسیاری در دنیا بوجود آمده‌اند که می‌توانند کارآمدی شبکه برق را افزایش و بهبود دهند. ترکیب فناوری اطلاعات و ارتباطات با شبکه برق امکان ارتباط دوسویه و مستقیم را بین تولیدکننده و مصرف‌کننده فراهم کرده و مفهوم و ساختار جدیدی به نام شبکه هوشمند را ایجاد کرده است. شبکه هوشمند شامل مجموعه‌ای از سیستم‌ها و اجزا هوشمند می‌باشد که در سرتاسر شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. ورود عناصر مختلف ازجمله منابع تولید پراکنده تجدید پذیر، سیستم‌های ذخیره انرژی، سیستم‌های کنترل ولتاژ و... به سیستم قدرت در کنار مزایای متعدد، باعث ایجاد چالش‌های متعددی در سیستم توزیع برق شده است. در حالت کلی، ورود این اجزا، سیستم توزیع را که ذاتاً گسترده و درهم‌تنیده است، پیچیده‌تر می‌نماید و این امر باعث می‌شود بهره‌گیری از اجزای جدید در سیستم دشوارتر گردد. برخی از پارامترها که شبکه هوشمند را پیچیده‌تر می‌کند عبارت است از:

- تکامل شبکه برق مخصوصا از نظر افزایش تعداد تجهیزات
- افزایش استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی
- تحول در سازوکارهای عملیاتی مانند بحث مدیریت تقاضا و خاموشی‌ها
- ارتباط حوزه های شبکه برق با بازار برق

تغییرات ایجاد شده در شبکه هوشمند باعث می‌شود ساختار شبکه متنوع، غیر خطی، سلسله مراتبی و توزیع شده گردد و مدلسازی و روش‌های تجزیه تحلیل سنتی پاسخگوی نیاز فعلی نباشد. همزاد دیجیتال به عنوان یک فناوری نو ظهور، تحول ساز و پیشرو قابلیت طراحی و مدیریت بخش‌های مختلف شبکه هوشمند را فراهم می‌کند.

۱-۵-۱-۱ مدیریت اطلاعات شبکه برق در همزاد دیجیتال

در توسعه امکانات شبکه هوشمند مبتنی بر همزاد دیجیتال می توان به امکان استفاده از تحلیل کلان داده‌ها برای بررسی تخمین‌های روش‌های سنتی مدلگرا و همچنین داده‌های واقعی اشاره کرد. با استفاده از تحلیل این داده‌ها که دارای حجم بالا هستند می‌توان خطای سیستم در حوزه‌های مختلف تخمین را بدست آورد و در راستای بهبود روش‌های استفاده شده اقدام کرد. شکل ۱-۶ ساختار کلی همزاد دیجیتال شبکه برق را نشان می دهد.در سمت چپ شکل، منابع داده ورودی به همزاد دیجیتال نشان داده شده است که شامل انواع نمونه برداری از تجهیزات، داده‌های حسگرها و اطلاعات خاموشی و غیره می‌باشد. در قسمت مرکزی شکل، هسته مرکزی همزاد دیجیتال دیده می‌شود که با بخش‌های مهم شبکه هوشمند از جمله مدیریت دارایی، مدیریت کنتورهای برق، بازار برق، سیستم حفاظت در ارتباط است.



شکل ۱-۶. همزاد دیجیتال برای مدیریت سراسری در شبکه برق و انرژی [۹]

در ادامه به برخی از مهمترین توانمندی‌های همزاد دیجیتال در صنعت برق اشاره شده است:

- آگاهی بلادرنگ از وضعیت شبکه

دستیابی به داده‌های شبکه به صورت برخط با استفاده از روش‌های سنتی تقریبا غیر ممکن می باشد و اغلب دستیابی به داده‌های شبکه، مبتنی بر مدلسازی ریاضی بخش‌های مختلف شبکه می‌باشد. این روش‌های مدلسازی بسیاری از متغیرهای محیطی را در نظر نمی‌گیرند و ساده‌سازی‌های بسیاری را انجام می‌دهند. همچنین در این روش‌ها افزایش حجم و ابعاد داده‌ها مدل‌ها را بسیار پیچیده‌تر می‌کنند. بنابراین پردازش و تصمیم‌گیری در زمان مقتضی تقریبا امکان-پذیر نمی‌باشد. با استفاده از فناوری همزاد دیجیتال نوع جدیدی از مدلسازی شبکه که مبتنی بر داده می‌باشد ارائه

می‌شود که امکان رصد شبکه به صورت بر خط را امکان‌پذیر می‌کند. در همزاد دیجیتال با استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پردازش داده‌ها با ابعاد بالا و در زمان کم امکان‌پذیر می‌باشد و امکان نظارت و مدیریت برخط شبکه هوشمند فراهم می‌شود.

- آزمون وآزمایش مجازی

یکی از مزایای همزاد دیجیتال امکان انجام آزمون‌های مختلف بر روی آن می‌باشد. با استفاده از این امکان می‌توان به طور مجازی نتایج شبیه‌سازی ایده‌های مختلف در مدیریت شبکه را مورد ارزیابی قرار داد. همزاد دیجیتال با کمک فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا، داده‌های لازم برای آگاهی از شرایط سیستم را کسب می‌کند و با استفاده از آنها و شبیه‌سازی سیستم، آزمون‌های مجازی بر روی سیستم اجرا می‌کند. بررسی نتایج آزمون مجازی با در نظر گرفتن شرایط واقعی انجام می‌شود و به این ترتیب امکان اتخاذ تصمیمات فنی مبتنی بر همزاد دیجیتال فراهم می‌شود.

- تحلیل جریان شبکه برق

در سالهای گذشته برای رفع مشکلات روش‌های سنتی مدل‌سازی و تحلیل شبکه، نرم‌افزارهایی مانند متلب برای شبیه‌سازی استانداردهای جریان برق، امکان مطالعه و بررسی برخی از حالت‌های تحلیل جریان برق را ارائه کرده است. اما تحلیل توسط این ابزارهای سنتی با توجه به گستردگی در شبکه هوشمند بسیار سخت می‌باشد. با استفاده از فناوری همزاد دیجیتال با توجه به استفاده از یادگیری ماشین امکان تحلیل جریان برق به صورت برخط وجود دارد و به این ترتیب می‌توان جریان برق را با دقت بالا پیش‌بینی کرد. این تحلیل‌ها می‌تواند در راستای آزمون و آزمایش مجازی مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۵-۱-۲ چالش‌های صنعت برق و راهکارهای همزاد دیجیتال

در این بخش به منظور بررسی ابعاد پوشش حوزه‌های مختلف صنعت برق توسط همزاد دیجیتال، تعدادی از چالش‌های مهم در صنعت برق و راهکارهای همزاد دیجیتال در هر چالش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول ۱-۳ نمونه‌های چالش‌های هر حوزه از صنعت برق و راهکارهای پیشنهادی توسط همزاد دیجیتال بیان شده است.

جدول ۱-۳. تعدادی از چالش‌ها در حوزه‌های شبکه هوشمند و راهکارهای همزاد دیجیتال

حوزه	چالش صنعت	امکانات همزاد دیجیتال
تولید	• پایش نیروگاه • شبیه‌سازی و آموزش • مدیریت تولید انرژی	• پایش برخط ژنراتورها، تعمیرات و توسعه توربین‌های بادی مبتنی بر همزاد دیجیتال (شرکت‌های جنرال الکتریک و زیمنس جهت مانیتورینگ برخط ژنراتورها، تعمیرات و توسعه آنها محصولاتی مبتنی بر همزاد دیجیتال ارائه نموده‌اند. همچنین برای آموزش نیز نرم‌افزارهایی ارائه شده است [۱۰] و [۱۰]) • مدیریت انرژی و تخمین توان مورد نیاز (همزاد دیجیتال امکانات و سیع تخمین مبتنی بر یادگیری ماشین را ارائه می‌نماید [۱۱]. این قابلیت به هنگام بروز خرابی و یا ادغام شبکه با دیگر شبکه‌ها حیاتی است.) • تجمیع انواع داده‌ها با هدف دستیابی به پایش، نگهداری و تعمیرات نیروگاه‌ها

حوزه	چالش صنعت	امکانات همزاد دیجیتال
		• بهبود عملکرد بخش‌های فیزیکی، افزایش کارآیی، کاهش زمان خاموشی نیروگاه و صرفه‌جویی در هزینه‌ها
انتقال	• فرسودگی شبکه • مدیریت خطوط • مدیریت دارایی • امنیت	• پایش هوشمند شبکه توسط همزاد دیجیتال و پیش‌بینی خرابی‌های احتمالی (به واسطه آگاهی از شرایط برخط شبکه وجود خواهد داشت [۱۱]) • شبیه‌سازی و مدیریت خطوط • مدیریت دارایی‌ها به واسطه ایجاد موجودیت‌های مجازی • ارتقاء امنیت خطوط انتقال و مکان‌یابی خطاها توسط همزاد دیجیتال [۱۱] و [۱۲]
توزیع	• مدیریت پیک • مدیریت خاموشی • مدیریت شبکه و تجهیزات مدرن (تولید پراکنده و ...)	• پایش برخط شبکه توزیع از جمله بهبود تخمین زمان‌های پیک مصرف و کاهش خاموشی (مانند استفاده از همزاد دیجیتال در شبکه برق کالیفرنیا [۱۳]) • استخراج الگوی مصرف مشترکان و اطلاعات مربوط به شبکه تولید پراکنده • بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها و تجهیزات توزیع
فراهم-کننده سرویس	• بهبود ابزار های برنامه-ریزی و تصمیم‌گیری • بهبود نرم‌افزارهای شبیه‌سازی • مدیریت مصرف	• ارائه دیدگاه جامع در راستای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری‌های کلان شرکت‌ها • ارتقاء نرم‌افزارهای شبیه‌سازی موجود در صنعت برق به نسل جدید شبیه‌سازی‌ها (همزاد دیجیتال) • ارائه تحلیل‌ها و مدل‌های مدیریت مصرف
بازار	• مدیریت بازار خرده فروشی • طراحی بازار انعطاف‌پذیر • توسعه مدل‌های کسب وکار	• ساخت مدل‌های مجازی بزرگ از بازار و شبکه برق • به واسطه تبدیل تمامی مؤلفه‌های فیزیکی در بازار برق به مؤلفه‌های مجازی امکان ساخت مدل‌های مجازی بزرگ از بازار و شبکه وجود دارد که باعث افزایش شفافیت می‌شود.
بهره‌برداری و کنترل	• پیش‌بینی تولید توان از منابع انرژی تجدیدپذیر در نقاط مختلف شبکه • مشاهده‌پذیری و کنترل-پذیری شبکه • بهبود قابلیت اطمینان • روش‌های نوین نگهداری و تعمیرات	• استفاده از همزاد دیجیتال برای کاهش هزینه سالانه خرابی تجهیزات و وقوع خطا در شبکه برق • پایش و کنترل شبکه، علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان، کاهش خاموشی‌ها و کاهش تلفات
مشترکین	• دسترسی برخط به اطلاعات • مصرف بی‌رویه برق • کیفیت برق مصرفی • منابع تولید پراکنده	• پایش برخط اطلاعات مصرف مشترکین • کنترل کیفیت برق مصرفی به صورت هوشمند • قابلیت اندازه‌گیری اطلاعات کنتورها توسط موبایل

۱-۶ بررسی پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای به کارگیری فناوری همزاد دیجیتال در صنایع به صورت عام

همزاد دیجیتال به عنوان یک فناوری نوین در انقلاب‌های صنعتی چهارم و پنجم مطرح شده است که می‌تواند صنایع را از ابعاد مختلفی رشد و توسعه دهد. مفهوم همزاد دیجیتال در صنایع، یک مفهوم گسترده است که به کاربرد آن در یک صنعت خاص و همچنین به تجهیز یا محصول مورد بررسی و سطح عملکرد آن بستگی دارد. لذا پس از تبیین و تعیین اهداف استفاده از همزاد دیجیتال در بخش صنعتی مورد نظر، مطالعه و استخراج پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای به کارگیری این فناوری، لازم و ضروری است. باید توجه داشت که به‌کارگیری و توسعه همزاد دیجیتال در یک صنعت را می‌توان برای هر سه بخش تجهیزات مورد استفاده در آن صنعت، محصول نهایی و حوزه مدیریت و کنترل صنعتی به کار برد.

بر اساس بررسی‌های انجام شده در خصوص مفهوم همزاد دیجیتال و همچنین با در نظر داشتن فناوری‌های پایه و توانمندساز که همزاد دیجیتال را تشکیل می‌دهند، پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای به کارگیری فناوری همزاد دیجیتال در همه انواع صنایع، را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱-۶-۱ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم در حوزه مدیریت داده

یکی از حوزه‌های نوین توسعه در هر صنعت که بر رشد و بهبود محصولات، فروش و خدمات تمرکز دارد محور داده و اطلاعات و بهره‌گیری از نوآوری‌های این بخش می‌باشد. ستون اصلی و اولیه و از مهمترین بخش‌های توسعه یک همزاد دیجیتال نیز، مدیریت داده است. همزاد دیجیتال در حوزه داده، سه نیازمندی اصلی دارد[۱۴]:

- در ابتدا همزاد دیجیتال به یک مدل کلی از دارایی یا تجهیز نیاز دارد. این مدل باید یک چارچوب کلی و همچنین عناصر و قطعات تجهیز را تشریح کند.
- دوم، یک دانش مبتنی بر داده دارایی (مانند داده سری زمانی)، ارتباطات داده‌ها و همچنین یک مرکز ذخیره برای نتایجی که به مرور کسب می شوند مورد نیاز هستند.
- سوم، همزاد دیجیتال به یک موتور تحلیل یا مرکز تحلیل‌گر رفتار آن تجهیز برای تشریح، تشخیص، پیش‌بینی و نتیجه‌گیری جهت استخراج فرامین لازم نیاز دارد. این حوزه، می‌تواند الگوریتم‌های اختصاصی تعریف شده برای هر محصول یا تجهیز را در بر داشته باشد.

در طول زمان حیات یک محصول، انواع مختلف و متنوعی از داده صنعتی مرتبط با آن تولید می‌شود. لذا از نظر زمانی، سه نوع اصلی از داده برای همزاد دیجیتال مورد نیاز است: داده گذشته، داده زمان حال و داده آینده[۱۵]. داده گذشته به اطلاعات طراحی و توسعه محصول و عملکرد آن در گذشته اشاره دارد. داده زمان آینده نیز اطلاعات پیش‌گویانه و پیش‌بینی شده برای آینده عملکرد محصول را دربر می‌گیرد.

به علاوه، ساختار و فرمت داده‌ها از منابع مختلف می‌تواند متفاوت باشد. تجمیع این داده‌ها و یکسان‌سازی آنها (و یا یکسان‌سازی نتایج مستخرج از هر گروه اطلاعات) یکی از چالش‌های مهم برای تولید منبع داده ورودی همزاد دیجیتال محسوب می‌شود.

۱-۶-۲ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالش‌های یکپارچه‌سازی سیستم

همزاد دیجیتال یک مدل شبیه‌سازی چند بعدی، چند مقیاسی و احتمالاتی از یک تجهیز پیچیده است که از حسگرها و مدل‌های فیزیکی به روز برای بازتاب زندگی فیزیکی یک تجهیز در دنیای دیجیتال و بالعکس استفاده می‌کند. پلتفرم همزاد دیجیتال، برنامه کاربردی حیاتی برای کسب و کارها را از طریق معماری ماژولار مبتنی بر میکروسرویس ارائه می دهد که می‌تواند داده‌ها از منابع مختلف مانند داده‌های ساختاریافته، یا بدون ساختار با فرمت‌های مختلف از جمله عدد، متن، صدا، تصویر یا حتی ویدئو را یکپارچه کند. چالش یکپارچه‌سازی سیستم این است که مفهوم این منابع داده‌ای متنوع را استخراج و مشخص کند و همان دارایی یا فرآیندی را که فرامدل همزاد دیجیتال را تشکیل می‌دهد، توصیف کند. پلتفرم همزاد دیجیتال این فرامدل را مدیریت می‌کند و آن را برای انجام تجزیه و تحلیل ساده تا تجزیه و تحلیل‌های با استفاده از هوش مصنوعی/ یادگیری ماشینی توسعه می‌دهد تا یک مدل خدمات واقعی را تحقق بخشند. گسترش یک پلتفرم برای انجام شبیه‌سازی، تجسم در زمان واقعی به انجام «تحلیل‌های What-if» کمک می‌کند و در نتیجه راه‌هایی را برای افزایش عمر دارایی فراهم می‌کند. همانطور که قبلا هم اشاره شد، همزاد دیجیتال فناوری‌هایی مانند اتوماسیون فرآیند رباتیک، رایانش ابری، واقعیت افزوده و ... را هم در بر می‌گیرد که منجر به افزایش پیچیدگی یکپارچه‌سازی می‌شود.

هدف اصلی یکپارچه‌سازی دستیابی به الزامات کیفی حیاتی و مهم از طریق راهبردهای کنترلی تولید تطبیقی و مونتاژ انتخابی برای محصولاتی است که همزاد دیجیتال آنها تهیه شده است [۱۶]. یکپارچه‌سازی همزاد دیجیتال محصول مورد نظر، امکان سنجش انحرافات محصول تولیدشده از عملکرد محصول مورد انتظار را فراهم می‌کند. به این ترتیب، امکان اعمال استراتژی‌های عملکرد محور جدید برای کنترل کیفیت محصول تولیدی وجود دارد. انتخاب‌ها و انطباق‌های متوالی بهینه در سیستم‌های تولید بسیار پیچیده را می‌توان از طریق شبیه‌سازی‌های همزاد دیجیتال یکپارچه شده با محصول ارزیابی کرد. بنابراین، ارزیابی فنی و اقتصادی حلقه‌های کنترلی عملکرد محور متفاوت و جدید امکان‌پذیر می‌شود. استفاده از همزادهای دیجیتال عامل اصلی در نظر گرفتن امکانات جدید برای تولید محصولات با دقت بالا بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های تکنولوژیکی برای تولیدکنندگان است [۱۷].

۱-۶-۳ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالش‌های ارتباطی

یکی از موارد مرتبط با چالش‌های امنیتی، کارایی و همچنین محیطی بحث ارتباطات در یک همزاد دیجیتال می‌باشد. بحث ارتباط بسیار تنگاتنگی با نوع تجهیز به عنوان مثال ثابت یا متحرک بودن آن، تعداد اجزاء سیستمی که همزاد دیجیتال آن ایجاد می‌شود و همچنین نحوه پیاده‌سازی واحدهای ذخیره‌سازی اطلاعات، واحدهای پردازشی و برنامه‌های کاربردی دارد. در حالت کلی سیستم می‌تواند شامل اجزایی به صورت متحرک و سیار باشد که در ادامه برای ارتباطات همزاد دیجیتال در [۱۸] مدلی پیشنهاد شده است. همزاد دیجیتال یک نگاشت یکپارچه از سیستم فیزیکی در فضای دیجیتال می‌سازد. با انجام این کار، همزاد دیجیتال می‌تواند از قدرت محاسباتی و هوش مصنوعی قدرتمندی در ابر برای کار بر روی سیستم فیزیکی مربوطه استفاده کند و بر این اساس بازخوردهایی را برای کمک به سیستم فیزیکی دنیای واقعی در تکمیل وظایف عملی خود ارائه می‌دهد. در مقالات موجود عمدتاً همزاد را به عنوان یک رویکرد شبیه سازی/مثل‌سازی در نظر می‌گیرند، در حالی که چارچوب ارتباطی برای آن به وضوح تعریف نشده و مورد بحث قرار

نگرفته است. با ترکیب ارتباطات بی‌سیم، هوش مصنوعی و محاسبات ابری چارچوب جدیدی برای ارتباطات سیار می‌تواند فراهم شود.

۱-۶-۴ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالش‌های امنیتی

امنیت در همزاد دیجیتال از دو جنبه حائز اهمیت است. بسیاری از حملات را می‌توان از طریق همزاد دیجیتال شبیه‌سازی نمود و راهکارهای امنیتی لازم برای یک سیستم واقعی را با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی همزاد آن امتحان و پیاده‌سازی کرد. در این حالت همزاد دیجیتال یک ابزار در خدمت برقراری امنیت می‌باشد. اما از طرف دیگر اگر همزاد دیجیتال مورد حمله سایبری قرار گیرد خود می‌تواند خطر جدی برای سیستم فیزیکی ایجاد نماید. این حمله می‌تواند شامل موارد مختلفی باشد که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم:

- دستکاری داده‌ها: همان‌طور که در قسمت ارتباطات توضیح داده شد DR از یک طرف با سیستم فیزیکی در ارتباط است و داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرها را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و از طرفی با واحدهای پردازش داده و تصمیم‌گیری و یا با دیگر همزادهای دیجیتال مرتبط می‌باشد. اگر با دستکاری داده‌های جمع‌آوری شده از سیستم فیزیکی، داده‌های اشتباه به همزاد دیجیتال داده شود نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و به تبع آن تصمیم‌گیری‌های انجام شده نیز اشتباه خواهند بود و این حمله می‌تواند باعث خرابکاری در سیستم فیزیکی شده و هزینه زیادی را به سیستم فیزیکی وارد کند. همچنین داده‌های شبیه‌سازی شده و تصمیمات اخذ شده بر مبنای این شبیه‌سازی نیز می‌تواند در مسیر رسیدن به سیستم فیزیکی دستکاری شود و سیستم فیزیکی دستورات اشتباهی که منجر به نابودی خود می‌شود را اجرا نماید. در اینجا امنیت پروتکل‌های ارتباطی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. یکی از نقاطی که می‌تواند آسیب‌پذیر باشد ارتباط سیستم فیزیکی با DR است که در صورتی که این ارتباط به صورت بی‌سیم باشد و از ارتباطات IOT و IIOT استفاده گردد امنیت ارتباطات نسبت به ارتباطات سیمی و فیبرنوری پایین‌تر خواهد بود. ارتباطات بین بخش شبیه‌سازی و تصمیم‌گیر بستگی به پیکربندی سیستم به منظور پیاده‌سازی همزاد دیجیتال دارد. اگر این دو بخش در یک محل پیاده‌سازی شوند امکان دسترسی هکر به ارتباطات بین این دو بخش بسیار کاهش می‌یابد. ارتباطات بین همزادهای دیجیتال مختلف نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد و هر چه تعداد همزادهای دیجیتال افزایش یابد برقراری امنیت بین این نقاط و کنترل مسیرهای ارتباطی دشوارتر خواهد بود. در صورتی که از ابر برای ارتباطات استفاده شود برای امنیت ارتباطات می‌توان از روش‌های غیر متمرکز ایمن مانند بلاکچین استفاده نمود. البته اطلاعاتی که بر روی بلاکچین ذخیره می‌شود می‌بایست اطلاعات ارزیابی شده و مورد تایید باشند زیرا در صورتی که این اطلاعات خود غلط باشند نمی‌توانند تاثیر مفیدی بر روی امنیت و عملکرد سیستم فیزیکی داشته باشند و به این مساله GIGO[۶] گفته می‌شود. از آنجایی که بلاکچین یک پایگاه داده و دفتر ثبت توزیع شده است اطلاعات ورودی و خروجی به بخش DR می‌تواند با تایید یک سری از افراد/سیستم‌ها و استفاده از الگوریتم اجماع خاصی بر روی بلاکچین ذخیره شود تا از دستکاری اطلاعات توسط هکرها در امان بماند. همچنین قراردادهای هوشمند می‌توانند در اجرای برنامه‌ها و

[۶] Garbage in-garbage out

تصمیمات اتخاذ شده در بخش تصمیم‌گیر نقش مهمی داشته باشند و از آنجایی که تغییر در این گونه قراردادها نیز عملا غیر ممکن است، قراردادهای هوشمند مسیر ایجاد اختلال هکر در دستکاری اطلاعات تصمیم‌گیری شده و دستورات کنترلی به سیستم فیزیکی را می‌بندند.

- استفاده از همزاد دیجیتال برای رسیدن به نقاط ضعف سیستم: در صورتی که هکر بتواند به بخش ورودی و خروجی DR دسترسی پیدا کند، می‌تواند با وارد کردن ورودی‌های دلخواه اثر آن بر روی سیستم را بررسی کرده و به نقاط ضعف سیستم پی ببرد و از این نقاط ضعف برای ضربه زدن به سیستم فیزیکی استفاده نماید. البته این روش می‌تواند توسط افراد غیر هکر و در حقیقت برای افزایش امنیت سیستم و شناسایی نقاط ضعف و از بین بردن آن‌ها استفاده شود که به آن بازیگون‌سازی[۷] گفته می‌شود. شاید تنها راه جلوگیری از سوء استفاده از همزاد دیجیتال به این روش کنترل ورودی و خروجی‌ها و دسترسی‌ها می‌باشد.

۱-۶-۵ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالش‌های کارایی

مسائل مربوط به عملکرد و کارایی مستقیماً به محدودیت‌های موجود در منابع سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مرتبط است که جریان کارآمد داده‌ها بین سیستم‌های فیزیکی و دیجیتالی را تضمین می‌کند و امکان دستیابی به تمامی پتانسیل-های همزاد دیجیتال در کاربردهای صنعتی را فراهم می‌کند. یکی از متمایزترین و منحصربفردترین ویژگی‌های همزادهای دیجیتال، توانایی آنها در نمایش و نظارت بر وضعیت همزادهای فیزیکی خود در زمان واقعی است. با این حال، اطمینان از تبادل اطلاعات در زمان واقعی بین همزادهای دیجیتالی و فیزیکی بسیار چالش برانگیز است [۱۹]. مسئله اطمینان از جریان داده‌ای کارآمد بین دارایی‌ها (تجهیزات) فیزیکی و همزادهای دیجیتالی متناظرشان، و سختی کار با کلان داده‌ها در ارتباطات بلادرنگ در [۲۰] تشریح شده است. حصول اطمینان از ذخیره‌سازی کارآمد، پردازش و تجزیه و تحلیل حجم زیادی از داده‌ها یکی دیگر از چالش‌هایی است که مستقیما بر روی کارایی همزاد دیجیتال تاثیر می‌گذارد. وجود داده‌های مورد نیاز، مرتبط و کافی از اصلی‌ترین نیازمندی‌های کارایی در همزاد دیجیتال محسوب می‌شود. علاوه بر این، داده‌ها می‌بایست از سطح دقت مناسبی برخوردار باشند تا پیش‌بینی‌ها، تصمیمات و عملکرد همزاد دیجیتال هم رضایت بخش باشد. انعطاف‌پذیری، ماژولار بودن، مقیاس‌پذیری، طولانی بودن زمان اجرا و توسعه همزاد دیجیتال، کمبود سرعت و پهنای باند شبکه ارتباطی از دیگر مواردی هستند که بر روی کارایی همزاد دیجیتال تاثیر می‌گذارند. تضمین قابلیت اطمینان و استحکام[۸] همزاد دیجیتال، به ویژه در شرایط غیرعادی که بر مفروضات سیستم واحد تأکید دارد، یکی دیگر از چالش‌ها محسوب می‌شود. سیستم‌های هوشمند قوی مانند همزاد دیجیتال می‌بایست تحت هر شرایطی (شرایط عادی و شرایط پیش‌بینی نشده) عملکرد و کارآیی قابل قبولی را از خود به نمایش بگذارند [۲۱]. به منظور افزایش کارآیی از طریق استحکام، می‌بایست به جای انتقال خطاها از یک جزء به یک جزء دیگر، خطاها را در سیستم ایزوله و جدا کرد [۲۲].

---

[۷] Gamification

[۸] Robustness

همانطور که عنوان شد، همزاد دیجیتال یک مدل با همانند بالا ارائه می‌دهد و چرخه عمر محصول را به صورت لحظه‌ای به روز می‌کند. بنابراین، سیستم همزاد دیجیتال می‌تواند با استفاده از داده‌های دریافتی وضعیت فعلی یک تجهیز فیزیکی را در دنیای مجازی بازتولید کند، به طوری که با اضافه شدن اطلاعات اضافه، مدل همزاد دیجیتال بهبود می‌یابد. توانایی ثبت و پردازش اطلاعات جاری، این امکان را برای همزاد دیجیتال فراهم می‌کند تا وضعیت‌های پیش‌بینی نشده و نامطلوب ناشی از عوامل مختلفی مانند خطای ارتباطی، خرابی شبکه، تعاملات نادرست انسانی و غیره را پیش‌بینی و کاهش دهد. همزاد دیجیتال تحلیل داده‌ها را برای اجرای وظایف تشخیصی، بهینه‌سازی و پیش‌بینی انجام می‌دهد. با این حال، پیش‌بینی دقیق سیستم‌ها با پیچیدگی ساختاری به دلیل نیاز به حجم داده زیاد جهت افزایش دقت بسیار چالش برانگیز است.

مقیاس‌پذیری که در حوزه چالش‌های یکپارچه‌سازی سیستم مطرح شد، به صورت مستقیم بر روی کارایی همزاد دیجیتال هم تاثیرگذار است. ماژولار بودن توانایی ادغام، افزودن یا جایگزینی مدل‌ها با مدل‌های موجود است [۲۳]. ایده رویکرد ماژولار، ساخت ماژول‌های قابل استفاده مجدد و پارامتربندی[۹] شده مربوط به موجودیت‌های فیزیکی به صورت از پیش‌ساخته است. وقتی موجودیت‌های فیزیکی تغییر می‌کنند، ماژول‌ها تغییرات مربوطه را بر اساس پارامترها استخراج و به همزاد دیجیتال منتقل می‌کنند. از طریق رویکرد ماژولار، زمان مدل‌سازی تا حد زیادی کاهش می‌یابد. هنگامی که طراحی تجهیز تغییر پیدا کند، تغییر مربوطه در ماژول متناظر در همزاد دیجیتال هم انجام می‌شود تا انعطاف‌پذیری همزاد دیجیتال هم افزایش یابد. همزاد دیجیتال انعطاف‌پذیر نه تنها می‌تواند طراحی فعلی را تأیید کند، بلکه می‌تواند به سرعت سایر راه‌حل‌های طراحی ممکن را با تعدادی آزمایش مورد بررسی و تأیید قرار دهد.

ویژگی اساسی رویکرد ماژولار، پارامتربندی ماژول است. بر اساس پارامتربندی، ماژول‌هایی که عملکردهای یکسان یا مشابه دارند برای تشکیل ماژول‌های عملکردی کپسوله می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که به راحتی قابل تغییر و استفاده مجدد هستند. مدل‌سازی کشیدن و رها کردن[۱۰] توسط رویکرد ماژولار پشتیبانی می‌شود، که می‌تواند حجم کار برنامه‌نویسی و زمان مورد نیاز برای مدل‌سازی را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. رویکرد ماژولار می‌تواند یک مدل شبیه‌سازی در واحدهای ماژول، که مستقل از یکدیگر هستند، را ایجاد و همکاری چند نفره را تسهیل کند.

۱-۶-۶ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالش‌های سازمانی

مطالعات نشان می‌دهد که طراحی و توسعه همزاد دیجیتال به شدت متأثر از تصمیم‌گیری‌های سازمانی هستند. به عنوان مثال، اگر یک شرکت در مدیریت داده، استراتژی ضعیفی داشته باشد و در زیربخش‌های ذخیره و نگهداری طبقه‌بندی شده اطلاعات، و یا به‌روز رسانی داده در بازه‌های زمانی مشخص به دقت عمل نکند، سطح مناسب و قابل قبولی از کیفیت داده در اختیار کاربر نخواهد بود. لذا اگر یک سازمان یا شرکت تصمیم می‌گیرد که دیجیتالی شدن را آغاز کند و یا بهبود دهد و در این راستا از همزاد دیجیتال استفاده کند، ضروری است که راه‌های اصلی را دقیق برنامه‌ریزی کرده و زیربناهای اساسی را به درستی پایه‌گذاری نماید.

---

[۹] Parameterized

[۱۰] Drag-and-drop

گروه چالش‌های سازمانی، مشکلاتی را شامل می‌شود که در زمان مواجهه با یک فناوری نوین (مانند همزاد دیجیتال)، در داخل یک سازمان ایجاد می‌شود. اولین مشکل در این مبحث، تغییر در حوزه کارکنان یک شرکت است. این مشکل نتیجه مستقیم نوسان و بی‌ثباتی در بازار کار در سال‌های اخیر می‌باشد که باعث شده است بسیاری از نیروهای کار ماهر و آموزش‌دیده، بخش صنعتی را ترک کنند. این پدیده شرکت‌ها را مجبور به افزایش حقوق نیروی کار خاص و ماهر کرده است.

در مجموع، می‌توان چالش‌های سازمانی را به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱. مقاومت در مقابل ورود یک فناوری
۲. مشکلات اداری و موانع بازدارنده سازمانی در پیشبرد یک موضوع
۳. کمبود نیروی کار ماهر و متخصص
۴. کمبود استانداردها و قوانین یکپارچه و تسهیل‌گر
۵. پیچیدگی در تعیین نیازمندی‌ها و انتظارات واقع‌گرایانه
۶. مشکلات تعیین ارزش پیشنهادی مشخص بر اساس پیشبردهای ارایه شده توسط همزاد دیجیتال در آینده
۷. کمبود سرمایه برای تحقیقات در این حوزه
۸. چالش‌های تصمیم‌گیری و سرمایه‌گذاری در حوزه فناوری‌های توانمندساز همزاد دیجیتال

باید توجه داشت که تحقیقات نشان داده است که پیاده‌سازی و توسعه همزاد دیجیتال می‌تواند به صورت چشمگیری کارایی یک شرکت یا سازمان را تحت تأثیر قرار دهد. این امر می‌تواند پس از مرحله توسعه کامل همزاد دیجیتال و حصول کارایی آن در دنیای واقعی مورد ارزیابی قرار گیرد.

یکی از راه‌حل‌ها در خصوص برطرف کردن بخشی از چالش‌های سازمانی، توسعه دانش کارکنان است. این توسعه چه از نظر آموزش دانش و مهارت‌های فناوری‌های نوین و چه از جنبه تغییر فعالیت‌ها به سمت فناوری‌های مطرح روز، می‌تواند کمبود نیروی ماهر و متخصص در زمینه همزاد دیجیتال را جبران کند. این متخصصین با مطالعه و استخراج نیازمندی‌های همزاد دیجیتال به شرکت‌ها کمک می‌کنند که مدیریت داده قبل از اجرای همزاد دیجیتال به نحو مطلوب انجام شود.

۱-۶-۷ پیش‌نیازها و زیرساخت‌های لازم برای چالش‌های محیطی

در نهایت، مقوله مسائل محیط خارجی موانع غیرفنی خارجی را که لزوماً برای یک سازمان ذاتی نیستند، گرد هم می‌آورد. به عنوان مثال، مرجع [۲۴] دوگانگی پیشرفت‌های تکنولوژیکی جهانی را مورد بحث قرار داده است. از یک سو، شرکت‌ها از چنین پیشرفت‌هایی سود می‌برند، در حالی که از سوی دیگر، رشد و نرخ‌های متفاوت پذیرش فناوری‌های جدید، شرکت‌هایی را که مایل به پذیرش آن‌ها هستند، با چالش مواجه می‌کند. در مقاله [۲۵] عدم وجود برنامه‌های آموزشی مناسب در دانشگاه‌های سراسر جهان را گزارش کرده است که منجر به کمبود مهارت‌های خاص برای توسعه همزادهای دیجیتال در نیروی کار آینده می‌باشد.

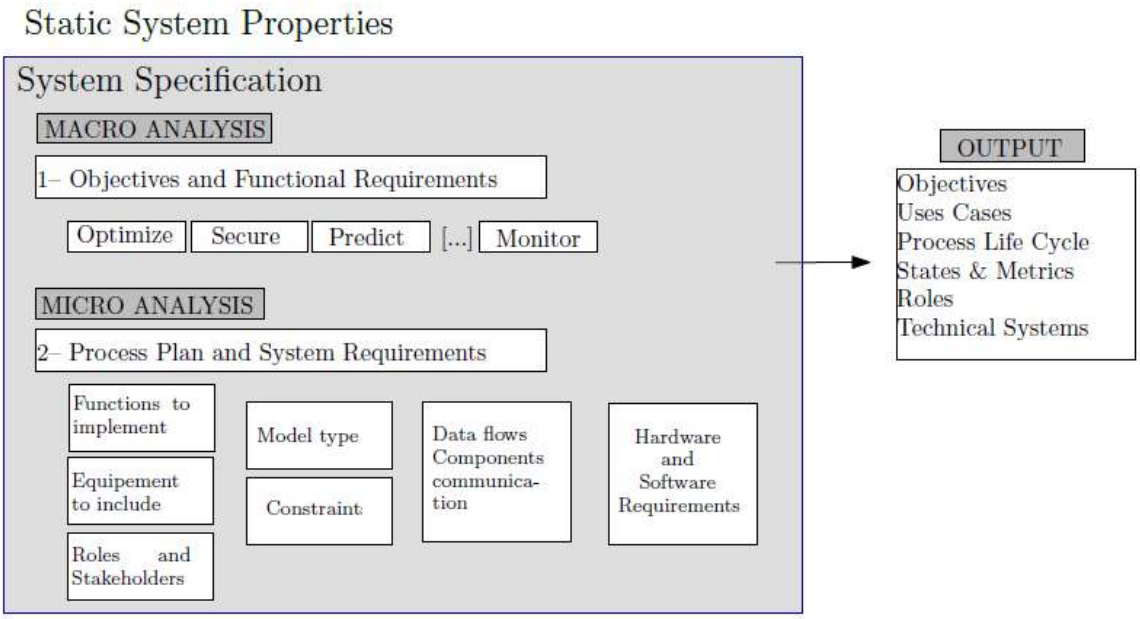
با توجه به مقالات، تصمیمات همزاد دیجیتال یک شرکت تا حد زیادی تحت تأثیر محیط خارجی قرار می‌گیرند [۲۶]. به طور خاص، در سطح جهانی، روندهای تکنولوژیکی و فرهنگی از محیط بیرونی بر توانایی شرکت‌ها در اتخاذ تصمیمات سازمانی مناسب در رابطه با همزادهای دیجیتال تأثیر می‌گذارند. به طور خاص، فقدان استانداردسازی، روش‌شناسی و ابزار برای توسعه و اجرای همزادهای دیجیتال، عدم بلوغ مقالات در مورد موضوع و فقدان آموزش در دانشگاه‌هایی که به طور خاص به همزادهای دیجیتال رسیدگی می‌کنند، تأثیر منفی بر توانایی شرکت‌ها برای تصمیم‌گیری مناسب در مورد اجرای همزاد دیجیتال دارد. به ویژه، توانایی یک شرکت برای یافتن متخصصان واجد شرایط، تعیین انتظارات واقع بینانه و سرمایه‌گذاری مناسب در فناوری‌های توانمندساز می‌تواند توسط عوامل خارجی به خطر بیفتد.

در سطح سازمانی، فرآیندهای توسعه همزاد دیجیتال تا حد زیادی تحت تأثیر تصمیمات سازمانی هستند [۲۷]. به عنوان مثال، اگر یک شرکت دارای یک استراتژی مدیریت داده ضعیف است که در آن داده‌ها ایزوله شده‌اند، در میان پایگاه‌های داده پراکنده هستند و به ندرت در طول زمان به‌روزرسانی می‌شوند، اطمینان از سطح مناسبی از کیفیت، امنیت و یکپارچگی داده‌ها چالش برانگیز است. بنابراین بسیار مهم است که شرکتی که تصمیم می‌گیرد سفر دیجیتالی‌سازی را آغاز نماید و همزادهای دیجیتال را پیاده‌سازی کند، زیرساخت مناسبی را برای ساخت یک همزاد دیجیتال ایجاد کند.

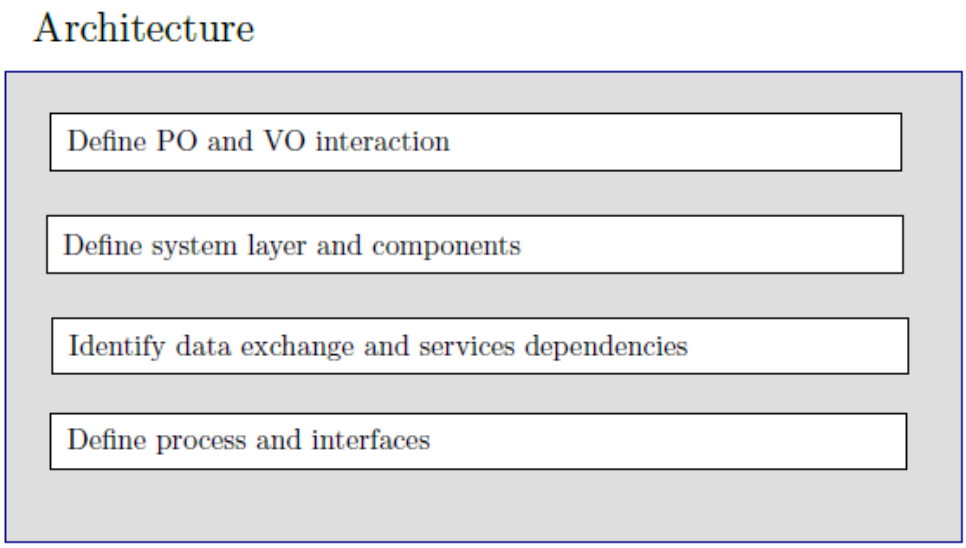
در سطح توسعه‌ای، پروژه‌های همزاد دیجیتال معمولاً اجزای IT را از طریق تکرار مراحل و تعاملات متقابل بین آنها توسعه می‌دهند. با توجه به مقالات مروری در این زمینه [۲۸]، پروژه‌های توسعه DT شامل موانع مربوط به یکپارچه سازی سیستم، کیفیت داده، امنیت سیستم و توسعه توابغ بنیادی DT است. در این زمینه، در دسترس نبودن داده‌ها، ناسازگاری بین سیستم‌های مختلف که بخشی از DT هستند، و احتمال سرقت داده‌های حساس می‌تواند توسعه یک DT را حتی در قالب یک نمونه اولیه یا اثبات مفهوم غیرممکن کند. توسعه عملکردهای بنیادی DT تا زمانی که نیازهای جدید شناسایی شود انجام می‌شود، که نشان دهنده آغاز یک تکرار جدید در فرآیند توسعه DT است.

۱-۷ بررسی نیازمندی‌های پیاده‌سازی همزاد دیجیتال به صورت کلی

در این بخش به پیاده‌سازی همزاد دیجیتال پرداخته شده است. فاز طراحی همزاد دیجیتال شامل طراحی عملکردی و معماری سیستم می‌باشد. اولین مرحله از فرآیند ساخت یک DT نیاز به مدل‌سازی ویژگی‌های استاتیکی سیستم دارد. هدف تعیین الزامات و محدودیت‌های سیستم از جمله توابع و تجزیه عملکردی است. جریان داده‌ها و ارتباطات مدل نیز باید در نظر گرفته شود. همچنین باید معماری و ساختار منطقی سیستم و الزامات فنی برای پیاده‌سازی DT از جمله قطعات سخت افزاری و نرم افزاری مدنظر قرار گیرد. در شکل ۱-۷ الزامات مشخصات سیستم و خروجی آن نشان داده شده است که در ادامه به طور مفصل در مورد آن توضیح داده خواهد شد. در شکل ۱-۸ نیز مراحل طراحی معماری همزاد دیجیتال در قالب بخش‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱-۷. الزامات مشخصات سیستم و خروجی آن [۲۹]



شکل ۱-۸. مراحل طراحی معماری همزاد دیجیتال [۲۹]

جسم مجازی[۱۱] *(VO)* معمولاً به عنوان آینه‌ای از جسم فیزیکی[۱۲] *(PO)* طراحی می‌شود. بنابراین، هر دو جزء ممکن است در طول چرخه زندگی DT با هم بوجود بیایند. در صورتی که PO از قبل در زمان طراحی وجود داشته باشد، اولین مرحله بر نحوه اتصال VO به PO متمرکز خواهد بود. همچنین ممکن است در مرحله طراحی VO، جزء PO اصلا وجود نداشته باشد. در چنین حالتی، یک نمونه اولیه PO می‌تواند به منظور هدایت ساخت VO ساخته شود، به این ترتیب نمونه اولیه و VO برای اعتبارسنجی برخی از انتخاب‌های طراحی، ترکیب می‌شوند. صرف نظر از وجود

[۱۱] Virtual Object

[۱۲] Physical Object

PO در زمان طراحی، VO باید در پایان از PO یا نمونه اولیه آن پیروی کرده و آن را منعکس نماید. در صورتی که محصول در شرایط بحرانی مورد استفاده قرار گیرد، می‌توان از شبیه‌سازی برای پیش‌بینی برخی نقص‌ها استفاده کرد [۳۰].

یکی از ویژگی‌های مهم DT همگام‌سازی مداوم آن با تجهیز فیزیکی مورد نظر و بروزرسانی آن است. برای مثال، تغییرات در سیم‌کشی یا موقعیت فیزیکی نیز باید در VO در نظر گرفته شود. به همین دلیل، در طول طراحی سیستم، سیستم باید به گونه‌ای طراحی شود که سازگار باشد و مدل‌های مهندسی به روز شده یا تغییرات فرآیندها را در نظر بگیرد.

۱-۷-۱ مشخصات سیستم

مدل عملکردی ابتدا الزامات هدف و عملکرد DT را تعیین می‌کند. به عنوان مثال، آیا DT به بهینه سازی، ایمن‌سازی، نظارت یا پیش‌بینی فرآیند فیزیکی کمک می کند. سپس، لازم است تجزیه و تحلیل شود که کدام عملکرد یا فعالیت‌های فرآیند فیزیکی در DT گنجانده می‌شود. برای این منظور، باید یک برنامه فرآیند[۱۳] را با در نظر گرفتن هر دو فرآیند فیزیکی و عملکردهای DT، تعیین نمود؛ این که کدام تجهیزات را شامل می‌شود، کدام جنبه مدل‌سازی را شامل می‌شود (به عنوان مثال، مکانیک، فضای سه بعدی، الکترونیک، یا موارد دیگر) و نحوه تبادل اطلاعات هر دو مؤلفه چگونه است. علاوه بر این، می‌بایست الزامات غیرعملکردی DT را نیز تعیین نمود [۳۱].

۱-۷-۱-۱ الزامات عملکردی

این مرحله الزامات هدف و عملکرد یک DT را برای ایجاد مشخصات آن تعریف می‌کند. همچنین مشخص می‌کند که کدام اطلاعات را باید بر اساس PO استخراج و توصیف کنیم. هدف این است که الزامات DT به صورت دقیق تعریف شوند و تا آنجا که ممکن است اطلاعات بیشتری برای ساخت سیستم به دست آوریم. تجزیه و تحلیل درست الزامات عملکردی، کلیدی برای مدل‌سازی سیستم است. در مقالات، DTها برای اهداف مختلفی مانند بهینه‌سازی، ایمن‌سازی، نظارت، پیش‌بینی، آموزش یا بهبود فرآیند فیزیکی استفاده شده‌اند. به طور معمول، یک DT یک یا چند مورد از این قابلیت ها را ترکیب می‌کند.

- بهینه‌سازی: تمام داده‌های تولید شده توسط DT را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های داده‌ای پیشرفته برای ارائه اطلاعات دقیق، تجزیه و تحلیل کرد. در نتیجه، DT می‌تواند عملکرد یک سیستم را بهبود بخشد، کارایی آن را افزایش دهد، هزینه‌ها یا خطرات را کاهش دهد و تصمیم‌گیری را بهبود بخشد. در این مورد، برای کنترل سیستم و ارزیابی آنها نیاز به تعریف اهداف خاص و قابل اندازه‌گیری سیستم و همچنین توابع هزینه می‌باشد.
- بهبود امنیت: یکی دیگر از کاربردهای DT ها بهبود ارزیابی ریسک، شناسایی و ارزیابی اقدامات متقابل برای محافظت از یک سیستم است. به عنوان مثال، DTها می‌توانند به صورت موازی با یک CPS برای تجزیه و تحلیل امنیت و ایمنی سیستم در طول عملیات آن اجرا شوند. در [۳۲] کاربرد یک DT برای یک برنامه امنیت سایبری در CPS بررسی شده است. CPS ها دارای دو لایه به هم وابسته هستند: لایه فیزیکی و لایه

[۱۳] Process plan

سایبری. برای محافظت از عملیات سیستم در برابر تهدیدات، هر دو باید ایمن شوند. کاربردهای اصلی بهبود طراحی امنیتی، تشخیص پیکربندی نادرست، تست نفوذ[۱۴]، بهبود انطباق[۱۵] و آموزش امنیتی است. علاوه بر این، همزاد دیجیتال امکان تجزیه و تحلیل تکنیک‌های تشخیص، کاهش و انعطاف پذیری در VO را قبل از استقرار راه حل بر روی اجزای کنترل کننده فیزیکی فراهم می‌کند. اطلاعات موجود در DT امکان شناسایی حملات و همچنین بازیابی وضعیت سیستم را با استفاده از داده‌های VO فراهم می‌کند. مزیت دیگر این است که DT ممکن است برای تشریح تجزیه و تحلیل پیش‌بینانه مورد استفاده قرار گیرد که منجر به ارزیابی بهتر ریسک می‌گردد. به عنوان مثال، ممکن است سیستم را برای آزمایش سناریوهای غیرمنتظره و تجزیه و تحلیل پاسخ سیستم مورد حمله قرار داد.

- نظارت و پیش‌بینی: PO توسط حسگرهایی که داده‌ها را به صورت بلادرنگ جمع‌آوری و ذخیره می‌کنند، نظارت می‌شود. هدف، پردازش و استفاده از چنین داده‌های جمع‌آوری شده برای پیش‌بینی رویدادها است. این امر برای کنترل PO و همچنین سازماندهی گروه‌های کاری، ایجاد هم‌افزایی بهتر و استفاده بهینه از زمان آن‌ها سودمند است که منجر به بهره‌وری بیشتر می‌شود. علاوه بر این، بخش صنعتی معمولاً به ارزیابی سناریوهای متعدد برای تصمیم‌گیری در سطح مدل کسب و کار نیاز دارد. این ارزیابی برای مدیریت ریسک‌ها و هزینه‌ها و برای پیش‌بینی تقاضا بسیار مفید است.
- بهبود توسعه‌ای: یکی دیگر از کاربردهای DTها بهبود طراحی یک محصول و آزمایش عملکردهای آن است. طراحی سنتی محصول به یک تحلیلگر کاربردی نیاز دارد تا مشکلات طراحی محصول و بهبود آن را شناسایی کند. با استفاده از DT، می‌توان مقادیر زیادی از اطلاعات را تجزیه و تحلیل کرد و تصمیمات طراحی دقیق‌تری گرفت که نوآوری‌های بهتری در محصول ایجاد می‌کند. به عنوان مثال در [۳۳] یک DT با این هدف پیشنهاد شده که امکان تجزیه و تحلیل و بهبود فرآیند طراحی محصول را فراهم کند. این DT یک روش طراحی مجدد محصول را با استفاده از سوابق عملکردی به دست آمده از مدل‌ها ایجاد می‌نماید.

در این حوزه، DTها راه‌حلی را برای ایجاد محیطی برای آزمایش اشیا با استفاده از مدل‌ها، بدون انجام آزمایش فیزیکی آن ارائه می‌دهند. در [۳۴] یک DT برای تکامل فرآیندهای تولید سنتی به روش‌های پایدارتر که اثرات زیست محیطی و اجتماعی ایجاد شده را کنترل می‌کند، پیشنهاد شده است. برای این منظور، سیستم تکامل دینامیکی کل چرخه زندگی را بر اساس یک سیستم نقشه برداری DT تجزیه و تحلیل می‌کند. هدف، ایجاد یک فرآیند تولیدی است که قادر به کاهش، استفاده مجدد، بازیافت، بازیابی، طراحی مجدد و ساخت مجدد محصول باشد. در سطح تولید، هدف کاهش مصرف انرژی، مصرف منابع، زباله‌های سمی و خطرات شغلی است [۳۵].

- آموزش کاربر - DT ها بستری را برای آموزش اپراتورها در محیطی کم‌هزینه و کم‌خطر فراهم می‌کنند. استفاده از یک محیط پویا به گسترش تجربیات آنها در کنترل عملکرد واقعی سیستم کمک می‌کند، به ویژه در شرایط نگهداری، شرایط عملیاتی نامطلوب یا اضطراری [۳۶]. علاوه بر این، توانایی تصمیم‌گیری اپراتورها را افزایش داده و اثرات عملیات اشتباه یا نادرست را کاهش می‌دهد. DT ها به تکامل Education 4.0 کمک می‌کنند تا نیروی کار واجد شرایط‌تری ایجاد کنند و زمان تصمیم‌گیری در بخش صنعتی را کاهش دهند.

---

[۱۴] Penetration Test

[۱۵] Compliance improvement

برای این منظور، لازم است یک رابط انسان و ماشین (HMI[۱۶]) برای تعامل با DT اضافه شود. ادغام این قابلیت با واقعیت مجازی (VR) و واقعیت افزوده (AR) امروزه توجه‌ها را به خود جلب کرده است.

۱-۷-۱-۲ طراحی فرآیند

طراحی یک DT پیچیده است و شامل چندین بخش، مانند مدل‌ها، تقسیم‌بندی‌های داخلی، رابط‌ها، ویژگی‌های مواد، هندسه فضایی و نحوه مونتاژ کل سیستم و موارد دیگری از این دست می‌باشد [۳۷]. طراحی فرآیند توصیفی از فعالیت‌های فرآیند و روابط بین اجزایی که آنها را ایجاد کرده‌اند ارائه می‌دهد. همچنین تعیین می‌کند که کدام عملکردها و ویژگی‌های سیستم در DT مدل‌سازی شوند. اهداف اصلی طراحی فرآیند، شفاف‌سازی الزامات فرآیند، انتخاب مدل و نحوه مبادله داده‌ها است.

در بیشتر موارد، DT به یک پدیده (تجهیز یا سیستم) مورد نظر می‌پردازد، یعنی تنها بخشی از فرآیند در DT گنجانده می‌شود. به همین دلیل، تعیین ویژگی‌ها یا عملکردهایی که در DT گنجانده می شود، مهم است. در موارد دیگر، DTها ممکن است یک کپی یکسان از PO را دنبال کنند، اما این وضعیت باید مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد زیرا ممکن است پیچیدگی اضافی و اطلاعات اضافی را به همراه داشته باشد. برای این منظور در [۳۸] مجموعه‌ای از معیارها را برای تجزیه و تحلیل چگونگی تعریف DT مناسب برای یک سیستم، تعریف شده است. به طور مشابه، در [۳۹] رویکردی برای ارزیابی اینکه کدام زیرسیستم‌ها و عملکردها در DT پیاده‌سازی خواهند شد، پیشنهاد شده است. این مقاله زیرسیستم‌های DT را بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای اولویت‌دار برای هر جزء انتخاب می‌کند. اولویت، مؤلفه هایی را که باید گنجانده شوند برجسته می‌کند زیرا آنها منجر به بیشترین افزایش در قابلیت اطمینان کل سیستم می‌شوند و به طور همزمان حداقل هزینه مجموعه اجزا را برای اجرای یک DT نشان می‌دهند. برای این منظور، از رویکرد مهندسی سیستم‌های مبتنی بر مدل[۱۷] (MBSE) استفاده شده است.

طراحی فرآیند همچنین تعیین می‌کند که کدام تجهیزات در هر زیرسیستم مدل‌سازی شوند. این اطلاعات به تعیین الزامات توسعه DT و اینکه کدام داده‌ها باید از فرآیند فیزیکی جمع‌آوری شوند کمک می‌کند. هدف ایجاد مجموعه‌ای جامع از داده‌ها برای توصیف سیستم فیزیکی است. به عنوان مثال، یک مجموعه داده سیستم ممکن است شامل هندسه، پارتیشن‌های داخلی، خواص مواد، مداخلات فنی گذشته، داده‌های محیطی، اندازه‌گیری‌های تغییر شکل و غیره باشد. این داده‌ها برای ساخت، اعتبارسنجی، کالیبراسیون و حفظ DT استفاده می‌شوند.

به عنوان نتیجه، نمای دقیقی از عملکردها، فعالیت‌ها، ویژگی‌ها و حالت‌های سیستم که در نظر گرفته می‌شوند به دست می‌آید. همچنین موارد استفاده برای سیستم، معیارها و الزامات، مانند محدودیت‌های نرم‌افزار و سخت‌افزار، شناسایی و اولویت‌بندی می‌شوند. برای عملکردهای انتخاب شده، داده‌ها از طریق حسگرهایی که روی PO قرار داده شده‌اند جمع آوری می شوند و به VO جایی که باید ساختار یافته شوند، ارسال می‌شوند. از این رو، لازم است تعریف شود که کدام داده در نظر گرفته می‌شود، به عنوان مثال، چرخش، اندازه‌گیری‌های هندسی، خصوصیات مواد، خواص دینامیکی سیستم و غیره. طراحی فرآیند همچنین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل را تعیین می‌کند. سپس، این داده‌ها برای ساختن

[۱۶] Human Machine Interface

[۱۷] Model-based systems engineering

مدلی از PO طبقه‌بندی می‌شوند. معمولاً ترکیبی از الگوهای رفتاری، ساختاری و ارتباطی برای مدل‌سازی PO ضروری است. داده‌ها برای DT ضروری هستند. بنابراین، جریان داده‌ها باید به دقت طراحی شوند. DT باید نحوه تعامل اجزای سیستم واقعی با یکدیگر و نحوه تبادل اطلاعات را بازتولید کند. الگوهای ارتباطی نیاز به تحلیل و مدل‌سازی دارند. نکته دیگر برای تجزیه و تحلیل این است که DT چگونه داده‌ها را با کاربران مبادله می‌کند، به عنوان مثال، چگونه ذینفعان مختلف فرآیند با سیستم تعامل و از آن استفاده می‌کنند.

خروجی طراحی فرآیند، مشخصات سیستم شامل اهداف، موارد استفاده، جزئیات چرخه عمر فرآیند، حالت‌ها و معیارها، نقش‌ها، سخت افزار و نیازهای نرم‌افزاری سیستم است. این اطلاعات برای طراحی معماری سیستم و برای ساخت مدل سیستم مفید می‌باشد.

۱-۷-۱-۳ طراحی معماری

در مورد خواص یک DT و معماری اجزای مرتبط با آن اتفاق نظر واحدی وجود ندارد. با این حال، یک DT حداقل سه بخش دارد [۴۰]: یک مؤلفه فیزیکی (PO)، یک نسخه مجازی از این مؤلفه (VO) و اتصال برای تبادل داده‌های دو طرفه بین آنها. برخی از صاحب‌نظران گسترش معماری حداقلی را برای در نظر گرفتن اجزای بیشتر پیشنهاد می‌کنند. به عنوان مثال، در [۴۱] پیشنهاد شده است که یک DT حداقل دارای پنج بخش باشد: یک PO، VO آن و اتصالات، داده‌ها و خدمات آن‌ها. در [۴۲] یک معماری با هفت لایه پیشنهاد شده است که عبارتند از: PO متشکل از یک واحد کنترل، حسگرها و محرک‌ها، یک لایه ارتباطی مسئول جمع‌آوری داده‌ها و پردازش لبه داده‌ها و یک لایه امنیتی مسئول مدیریت ایمن جریان داده و لایه چهارم و پنجم نیز مربوط به ذخیره‌سازی داده‌ها و مدل‌سازی و بهینه‌سازی است. لایه ششم، لایه خدماتی است که مسئول توسعه برنامه‌های کاربردی داده محور پیشرفته یا توابع استاندارد تجزیه و تحلیل داده است. لایه هفتم وظیفه ارائه اطلاعات ارزش افزوده به ذینفع مناسب با استفاده از تجسم داده‌ها را بر عهده دارد. این لایه، همچنین شامل رویه‌هایی می‌شود که تصمیم‌گیری را برای کاربر و بازخورد اطلاعات به دستگاه فیزیکی را امکان پذیر می‌کند، به عنوان مثال، از طریق رابط ماشین انسانی (HMI) یا بازخورد مستقیم به واحد کنترل همزاد فیزیکی. این معماری فرآیند فیزیکی را در مرکز قرار می‌دهد و DT را حول عملکردهای دنیای واقعی می‌سازد. همچنین می‌توان آن را به صورت تدریجی برای افزودن اجزای جدید در چرخه‌های مختلف پیاده‌سازی ایجاد کرد.

علاوه بر این، معماری DT باید در طول زمان تکامل یابد تا تغییرات سیستم، مانند اجزای جدید، رابط‌های جدید یا اتصالات جدید به اجزای دیگر را در خود جای دهد، یا رفتار سیستم را تطبیق دهد. معماری همچنین باید از چندین مدل و اتصال با سایر DT ها پشتیبانی کند. به همین دلیل، در [۳۰] نشان داده شده است که معماری برای DT های صنعتی باید شامل چهار لایه زیر باشد: کسب و کار، خدمات، یکپارچه‌سازی و داده. لایه کسب و کار به فرآیندها و منطق مربوط به تولید کالا یا خدمات می پردازد. لایه خدمات نحوه ایجاد، کنترل و مدیریت اجزا و خدمات را کنترل می‌کند و همچنین امکان مدیریت و شبیه‌سازی DT ها را فراهم می‌کند. لایه یکپارچه‌سازی از ارسال اطلاعات به تمام اجزای سیستم پشتیبانی می‌کند. لایه داده منابع مختلف و سیستم‌های سازمانی مرتبط که یکپارچه شده‌اند را نشان می‌دهد. در نتیجه، این معماری برای اضافه کردن تغییرات حتی پس از راه‌اندازی سیستم سازگارتر است.

ترکیبی از دو رویکرد قبلی در [۴۳] ارائه شده است که یک معماری برای پیاده‌سازی DTهای اختصاص داده شده به مدیریت ریسک اپراتورها در فرآیندهای نیروگاهی ارائه کرده است. این مقاله سه بخش حداقلی (PO، VO و اتصال) را در نظر می‌گیرد و VO از ابزارهای کنترل، ابزارهای شبیه‌سازی، ابزارهای تشخیص و پیشگیری از خرابی و یک پلتفرم ابری برای به دست آوردن داده‌های بلادرنگ تشکیل شده است. در [۴۴] به مشکل چگونگی ایجاد یک معماری DT با قابلیت پیکربندی مجدد سیستم پرداخته شده و پیشنهاد شده است از یک پلت‌فرم استاندارد معماری باز برای تغییر سیستم در سطح کنترل (مثلاً برای ادغام یک ماژول نرم افزار جدید)، در سطح ماشین (برای افزودن ویژگی‌های جدید) یا در سطح سیستم (مثلاً برای تغییر سیستم و چیدمان پیکربندی) استفاده شود. در [۴۵] نیز چگونگی ایجاد معماری برای مدل‌سازی اطلاعات ناهمگن چند منبعی و نحوه ایجاد تعاملات بین انسان و ماشین با DT را بررسی می‌کند.

همانطور که در مرحله قبلی گزارش بیان شد، بیشتر نمونه‌های ارائه شده از معماری DT خود استفاده می‌کنند که ادغام آنها با یک سیستم در سطوح مختلف را دشوارتر می‌کند. به همین دلیل، در [۴] یک معماری مرجع برای DT به عنوان یک سرویس در Industry 4.0 پیشنهاد شده است که بر اساس مدل معماری مرجع برای Industry 4.0 است که با نام معماری RAMI 4.0 نیز شناخته می شود. معماری RAMI 4.0 درک مشترکی از موارد استفاده صنعتی ارائه می‌دهد که می‌تواند به عنوان یک مدل برای اغلب کاربردهای Industry 4.0 استفاده شود. این معماری بیشتر به عنوان یک سیستم و روابط برای پرداختن به ساختار اساسی عناصر، روابط، محدودیت‌ها و ویژگی‌های منطقی تعریف می‌شود که از یک معماری سرویس گرا[۱۸] (SOA) استفاده می‌کند که خدمات مختلفی را ارائه می‌دهد و کارهای پیچیده را به بسته‌های ساختاری ساده تقسیم می‌کند. در نتیجه، مدل مرجع DT از چهار بخش تشکیل شده است: یک لایه فیزیکی، یک لایه دیجیتال، یک لایه سایبری و ارتباط برای تبادل داده بین سه لایه. لایه فیزیکی ویژگی‌های واقعی مانند اشیا، دارایی‌ها، محصولات، پرسنل، تجهیزات، امکانات، سیستم‌ها، فرآیندها و محیط ها را تعریف می‌کند. حسگرها و محرک‌ها دو جزء اصلی متصل در لایه فیزیکی هستند. لایه دیجیتال داده‌ها را در فرمت‌های فایل خام یا فرمت‌های مختلف مانند طراحی به کمک رایانه[۱۹] (CAD) یا ساخت به کمک رایانه[۲۰] (CAM) ثبت می‌کند. لایه دیجیتال به ایجاد نسخه‌های دیجیتالی از اجزای فیزیکی اختصاص دارد. لایه سایبری شامل پردازش و ذخیره‌سازی ابری برای ساخت یک مدل داده پویا است که فناوری‌های محاسباتی مقیاس‌پذیر و توزیع‌شده مانند AWS، Azure Databricks، Hadoop و Google Analytics را ارائه می‌دهد. لایه سایبری همچنین چندین مزیت رقابتی از جمله حریم خصوصی داده‌ها، شفافیت، مقیاس‌پذیری و شخصی‌سازی را اضافه می‌کند. در راستای این لایه سایبری ابری، در [۴۶] تجزیه و تحلیل چگونگی ادغام‌های ابری در معماری DT برای CPS مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله استدلال شده است که ادغام فناوری های ابری در لایه سایبری CPS، مقیاس‌پذیری ذخیره‌سازی، محاسبات و قابلیت-های ارتباط بین دامنه‌ای را تضمین می‌کند. برای این منظور، درجات مختلفی از حالت‌های ترکیبی محاسبات-تعامل شناسایی شده و تعامل کنترل‌کننده با استفاده از یک شبکه باور بیزی[۲۱] طراحی شده است. این حالت‌ها همچنین شامل شامل قوانین فازی برای پشتیبانی از قابلیت‌های پیکربندی مجدد هستند.

[۱۸] service-oriented architecture

[۱۹] Computer-Aided Design

[۲۰] Computer-Aided Manufacturing

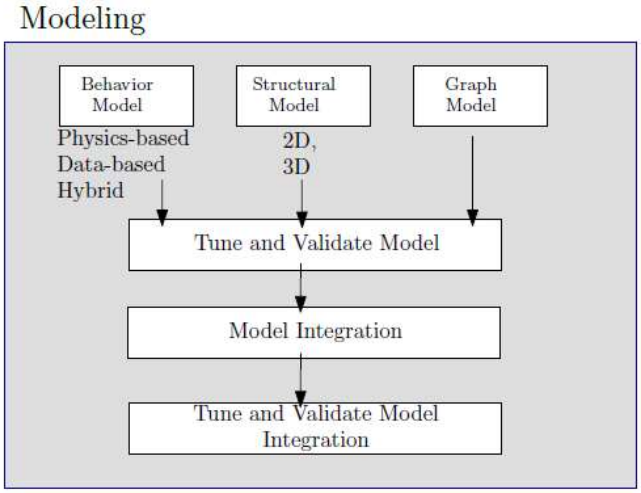
[۲۱] Bayesian belief

۱-۷-۲ مدل‌سازی همزاد دیجیتال

هسته یک DT مدل‌های مجازی است. به همین دلیل، مهمترین مرحله برای ساخت یک DT، ایجاد مدل‌های مجازی با کیفیت بالا برای بازتولید هندسه، ویژگی‌های فیزیکی، رفتارها و قوانین PO است. در یک DT، داده‌های فیزیکی بلادرنگ نیز ممکن است برای به روز رسانی مدل‌های مجازی و شبیه‌سازی فرآیند فیزیکی و تکامل آن مورد نیاز باشد. در این بخش نحوه ساخت مدل برای DT ارائه شده که شکل ۱-۹ این روند را نشان می‌دهد.

برای ایجاد یک DT لازم است تا اجزای فیزیکی واقعی آن مدل شده و VO آن‌ها استخراج شود. در ادامه به دسته‌بندی و توضیح مختصری در خصوص انواع روش‌های مدل‌سازی پرداخته شده است.

- مدل‌های رفتاری: این نوع مدل‌ها مشخصه‌ای از رفتار سیستم بر اساس فرآیند فیزیکی است که PO آن را کنترل می‌کند. در نتیجه، این مدل‌ها به یک توصیف ریاضی یا محاسباتی از نحوه ارتباط متغیرهای مورد نظر با یکدیگر اشاره می‌کنند (به عنوان مثال، برای درک چگونگی تعامل نیروها، شتاب، حرکت تند، جابجایی زاویه‌ای، شتاب زاویه‌ای و سایر پدیده‌ها در فرآیند فیزیکی)



شکل ۱-۹. فرآیند مدل‌سازی DT

رویکردهای اصلی برای ساخت مدل‌های رفتاری شامل استفاده از تکنیک‌های کنترل یا روش‌های مبتنی بر داده است. تکنیک‌های کنترل شامل مشاهده یک پدیده فیزیکی، توسعه درک آن و بیان آن در قالب معادلات ریاضی است. درک فرآیند فیزیکی سخت است و ممکن است در سیستم‌های پیچیده امکان پذیر نباشد. با این حال، ابزارهایی برای استدلال در مورد رفتار سیستم فراهم می‌کند، که برای تعمیم مدل‌ها به مسائل مشابه و همچنین برای خطاهای محدود مفید است. برعکس، مدل‌های مبتنی بر داده به عنوان یک جعبه سیاه کار می‌کنند و این مزایا را ارائه نمی‌دهند. نکات مثبت این رویکردها این است که انعطاف پذیرتر هستند و می‌توانند داده‌های تجربی جدید را در نظر بگیرند. همچنین ممکن است برای سیستم‌های پیچیده‌ای که درک فیزیک در آن‌ها امکان‌پذیر نیست، یا حتی در سیستم‌هایی که مدل‌های فیزیک را نمی‌توان اعمال کرد، مانند شبکه‌های 5G، مناسب‌تر باشند. مدل‌های به‌دست‌آمده توسط داده‌ها ممکن است توسط مجموعه داده‌ها جهت‌گیری داشته باشند و خطاها را نمی‌توان تخمین زد [۴۷].

- مدل‌های کنترلی: مدل‌های مبتنی بر فیزیک هستند، به این معنا که از قوانین فیزیک استفاده می‌کنند و نتایج شبیه‌سازی‌شده را با اطلاعات شناخته‌شده که با مدل‌های ریاضی بیان می‌شوند، مقایسه می‌کنند [۴۸]. کنترل، عملکرد اصلی DT های ساخته شده برای CPS است و هدف آن حفظ سیستم در سطح قابل قبولی از عملکرد در پاسخ به اختلالات است. در CPS، فرآیندهای فیزیکی اطلاعاتی را در اختیار اجزای سایبری قرار می دهند و اجزای سایبری فرآیندهای فیزیکی را کنترل می‌کنند. به منظور پایداری، داده‌های بلادرنگ از فرآیند فیزیکی با استفاده از حسگرها جمع-آوری می‌شوند. داده‌ها به اجزای سایبری مخابره شده و برای محاسبه خروجی کنترل استفاده می‌شوند تا آن‌ها را به عملگرها برگرداند و فرآیند فیزیکی اصلاح شود.

یک مدل رفتار مبتنی بر تئوری کنترل را می‌توان با استفاده از توابع انتقال یا مدل‌سازی فضای حالت به دست آورد. به این ترتیب، واقعیت از لحاظ نظری با استفاده از روابطی که به سیگنال‌های ورودی و خروجی مربوط می‌شود، مدل‌سازی می‌گردد. با استفاده از این تکنیک، فرآیند طراحی با معادلات دیفرانسیلی شروع می‌شود که رفتار فرآیند فیزیکی تحت کنترل را مدل می‌کنند. سپس تابع انتقال را می‌توان از معادلات دیفرانسیل فرآیند، استخراج کرد. توابع انتقال و مدل‌سازی فضای حالت، نمایش‌های معادل هستند، یعنی می‌توان یکی را از دیگری مشتق نمود [۴۹].

- مدل‌های وابسته به داده: این مدل‌ها مبتنی بر ساختارهای داده‌ای هستند که تمام متغیرهای توصیف‌کننده واقعیت را در سطح انتخاب شده حفظ می‌کنند. با داده‌های ارائه شده توسط PO، می‌توان VO را با کمک کتابخانه های منبع باز هوش مصنوعی (AI) مانند TensorFlow، PyTorch یا OpenCV ایجاد کرد. این رویکرد بر این فرض استوار است که از آنجایی که داده‌ها مظهری از فیزیک شناخته شده و ناشناخته هستند، با توسعه یک مدل مبتنی بر داده، می توان فیزیک کامل را در نظر گرفت [۴۷].

برای ساخت این نوع مدل، نیاز به توسعه یک فرآیند چهار مرحله‌ای است که شامل تولید داده، جمع‌آوری داده، پیش‌پردازش داده‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها از طریق الگوریتم‌های هوش مصنوعی است. تولید داده به شدت مبتنی بر حسگرهایی است که اطلاعات را از PO جمع‌آوری می‌کنند. ابزارهای متعددی برای جمع‌آوری داده ها نیز وجود دارند که می‌توانند از جمع‌آوری داده‌ها به صورت بلادرنگ پشتیبانی کنند. پس از آن، سیستم دارای حجم انبوهی از داده‌ها خواهد بود. از این رو لازم است برای اطمینان از کیفیت و کامل بودن، داده‌ها پیش پردازش شوند. همچنین فشرده‌سازی و جمع بندی داده نیز ضروری است. این فرآیند مستلزم ارزیابی روابط بین متغیرها و تشخیص نویز است. این فرآیند مهندسی داده همچنین شامل پاک‌سازی داده‌ها برای تصحیح یا حذف داده‌های پرت و نادرست است. برای این منظور، عملیاتی مانند فیلتر کردن، مدیریت مقادیر گم شده یا اشتباه و حذف اطلاعات اضافی و تکراری استفاده می‌شوند. علاوه بر این، یکپارچه‌سازی داده‌ها، تبدیل داده‌ها و غنی‌سازی داده‌ها نیز بخشی از فرآیند مهندسی داده‌ها هستند. آپاچی اسپارک[۲۲] یک

[۲۲] Apache Spark

چارچوب مفید برای پردازش داده‌های مبتنی بر حافظه است. در نتیجه عملیات پیش‌پردازش، دقت داده‌ها را افزایش و هزینه محاسباتی را کاهش می‌دهد.

- مدل‌های ترکیبی کنترل-داده: همانطور که قبلاً توضیح داده شد، هر دو مدل کنترل و داده دارای مزایا و معایبی هستند. مدل های ترکیبی سعی می کنند نقاط قوت را از هر دو تکنیک طراحی به دست آورند [۴۷]. استفاده از یک مدل کنترل، قابلیت تفسیر فیزیکی را تضمین می‌کند، که برای مثال در سیستم های مهندسی بسیار مفید است. مدل‌های یادگیری ماشینی به خوبی با داده‌ها سازگار هستند و برای کاربردهای بلادرنگ مناسب هستند [۵۰].

برای مثال، در [۵۱] ادغام مدل‌های مبتنی بر فیزیک با یادگیری ماشین را برای طراحی یک DT جهت پیش‌بینی آسیب ساختار پیشنهاد می‌کند. این استراتژی امکان استفاده از یک مدل قابل تفسیر (مبتنی بر فیزیک) را برای ساخت یک DT سریع (یادگیری ماشینی) فراهم می‌کند که به PO متصل می‌شود تا از تصمیمات مهندسی بلادرنگ پشتیبانی کند. علاوه بر این، مرجع [۵۲] نشان می‌دهد که چگونه می‌توان یک مدل هیبریدی DT از یک هیتر در یک سیستم فرآوری آب ایجاد نمود. این کار جزئیات مراحل به‌روزرسانی مدل فیزیکی و سیستم فرآیند را با استفاده از مدل‌های مبتنی بر داده تجهیزات فرآیند شرح می‌دهد. به این ترتیب، با کمک داده‌های تاریخچه برای آموزش مدل‌های ML، DT می‌تواند به طور مداوم در طول زمان بهبود یابد. همچنین در [۵۳, ۵۴] یک مدل کنترل ترکیبی برای سیستم‌های دینامیکی خطی با یک درجه آزادی که در دو مقیاس زمان عملیاتی مختلف تکامل می‌یابند، پیشنهاد می‌کنند. این رویکرد از یک مدل مبتنی بر فیزیک برای پردازش داده‌ها و پیش‌بینی‌های پاسخ و یک مدل یادگیری ماشین مبتنی بر داده برای تکامل زمانی پارامترهای سیستم استفاده می‌کند.

- سایر تکنیک‌های مدل‌سازی: برخی از تکنیک‌های مدل‌سازی از فیزیک سیستم استفاده نمی‌کنند، بلکه از رابطه اجزاء استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، می‌توان از مدل‌های گراف برای نشان دادن مدل‌های ارتباطی یا مدل‌های مبتنی بر دانش استفاده کرد که نیازمند داشتن یک متخصص برای تجزیه و تحلیل سیستم و طراحی دستی مدل‌سازی از ویژگی‌ها و رفتار است. در [۵۵] یک روش مبتنی بر هستی شناسی[۲۳] را برای مدل‌سازی قطعات به صورت ساخته شده[۲۴] پیشنهاد شده است. این مقاله استدلال می‌کند که این روش یک فرآیند استاندارد برای ایجاد DT ها را فراهم می‌کند. از طریق این تکنیک مدل‌سازی، مهندسان می‌توانند ارزیابی و بهینه‌سازی فرآیندهای ماشینی را انجام دهند. برای ایجاد DT، مدل، داده‌های فیزیکی و رابطه اطلاعات با محیط خارجی خود را محصور می‌کند. این روش از مدلی مبتنی بر واقع‌گرایی استفاده می‌کند و بر این باور استوار است که تمام آنچه می‌توانیم در مورد واقعیت بدانیم شامل شبکه‌هایی از مفاهیم است که مشاهدات را با پیوند مفاهیم با قوانین برای تعریف مدل‌ها، توضیح می‌دهد. واقع‌گرایی همچنین نشان می‌دهد که نمی‌توان واقعیت را آن‌طور که هست شناخت، بلکه فقط تقریبی‌هایی از آن را که توسط مدل‌ها نشان داده می‌شود، می‌توان شناخت. به این ترتیب، یک مدل اطلاعات منطقی می‌تواند مفاهیم مهم و

---

[۲۳] ontology

[۲۴] As-fabricated

روابط آنها را نشان دهد. علاوه بر این در [۵۶] پیشنهاد ایجاد مدل‌های DT با استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی یادگیری ماشین (ML) داده شده است. در این روش از مدل‌های مبتنی بر فرآیند به صورت یکپارچه با ML استفاده می‌شود تا مدل حاصل با داده‌های ورودی تطبیق داده شود. مدل مبتنی بر فرآیند، داده‌ها را با وضوح کمتری جمع‌آوری می‌کند تا موقعیت‌های واقعی را تقلید کند و مدل‌های ML را با استفاده از بخشی از ورودی‌های مدل مبتنی بر فرآیند ایجاد نماید.

- مدل ساختاری: این مدل، توصیفی ساختاریافته از روابط اتصال و مونتاژ بین ساختارهایی که عملکردها و رفتارها را اجرا می‌کنند، تعریف می‌کند. رابطه متقابل ساختار پایه و اساس انتقال و تبدیل مواد، انرژی، اطلاعات و رفتار حرکتی سیستم است. مدل ساختاری معمولاً شامل تعریف توپولوژی، طراحی چیدمان و بافر می‌باشد [۵۷]. یک مدل فیزیکی شبیه سازی خواص فیزیکی و بارها، تجزیه و تحلیل پدیده‌هایی مانند تغییر شکل، ترک خوردگی و خوردگی را امکان پذیر می کند [۵۸].

یک مدل هندسی هندسه، شکل‌ها، اندازه‌ها، موقعیت‌ها و مجموعه اجزای ماشین، حرکت[۲۵]، منطق و رابط‌های سیستم واقعی را منعکس می‌کند [۵۹]. برای مثال، مدل‌سازی سه بعدی یکی از تکنیک های مورد استفاده برای نمایش هندسه سیستم است. این فرآیند ایجاد یک نمایش ریاضی از سطح یک جسم می‌باشد. مدل‌های سه‌بعدی را می‌توان با اسکن سه‌بعدی شی یا از طریق نرم‌افزارهای تخصصی با استفاده از معادلات ساخت و در نهایت بر حسب منحنی‌ها و سطوح نشان داد [۴۷]. روش‌های مبتنی بر تصویر نیز جایگزین خوبی برای اندازه‌گیری‌های هندسی در مقایسه با تکنیک‌های اسکن هستند. رویکردهای مبتنی بر تصویر امکان بازسازی هندسه با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر مبتنی بر فتوگرامتری دیجیتال را می‌دهند. علاوه بر این، آنها را می‌توان با داده‌هایی تکمیل کرد که ساختار داخلی جسم را توصیف می کند که می تواند با روش های کلاسیک بازرسی، تصویربرداری حرارتی یا تکنیک های رادار به دست آید، که امکان بررسی ساختار فیزیکی را در عمق بیشتر فراهم می‌کند [۳۷]. در [۶۰] نحوه ایجاد مدل‌های هندسه دیجیتال با استفاده از طراحی به کمک رایانه (CAD) توضیح داده شده است. این مقاله در مورد مدل سازی CAD و روش های شبیه سازی ساخت در یک محیط مجازی بحث می‌کند که هدف آن ایجاد مدل‌های هندسی مفید برای طراحی DT است.

۱-۷-۲-۱ یکپارچه‌سازی مدل‌های اجزای سیستم

DT ها از ادغام مدل‌های پیچیده به هم پیوسته تشکیل می‌شوند، به این معنا که مدل‌های مختلف برای ایجاد نمای کامل‌تری از سیستم یکپارچه شده اند. ادغام باید جنبه‌های مختلفی را در نظر بگیرد که عبارتند از:

۱. چگونه اجزای مختلف با یکدیگر تعامل می‌کنند تا سیستم‌های پیچیده تری ایجاد کنند. این بدان معنی است که مدل‌ها با یکدیگر تعامل دارند تا رفتار PO را نشان دهند. باید در نظر داشت که تصمیمات اتخاذ شده توسط برخی

[۲۵] kinematics

مدل‌ها می تواند نتیجه گیری سایر مدل‌های مستقل را اصلاح یا بی اعتبار کند. در نتیجه، اگر مدل‌ها اطلاعات را به اشتراک نگذارند و تصمیمات هماهنگ نگیرند، ممکن است نتایج اشتباه یا متناقضی بوجود بیاید.

۲. نحوه تعامل DT با دنیای فیزیکی، به عنوان مثال، یک DT تصمیماتی می گیرد که به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر فرآیند فیزیکی تأثیر می گذارد. ممکن است محدودسازی تأثیر فیزیکی از قبل دشوار باشد. برای این منظور، اجزای دیجیتال باید تصمیمات را با استفاده از قوانین فیزیک PO منتشر کنند تا تأثیرات این تصمیمات و ناسازگاری‌هایی که ممکن است ایجاد شود را ارزیابی کنند.

در پروژه‌های بزرگ و ناهمگن، تعاملات و وابستگی‌ها در صورتی که به درستی مدل‌سازی نشده باشند، می‌توانند خطا ایجاد کنند. این بدان معناست که حتی زمانی که هر مدل به طور مستقل صحیح باشد، صحت آنها در کل سیستم ممکن است به رابطه آن با مدل‌های دیگر بستگی داشته باشد. به همین دلیل، ادغام مدل بخش پیچیده و مهمی از فرآیند ساخت DT است. در ادامه به انواع روش‌های یکپارچه‌سازی مدل پرداخته شده است.

- ادغام سلسله مراتبی: این رویکرد سیستم‌های پیچیده را با ادغام اجزای کوچکتر و ساده‌تر می سازد. به این ترتیب، مدل‌های واحد را می‌توان به صورت سلسله مراتبی سازماندهی کرد تا مدلی از کل فرآیند به دست آید و متوجه شد که چگونه قطعات مختلف با هم کار می‌کنند. مدل‌های مکمل نیز می‌توانند به صورت افقی ادغام شوند تا نمای وسیع‌تری از آن به دست آید به عنوان مثال، یک مدل کنترلی-نظری رفتار فیزیکی و یک مدل هندسی سه بعدی، می‌توانند ادغام شوند.
  در این مورد، در [۶۱] یک ادغام سلسله مراتبی پیشنهاد شده است که در آن سطح واحد کوچک‌ترین واحد فرآیند است، به عنوان مثال، یک تجهیز (مانند ماشین ابزار یا بازوی ربات)، مواد خام، اجزای دارای حسگرها یا حتی عوامل محیطی. در سطح سیستم، سطوح واحدهای متعدد به هم پیوسته هستند و با یکدیگر کار می‌کنند تا طیف وسیع‌تری از جریان داده و هماهنگی منابع را فراهم نمایند. به عنوان مثال، یک خط تولید، یک طبقه فروشگاه، یک کارخانه یا حتی یک محصول پیچیده (مانند یک هواپیما) نمونه هایی از DT های سطح سیستم هستند. مدل‌های مجازی یک DT در سطح سیستم از طریق ادغام و همکاری چندین مدل در سطح واحد شکل می‌گیرند.
  در یک سیستم از DT های سطح سیستم، اتصالات متقابل سیستم، قابلیت همکاری و بهینه‌سازی های مشترک بین DT های سطح سیستم وجود دارد. به عنوان مثال، یک سیستم DT در سطح سیستم ممکن است بر یکپارچه سازی شرکتی یا بین شرکتی برای ارائه تجارت، زنجیره تامین و همکاری تولید تمرکز کند [۶۲]. همچنین می تواند مراحل مختلف چرخه عمر محصول مانند طراحی، تولید یا نگهداری از راه دور را ادغام نماید. در [۶۳] همچنین روی ایده سیستمی از سیستم‌ها کار شده است که در آن چالش‌های یکپارچه‌سازی و همچنین استراتژی‌ها و معماری‌ها را برای پرداختن به یکپارچگی مورد بحث قرار می‌دهد. همچنین با استفاده از دیدگاه سیستمی از یک سیستم از DT ها شبکه های هوشمند برق و کاربردهای ساختمان هوشمند تجزیه و تحلیل شده است.
- ادغام مشارکتی: یک مدل اطلاعات مشارکتی نحوه تعامل اجزای مختلف را تعریف نموده و رفتار مشارکتی را در بین چندین دارایی شبیه سازی می‌کند [۶۴]. علاوه بر این، مدل‌های تصمیم‌گیری، مدل را قادر به ارزیابی،

استدلال و اعتبار می‌کنند. آنها از ورودی‌های متغیر، الگوریتم‌ها و مجموعه ای از محدودیت ها و قوانین تشکیل شده اند. آنها همچنین شامل قوانین محدودیت‌ها، انجمن‌ها و جدا شدن‌ها می‌شوند. آنها داده های وضعیت در حال اجرا را ذخیره و تجزیه و تحلیل می کنند و سپس با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین تصمیم می‌گیرند.

در [۶۵] الگویی به نام Digital Multiverse برای درک تفسیرهای DT در سطح یکپارچه سازی داده‌ها با ایجاد و اجرای قوانین سازگاری پیشنهاد شده است. برای این منظور، روابطی ایجاد شده که شامل داده‌ها، مدل‌ها و روش‌های مختلف مدیریت چرخه عمر سیستم می‌شود. به عنوان مثال، دیدگاه‌ها بر اساس نقش‌هایی مانند طراح کارخانه، مهندس کنترل، متخصص داده، مدیر تعمیر و نگهداری و غیره تعریف شده است. مدل‌ها و داده‌ها توسط روابط به یکدیگر متصل می‌شوند، به طوری که هیچ عملیاتی بر روی هر دیدگاهی در دیدگاه‌های مختلف DT نمی‌تواند منجر به ناسازگاری شود. آنها به طور رسمی نه تنها داده ها را به داده ها، بلکه داده ها را به مدل‌ها و مدل‌ها را به دیدگاه های مدل مرتبط می‌کنند. در [۶۶] یک پلتفرم مدل‌سازی مفهومی برای ادغام، همگام‌سازی و مدیریت مدل‌های مختلف، منابع داده و روابط آنها در DT پیشنهاد شده است. پلتفرم، جزئیات بخش‌های اصلی DTها را توضیح می‌دهد و بیان می‌کند که کدام بخش‌ها باید برای دستیابی به استفاده‌های مختلف DT فراهم شده، به هم متصل و یکپارچه شوند.

۱-۷-۳ ایجاد همزاد دیجیتال

گام بعدی در فرآیند ساخت DT، پیاده‌سازی آن است. در این بخش، پروتکل‌ها، ابزارها و استانداردهای توسعه و همگام سازی PO و VO آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۷-۳-۱ پروتکل‌های ارتباطی و همگام سازی داده‌ها

شبکه برای برقراری ارتباط با PO و VO آن حیاتی است. این اتصال امکان جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ و همچنین تبادل دستورات کنترلی را فراهم می‌کند. PO و VO آن داده ها را به صورت دو طرفه مبادله می کنند، به عنوان مثال، داده‌های جمع آوری شده از PO برای به روز رسانی حالت های حفظ شده در نمایش مجازی استفاده می‌شود. علاوه بر این، داده‌های نمایش مجازی به سیستم فیزیکی باز می گردد. در نتیجه، دیدگاه‌ها و تصمیمات تولید شده در نمایش مجازی، بازخوردی را برای سیستم فیزیکی فراهم می‌کند. به طور کلی، ارتباط PO -VO به سه مرحله نیاز دارد [۶۷]: (۱) جمع آوری اطلاعات مربوطه، از جمله اندازه گیری مستقیم واقعیت فیزیکی. (۲) داده ها به شکلی تفسیر شوند که با سطح در نظر گرفته شده سازگار باشد. این بخش ممکن است شامل چندین مرحله باشد، مانند پردازش داده‌ها، مرتب‌سازی داده ها و تبدیل داده‌ها. و (۳) از داده‌ها برای به روز رسانی حالت‌های سیستم استفاده می‌شود و این کار ممکن است به ترکیب اطلاعات نیاز داشته باشد، به عنوان مثال، استفاده از داده‌های منابع متعدد.

هر جزء از سیستم نیاز به نوع خاصی از اتصال دارد. به عنوان مثال، حسگرها و محرک‌ها دستگاه‌هایی با منابع محدود هستند که داده‌ها را در یک فرکانس خاص یا زمانی که رویدادهای جدید رخ می‌دهند ارسال می‌کنند. از این رو، پروتکل‌های کم مصرف مانند 6LoWPAN، بلوتوث، ZigBee یا LoraWAN بیشتر با آنها سازگار هستند. با این حال، برای تبادل داده، ممکن است نیاز به استفاده از پروتکل هایی مانند MQTT، CoAP یا AMQP باشد. داده‌های

حسگرهای متعدد توسط درگاهی جمع‌آوری می‌شود که اطلاعات را جمع آوری و به DT ارسال می‌کند. اتصالات بین حسگرها و درگاه‌ها می‌تواند با استفاده از چندین فناوری بسته به نوع سیستم فیزیکی انجام شود. بسیاری از راه‌حل‌های تجاری بر ارائه راه حل‌هایی برای برقراری ارتباط با دستگاه های اینترنت اشیا و فعال کردن تبادل و پردازش داده‌ها متمرکز شده‌اند، به عنوان مثال، خدمات وب آمازون (AWS)، Microsoft Azure IoT Suite، پلتفرم ابر SAP، Salesforce IoT، Oracle IoT، Cisco IoT Solutions، IBM BlueMix cloud. و Bosch IoT [۴۷].

مسائل مربوط به همگام سازی و سازگاری تعداد VO های ممکن متصل به یک PO را محدود می‌کند. با این حال، در مورد چندین VO، ارتباط بین هر دو جزء می‌تواند با استفاده از تکنیک Publish–Subscribe پیاده‌سازی شود، که در آن PO به عنوان ناشر اطلاعات در نظر گرفته می‌شود و VO ها برای دریافت اطلاعات مشترک می‌شوند. این الگوی ارتباطی همچنین برای برقراری ارتباط فقط رویدادهای مورد توجه، به جای به روز رسانی های دوره‌ای مفید است. پروتکل هایی مانند MQTT و پلتفرم هایی مانند آپاچی کافکا[۲۶] از این نوع ارتباط پشتیبانی می‌کنند.

اتصال داده در کاربردهای مهم DT باید در زمان واقعی باشد. در نتیجه، تأخیر یک عامل حیاتی برای تجربه کاربر و عملکرد سیستم است. به عنوان مثال، در جراحی رباتیک، عمل جراح باید در زمان واقعی و بدون تاخیر انجام شود. در غیر این صورت، نتیجه نادرست خواهد بود. برای کاهش تأخیر ارتباط، سه رویکرد اصلی وجود دارد [۶۸]. اولین مورد، استقرار پیوندهای شبکه با سرعت بالا با استفاده از کابل فیبر نوری برای اتصالات سیمی یا فناوری 5G برای اتصالات بی‌سیم است. هنگامی که دستگاه‌های بیشتری طیف محدود فرکانس رادیویی را به اشتراک می‌گذارند شبکه‌های 4G عملکرد خود را کاهش می دهند. با این حال، فناوری 5G محدوده فرکانس وسیع تری دارد تا دستگاه های بیشتری را که نیاز به ارتباط در فرکانس های بالاتر دارند، در خود جای دهد. گزینه دوم استفاده از فشرده‌سازی داده‌ها برای کاهش حجم داده‌های ارسالی است. این را می‌توان با تکنیک‌های فشرده‌سازی، فیلتر کردن داده‌ها و همچنین الگوریتم‌های هوش مصنوعی که داده‌ها را قبل از ارسال پردازش، تمیز و جمع می‌کند، پیاده سازی کرد. آخرین گزینه این است که محاسبات و پردازش داده‌ها به فرآیند فیزیکی نزدیک شود، به عنوان مثال، استفاده از قابلیت‌های محاسبات لبه یا مه برای پشتیبانی از الزامات پردازش DT. به این ترتیب، پردازش اطلاعات سریعتر از تجزیه و تحلیل کامل مبتنی بر ابر امکان پذیر است.

از جنبه‌های دیگری که باید در نظر گرفت این است که اتصال باید دو طرفه باشد و هر دو مؤلفه باید داده‌های ثابتی را حفظ کنند. از این رو، ابزاری برای به روز نگه داشتن هر دو مؤلفه و رابط‌های تبادل این نوع اتصال باید طراحی شود. برای این منظور، در [۶۹] الزامات ارتباطی را که یک DT باید برآورده کند، مانند پشتیبانی از قالب‌های مختلف، از جمله انواع مدل‌های منبع و اطلاعات و تعریف نیمه خودکار را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. همچنین رویکردی برای بهبود عدم همکاری فعلی بین DTهای شرکت‌های مختلف ارائه شده که این شرکت‌ها به تبادل اطلاعات نیاز دارند. برای انجام این کار، اطلاعات با استفاده از یک مدل نگاشت قابل تنظیم به فرمت های دیگر تبدیل می شود. مدل نگاشت سفارشی شده و در صورت تقاضا تفسیر می شود. این راه حل تبادل اطلاعات مبتنی بر فایل و API را به روشی دو جهته امکان‌پذیر می‌کند. در [۷۰] چارچوبی برای ادغام و بهبود تبادل داده بین PO و VO پیشنهاد شده است که بر روی لایه جمع‌آوری داده و سیستم راه دور تمرکز دارد که می‌تواند از چندین DT جزئی که به طور منطقی با

[۲۶] Apache Kafka

عملکردهای مختلف ساخته شده اند، تشکیل شده باشد. این روش همچنین یک همکاری بین منابع لبه و ابری برای بهبود همکاری اجزای مختلف و ترکیب داده‌ها ایجاد می‌کند. در [۷۱] روشی را برای فعال کردن تزویج در زمان واقعی بین DT و کنترل‌کننده‌ها در یک کارخانه فیزیکی پیشنهاد می‌کند. این مقاله یک زبان مدل‌سازی رسمی و یک الگوی طراحی را برای ایجاد یک رابط استاندارد برای ارتباط بین PLC ها و مدل‌های دیجیتال در معماری DT پیشنهاد می‌کند تا تبادل اطلاعات را تسهیل کند. مقاله [۷۲] شامل در نظر گرفتن QoS در ارتباط و مدل سازی سیستم است. این مقاله چارچوبی را پیشنهاد می‌کند که مدل‌سازی منابع معنایی[۲۷] را با انتقال شی صنعتی در زمان واقعی برای بهبود عملکرد DT ترکیب می‌کند. قابلیت همکاری، مقیاس پذیری و تاخیر زمانی به عنوان عوامل QoS در نظر گرفته شده است.

در نهایت، باید امنیت اتصال DT نیز در نظر گرفته شود. در این راستا، مقاله [۷۳] مشکلات امنیتی ارتباط بی سیم در یک DT را مورد بحث قرار داده و نحوه ایمن سازی کانال ارتباطی بین PO و VO را تجزیه و تحلیل می‌کند. این مقاله رویکردی را برای کاهش حملات تداخل در شبکه ارتباطی پیشنهاد کرده است که از رمزگذاری مبتنی بر ویژگی[۲۸] برای برآوردن نیازهای امنیتی و سربار استفاده کرده و از یک خط مشی کنترل دسترسی برای رمزگذاری یک کلید تصادفی و همچنین از یک طرح رمزگذاری متقارن برای پنهان کردن آن بهره می‌برد.

۱-۷-۳-۲ بسترها و ابزارهای آزمایشی

چارچوب‌های موجود می توانند روند توسعه DT را تسریع کنند. به همین دلیل، در این بخش، تلاش‌های موجود برای ارائه ابزارهایی برای پیاده‌سازی DTها و همچنین بستر آزمایشی پیشنهادی برای آزمایش رویکردهای DT مورد بررسی قرار گرفته است.

- پلتفرم های توسعه: برخی از مبتکران پلتفرم‌هایی را برای ساخت، آزمایش و محک زدن DT ها ایجاد کرده‌اند. به عنوان مثال، [۷۴] یک چارچوب منبع باز، مدولار و مستقل از سیستم را برای ساخت DT با استفاده از Flask Python ارائه می‌دهد. این پلتفرم از صفحات وب HTML به عنوان رابط بین شبیه سازی DT و کاربر استفاده می‌کند. این ابزار می‌تواند DT را با گزینه‌های دسترس‌پذیری متعدد به منظور تطبیق با طیف گسترده‌ای از کاربردهای مورد نظر توسعه دهد. همچنین می‌توان آن را با ابزارهای شبیه‌سازی دیگر ادغام نمود و با داده‌های مدل، مانند هندسه و تخصیص مواد و سایر موارد، پیکربندی کرد. در [۷۵] یک معماری مرجع برای DT ها در پلتفرم‌های IoT پیشنهاد می‌کند. این مقاله الزامات مدیریت سناریوهای DT صنعتی و موارد استفاده مختلف را که در پلت‌فرم DT پیاده‌سازی می‌شوند، تجزیه و تحلیل می‌کند. این معماری اجازه می دهد تا پیاده‌سازی با استفاده از فناوری‌های متنوع متناسب با موارد استفاده برنامه، الزامات فنی و ادغام با سیستم‌های موجود باشد. در [۷۶] یک چارچوب مدل‌سازی برای تولید خودسازگار ارائه شده است که از مدل‌سازی موارد با دامنه مشخص، تشریح قوانین برای تشابه موارد و استدلال مبتنی بر مورد، در یک DT مدولار پشتیبانی می‌کند. این روش پیکربندی خودکار DTها را بر اساس ابزارهای مدل‌سازی برای بهبود

[۲۷] semantic resource modeling

[۲۸] Attribute-Based Encryption

زمان‌های تولید، کاهش اتلاف و کمک به تولید پایدار بهتر پیشنهاد می‌کند. برای این منظور، چارچوب مدل‌سازی چندین زبان مدل‌سازی مرتبط با یکدیگر را فراهم می‌کند و آنها را در معماری مدل‌محور برای DT ها ادغام می‌کند. Eclipse Ditto یک چارچوب منبع باز برای پیاده سازی نرم افزار IoT DT است که قرینه دستگاه‌های فیزیکی را ایجاد کرده، خدماتی را در حول تجهیزات ارائه می‌کند و اجزای PO و VO را هماهنگ نگه می‌دارد. FIWARE یک میان افزار برای مدیریت داده ها در DT است که چارچوبی از اجزای منبع باز است که به عنوان توانمندسازهای عمومی[۲۹] (GEs) برای تسهیل توسعه و اجرای راه حل های هوشمند شناخته می شود. علاوه بر ابن موارد، راه‌حل های تجاری برای توسعه DT ها نیز وجود دارد، مانند پلتفرم‌های ANSYS Twin Builder، iTwin Bentley، Siemens، MapleSim، General Electric و Oracle Digital Twin.

- بسترهای آزمایشی: تحقیقات قبلی بسترهای آزمایشی را برای آزمایش رویکردهای جدید پیشنهاد کرده است. برای مثال، [۷۷] یک بستر آزمایشی منبع باز برای ساخت DT های سیستم صنعتی با استفاده از Eclipse Ditto پیشنهاد می‌کند که شامل جمع آوری داده‌ها در زمان واقعی، نمایش مجازی، تجزیه و تحلیل و تجسم است. در [۷۸] چارچوبی با نرم افزار مدولار برای ساخت همزاد دیجیتال *ربات* DOF3 ارائه کرده است که از CoDeSys برای پیاده‌سازی منطق PLC و رابط انسان و ماشین (HMI) برای کنترل سیستم استفاده می‌کند. ربات به عنوان یک گره شبکه با استفاده از یک اسکریپت قابل برنامه ریزی سازگار با چندین زبان برنامه نویسی مانند جاوا، سی، پایتون و متلب کنترل می شود. MATLAB و Simulink برای مدل‌سازی رفتار فیزیکی چند دامنه استفاده می‌شوند که ویژگی‌های سیگنال را تأیید و منطق دستگاه را شبیه‌سازی می‌کنند. آنها همچنین داده‌ها را برای کنترل حرکت مدل سینماتیکی ربات به PLC ارسال می‌کنند. Webbots امکان وارد کردن مدل‌های CAD را، چه به صورت اشکال هندسی خالص و چه به صورت قالب های حاوی اطلاعات اضافی، مانند رابطه سینماتیکی بین اجسام جامد با خواص مواد، فراهم می‌کند. راه‌اندازی ماژولار کار توسعه ایزوله را در سطوح مختلف کنترل، از منطق PLC گرفته تا ویژگی‌های سینماتیکی مدل دیجیتال امکان‌پذیر می‌سازد که منجر به تمرکز بر یک نقطه تغییر و کاهش محدودیت‌های به هم پیوسته می‌شود. این پیاده‌سازی را می‌توان در حوزه های دیگر استفاده کرد زیرا کتابخانه‌های مبتنی بر مدل در Simulink می‌توانند راه‌حل‌هایی را برای انواع دیگر مدل‌های رفتاری با استفاده از Simscapes Fluid، Driveline یا Multibody ارائه دهند.

در [۷۹] نیز چارچوبی را برای ایجاد و اجرای DTs پیشنهاد کرده است. این رویکرد به طور خودکار یک محیط مجازی از مشخصات ایجاد می کند که با PO های آنها مطابقت دارد. این همزادهای دیجیتال شامل دو حالت اصلی عملیات هستند. اول، یک حالت شبیه‌سازی که مستقل از محیط فیزیکی برای نظارت و کاوش یک کلون مجازی[۳۰] بدون خطر عمل می کند و دوم، یک حالت تکرار[۳۱] که شامل اجرای مجدد رویدادها از محیط فیزیکی برای تجسم و تجزیه و تحلیل می‌باشد. این چارچوب همچنین دارای ماژول‌های متعددی است که می توانند در صورت تقاضا فعال شوند، مانند نظارت، تجزیه و تحلیل امنیتی و تشخیص نفوذ. این چارچوب

[۲۹] General Enablers

[۳۰] Virtual Clone

[۳۱] Replication mode

با هدف بهبود ویژگی های امنیتی CPS پیشنهاد شده است. به همین دلیل، می‌توان قوانین امنیتی و ایمنی متنوعی را فعال کرد تا به طور خودکار توسط DT نظارت شود. علاوه بر این، آزمایش‌کنندگان امنیتی می‌توانند با استفاده از نسخه مجازی تنظیمات تولید، به امنیت سیستم حمله کنند.

۸-۱ جمع‌بندی

در این پروژه، ابتدا روند انقلاب‌های صنعتی و ویژگی‌های آنها بررسی شدند و در ادامه به گسترش مفهوم اینترنت به اشیاء که از اجزای اصلی انقلاب‌های چهارم و پنجم هستند، پرداخته شد. بررسی اسناد بالادستی مرتبط با این حوزه مورد بررسی گرفت. برای این منظور سند راهبردی شورای عالی تحقیقات و فناوری (عتف) با عنوان "سیاستها و اولویتهای پژوهش و فنّاوری کشور در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰" مورد مطالعه قرار گرفت و از میان مطالب مطروح شده در آن، اولویت‌های پژوهش در زمینه فناوری اطلاعات و ارتباطات و نیز انرژی مرتبط با موضوع این گزارش بودند که ارائه شدند.

سپس مطالعاتی پیرامون یک فناوری نوین با عناوین همزاد دیجیتال که موضوع اصلی این پروژه می‌باشد صورت گرفت. این فناوری نسل نوین شبیه‌سازی است که یک مدل دیجیتال از یک موجودیت فیزیکی یا مجازی را ارائه می‌دهد. در این خصوص، مطالعات ساختاری برای همزاد دیجیتال برای به دست آوردن یک نگاه کلی از آن انجام شد. پس از آن در خصوص تعاریف آن، مدل معماری مرجع همزاد دیجیتال در انقلاب صنعتی چهارم، و فناوری‌های تشکیل دهنده آن به همراه چالش‌ها پرداخته شد. این فناوری به عنوان پلی بین دنیای فیزیکی و مجازی بسیار مورد توجه قرار دارد. کاربردهای وسیع و متنوعی می‌توانند با بهره‌گیری از این فناوری، به عملکرد بهینه‌تر و رشد سریع‌تر دستیابی پیدا کنند. پیاده‌سازی همزاد دیجیتال، به دانش عمیق از فناوری‌های پایه و تشکیل‌دهنده آنها نیاز دارد و امروزه بسیاری از صنایع در این حوزه سرمایه‌گذاری کرده و در حال پژوهش و تحقیق هستند.

پیشرفت سریع فناوری‌های زیرشاخه همزاد دیجیتال مانند محاسبات ابری، شبکه ارتباطی 5G، IoT و هوش مصنوعی، ورود این فناوری به بخش‌های مختلف صنعتی را فراهم کرده است. همزاد دیجیتال با یک نگاه سیستماتیک، در مراحل مختلف چرخه حیات یک محصول کاربرد دارد. این فناوری با بررسی همه‌جانبه انواع پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد یک سیستم، به بهینه‌سازی کارایی آن می‌پردازد. با بررسی کاربردهای همزاد دیجیتال در صنایع مختلف بخصوص صنعت برق با تمرکز بر بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی و همچنین مدیریت دارایی‌های فیزیکی، تصویری از نحوه بکارگیری ابن فناوری در صنایع ارائه شد. بلوغ فناوری همزاد دیجیتال و تجاری‌سازی آن در صنایع گوناگون مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به بکارگیری همزاد دیجیتال در حوزه تولید برق توسط شرکت‌های بزرگ و کاربردهای آن در نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی و توسعه فناوری همزاد دیجیتال برای نیروگاه‌ها، این فناوری به عنوان یک سرویس مطرح شده است که در آینده نزدیک تمامی صنایع را در بر خواهد گرفت.

با بررسی جوانب اقتصادی استفاده از همزاد دیجیتال در بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی بر اساس پیش‌نیازها، هزینه و ارزیابی ریسک‌ها، علی‌رغم هزینه‌بر بودن دستیابی به این فناوری، باید به این نکته توجه کرد که عدم ورود به این حوزه دانشی در آینده می‌تواند تبعات سنگین و جبران‌ناپذیری را به دلیل تغییرات اساسی که همزاد دیجیتال در حوزه با تمرکز بر بخش نگهداری و تعمیرات واحدهای نیروگاهی و مدیریت دارایی ایجاد می‌کند، به همراه داشته باشد. ورود شرکت‌های مهم و بزرگ صنایع مختلف خود گواهی بر این موضوع است.

باید با بررسی وضعیت تولید برق و واحدهای نیروگاهی در کشور، مطالعات فنی و اقتصادی موجود در پژوهش‌ها و گزارش‌های انجام شده در پژوهشگاه نیرو (مرکز پایش وضعیت ناوگان نیروگاههای کشور)، بررسی معیارهای مختلف از جمله هزینه، زمان، منابع مورد نیاز و اهمیت تجهیز، تجهیزی جهت پیاده‌سازی همزاد دیجیتال انتخاب گردد. به همین منظور زیرساخت‌های کلی مورد نیاز برای پیاده‌سازی همزاد دیجیتال بررسی و استخراج شدند.

مراجع

[۱] H. Modaghegh, "Internet of Energy," 2022.

[۲] Z. Sarfraz, A. Sarfraz, H. M. Iftikar, and R. J. P. j. o. m. s. Akhund, "Is COVID-19 pushing us to the fifth industrial revolution (society 5.0)?," vol. 37, no. 2, p. 591, 2021.

[۳] W. Y. Leong, J. H. Chuah, and T. B. Tuan, *The Nine Pillars of Technologies for Industry 4.0*. Institution of Engineering and Technology, 2020.

[۴] S. Aheleroff, X. Xu, R. Y. Zhong, and Y. J. A. E. I. Lu, "Digital twin as a service (DTaaS) in industry 4.0: an architecture reference model," vol. 47, p. 101225, 2021.

[۵] M. Grieves and J. Vickers, "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems," in *Transdisciplinary perspectives on complex systems*: Springer, 2017, pp. 85-113.

[۶] P. Stavropoulos and D. Mourtzis, "Digital twins in industry 4.0," in *Design and Operation of Production Networks for Mass Personalization in the Era of Cloud Technology*: Elsevier, 2022, pp. 277-316.

[۷] E. Glaessgen and D. Stargel, "The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles," in *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*, 2012, p. 1818.

[۸] G. F. Jesus, "Digital Twin and Cyber-Physical Systems for Industrial Assets: Challenges and Recommendations," uis, 2021.

[۹] G. Wolf. (2020). *Digital Twins Are Changing The Grid*. Available: https://www.tdworld.com/smart-utility/article/21123396/digital-twins-are-changing-the-grid

[۱۰] (۲۰۲۰)*Digital Twin*. Available: https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin.

[۱۱] M. Zhou, J. Yan, D. J. C. J. o. P. Feng, and E. Systems, "Digital twin framework and its application to power grid online analysis," vol. 5, no. 3, pp. 391-398, 2019.

[۱۲] W. Danilczyk, Y. Sun, and H. He, "Angel: An intelligent digital twin framework for microgrid security," in *2019 North American power symposium (NAPS)*, 2019, pp. 1-6: IEEE.

[۱۳] J. Aasman. (2020). *California utilities should have used digital twin technology instead of power shutoffs*. Available: https://www.power-grid.com/td/california-utilities-should-have-used-digital-twin-technology-instead-of-power-shutoffs/

[۱۴] "Data and Trending Technologies: Role of Data in Digital Twin Technology," Available: https://tdan.com/data-and-trending-technologies-role-of-data-in-digital-twin-technology/23630

[۱۵] "A COMPLETE KNOWLEDGE GUIDE ON DIGITAL TWINS," Available: https://www.leewayhertz.com/digital-twin/

[١٦] G. Lanza, B. Haefner, and A. J. C. A. Kraemer, "Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching," vol. 64, no. 1, pp. 399-402, 2015.
[١٧] R. Wagner, B. Haefner, and G. J. P. C. Lanza, "Function-oriented quality control strategies for high precision products," vol. 75, pp. 57-62, 2018.
[١٨] T. H. Luan, R. Liu, L. Gao, R. Li, and H. Zhou, "The paradigm of digital twin communications," *arXiv preprint arXiv:2105.07182*, 2021.
[١٩] M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. J. J. o. M. S. Xu, "Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications," vol. 58, pp. 346-361, 2021.
[٢٠] H. Zhang, Q. Liu, X. Chen, D. Zhang, and J. J. I. A. Leng, "A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line," vol. 5, pp. 26901-26911, 2017.
[٢١] A. Schuster, *Robust intelligent systems*. Springer Science & Business Media, 2008.
[٢٢] D. Preuveneers, W. Joosen, and E. Ilie-Zudor, "Robust digital twin compositions for Industry 4.0 smart manufacturing systems," in *2018 IEEE 22nd International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW)*, 2018, pp. 69-78: IEEE.
[٢٣] J. Guo, N. Zhao, L. Sun, and S. Zhang, "Modular based flexible digital twin for factory design," *Journal of Ambient Intelligence*

Humanized Computing, vol. 10, no. 3, pp. 1189-1200, 2019.
[٢٤] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research," *IEEE access*, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020.
[٢٥] K. Wärmefjord, R. Söderberg, B. Schleich, and H. Wang, "Digital twin for variation management: A general framework and identification of industrial challenges related to the implementation," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 10, p. 3342, 2020.
[٢٦] R. P. Rolle, V. d. O. Martucci, and E. P. Godoy" ,Digitalization of manufacturing processes: proposal and experimental results," in *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4. 0&IoT)*, 2019, pp. 426-431: Ieee.
[٢٧] C. M. Ezhilarasu, Z. Skaf, and I. K. Jennions, "Understanding the role of a digital twin in integrated vehicle health management (IVHM)," in *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2019, pp. 1484-1491: IEEE.
[٢٨] P. Evangeline, "Digital twin technology for "smart manufacturing"," in *Advances in Computers*, vol. 117no. 1): Elsevier, 2020, pp. 35-49.
[٢٩] M. Segovia and J. J. S. Garcia-Alfaro, "Design, Modeling and Implementation of Digital Twins," vol. 22, no. 14, p. 5396, 2022.
[٣٠] R. Minerva, G. M. Lee, and N. J. P. o. t. I. Crespi, "Digital twin in the IoT context: a survey on technical features, scenarios, and architectural models," vol. 108, no. 10, pp. 1785-1824, 2020.
[٣١] J. Moyne *et al.*, "A requirements driven digital twin framework: Specification and opportunities," vol. 8, pp.٢٠٢٠ ,١٠٧٨٠١-١٠٧٧٨١ .
[٣٢] M. Eckhart, A. J. S. Ekelhart, and q. i. c.-p. s. engineering, "Digital twins for cyber-physical systems security: State of the art and outlook," pp. 383-412, 2019.
[٣٣] Y. Dong, R. Tan, P. Zhang, Q. Peng, and P. J. A. E. I. Shao, "Product redesign using functional backtrack with digital twin," vol. 49, p. 101361, 2021.
[٣٤] L. Li *et al.*, "Sustainability assessment of intelligent manufacturing supported by digital twin," vol. 8, pp. 174988-175008, 2020.

[۳۵] L. Kasper, F. Birkelbach, P. Schwarzmayr, G. Steindl, D. Ramsauer, and R. J. A. S. Hofmann, "Toward a Practical Digital Twin Platform Tailored to the Requirements of Industrial Energy Systems," vol. 12, no. 14, p. 6981, 2022.
[۳۶] N. Bazmohammadi *et al.*, "Microgrid Digital Twins: Concepts, Applications, and Future Trends," vol. 10, pp. 2284-2302, 2021.
[۳۷] G. Angjeliu, D. Coronelli, G. J. C. Cardani, and Structures, "Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality," vol. 238, p. 106282, 2020.
[۳۸] L. Zhang, L. Zhou, and B. K. J. J. o. M. S. Horn, "Building a right digital twin with model engineering," vol. 59, pp. 151-164, 2021.
[۳۹] D. T. Kutzke, J. B. Carter, and B. T. J. O. E. Hartman, "Subsystem selection for digital twin development: A case study on an unmanned underwater vehicle," vol. 223, p. 108629, 2021.
[۴۰] M. J. W. p. Grieves, "Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication ",vol. 1, no. 2014, pp. 1-7, 2014.
[۴۱] F. Tao and M. J. I. A. Zhang, "Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing," vol. 5, pp. 20418-20427, 2017.
[۴۲] S. Singh, M. Weeber, and K.-P. J. P. C. Birke, "Advancing digital twin implementation: A toolbox for modelling and simulation," vol. 99, pp. 567-572, 2021.
[۴۳] M. Bevilacqua *et al.*, "Digital twin reference model development to prevent operators' risk in process plants," vol. 12, no. 3, p. 1088, 2020.
[۴۴] J. Leng *et al*" ,.Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model," vol. 63, p. 101895, 2020.
[۴۵] Y. Fan *et al.*, "A digital-twin visualized architecture for Flexible Manufacturing System," vol. 60, pp. 176-20.۲۰۲۱ ,۱
[۴۶] K. M. Alam and A. J. I. a. El Saddik, "C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems," vol. 5, pp. 2050-2062, 2017.
[۴۷] A. Rasheed, O. San, and T. J. I. A. Kvamsdal, "Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective," vol. 8, pp. 21980-22012, 2020.
[۴۸] G. Chen, J. Zhu, Y. Zhao, Y. Hao, C. Yang, and Q. J. J. o. M. P. Shi, "Digital twin modeling for temperature field during friction stir welding," vol. 64, pp. 898-906, 2.۰۲۱
[۴۹] K. Ogata, *Modern control engineering*. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2010.
[۵۰] S. Abburu, A. J. Berre, M. Jacoby, D. Roman, L. Stojanovic, and N. Stojanovic, "COGNITWIN–Hybrid and cognitive digital twins for the process industry," in *202۰ IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 2020, pp. 1-8: IEEE.
[۵۱] T. Ritto, F. J. M. S. Rochinha, and S. Processing, "Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures," vol. 155, p. 107614, 2021.
[۵۲] M. Azangoo *et al.*, "Hybrid Digital Twin for process industry using Apros simulation environment," in *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2021, pp. 01-04 :IEEE.
[۵۳] S. Chakraborty, S. Adhikari, and R. J. A. M. M. Ganguli, "The role of surrogate models in the development of digital twins of dynamic systems," vol. 90, pp. 662-681, 2021.
[۵۴] S. Chakraborty, S. J. C. Adhikari, and Structures, "Machine learning based digital twin for dynamical systems with multiple time-scales," vol. 243, p. 106410, 2021.
[۵۵] S. Dai *et al.*, "Ontology-based information modeling method for digital twin creation of as-fabricated machining parts," vol. 72, p. 102173, 2021.

[۵۶] C .Pylianidis *et al.*, "Simulation-assisted machine learning for operational digital twins," vol. 148, p. 105274, 2022.
[۵۷] J. Leng, D. Wang, W. Shen, X. Li, Q. Liu, and X. J. J. o. m. s. Chen, "Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review," vol. 60, pp. 119-137, 2021.
[۵۸] J. Post, M. Groen, and G. Klaseboer, "Physical model based digital twins in manufacturing processes," in *Model based control for smart forming processes, proceedings of 10th forming technology forum. University of Twente*, 2017, pp. 87-92.
[۵۹] M. Ayani, M. Ganebäck, and A. H. J. P. C. Ng, "Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning," vol. 72, pp. 243-248, 2018.
[۶۰] A. Anbalagan, B. Shivakrishna, and K. S. J. M. t. p. Srikanth, "A digital twin study for immediate design/redesign of impellers and blades: Part 1: CAD modelling and tool path simulation," vol. 46, pp. 8209-8217, 2021.
[۶۱] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, and A. J. E. Nee, "Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison," vol. 5, no. 4, pp. 653-661, 2019.
[۶۲] T. Binsfeld and B. J. L. Gerlach, "Quantifying the Benefits of Digital Supply Chain Twins—A Simulation Study in Organic Food Supply Chains," vol. 6, no. 3, p.۲۰۲۲ ,۴۶ .
[۶۳] M. Borth, J. Verriet, and G. Muller, "Digital twin strategies for SoS 4 challenges and 4 architecture setups for digital twins of SoS," in *2019 14th annual conference system of systems engineering (SoSE)*, 2019, pp. 164-169: IEEE.
[۶۴] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, and M. J. C. i. I. Dassisti, "Digital twin paradigm: A systematic literature review," vol. 130, p. 103469, 2021.
[۶۵] C. Cimino, G. Ferretti, and A. J. C. i. I. Leva, "Harmonising and integrating the Digital Twins multiverse: A paradigm and a toolset proposal," vol. 132, p. 103501, 2021.
[۶۶] R. Eramo, F. Bordeleau, B. Combemale, M. van Den Brand, M. Wimmer, and A. J. I. S. Wortmann, "Conceptualizing digital twins," vol. 39, no. 2, pp. 39-46, 2021.
[۶۷] E. VanDerHorn and S .J. D. S. S. Mahadevan, "Digital Twin: Generalization, characterization and implementation," vol. 145, p. 113524, 2021.
[۶۸] M. J. P. C. S. Mashaly, "Connecting the twins: A review on Digital Twin technology & its networking requirements," vol. 184, pp. 2.۲۰۲۱ ,۳۰۵-۹۹
[۶۹] M. Platenius-Mohr, S. Malakuti, S. Grüner, J. Schmitt, and T. J. F. g. c. s. Goldschmidt, "File-and API-based interoperability of digital twins by model transformation: An IIoT case study using asset administration shell," vol. 113, pp.۲۰۲۰ ,۱۰۵-۹۴ .
[۷۰] Z. Jiang, Y. Guo, and Z. J. J. o. I. I. I. Wang, "Digital twin to improve the virtual-real integration of industrial IoT," vol. 22, p. 100196, 2021.
[۷۱] G. Barbieri and D. A. J. P. C. S. Gutierrez, "A GEMMA-GRAFCET methodology to enable digital twin based on real-time coupling," vol. 180, pp. 13-23, 2021.
[۷۲] J. Li, Y. Zhang, C. J. R. Qian, and C.-I. Manufacturing, "The enhanced resource modeling and real-time transmission technologies for Digital Twin based on QoS considerations," vol. 75, p. 102284, 2022.
[۷۳] H. Feng, D. Chen, H. J. I. o. T. Lv, and C.-P. Systems, "Sensible and secure IoT communication for digital twins, cyber twins, web twins," vol. 1, pp. 34-44, 2021.
[۷۴] M. S. Bonney, M. de Angelis, D. Wagg, and M. Dal Borgo" ,Digital Twin Operational Platform for Connectivity and Accessibility using Flask Python," in *2021 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C)*, 2021, pp. 237-241: IEEE.

[٧٥] A. Borghesi *et al*" ,.Iotwins: Design and implementation of a platform for the management of digital twins in industrial scenarios," in *2021 IEEE/ACM 21st International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid)*, 2021, pp. 625-633: IEEE.

[٧٦] T. Bolender, G .Bürvenich, M. Dalibor, B. Rumpe, and A. Wortmann, "Self-adaptive manufacturing with digital twins," in *2021 International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS)*, 2021, pp. 156-166: IEEE.

[٧٧] V. Kamath, J. Morgan ,and M. I. Ali, "Industrial IoT and Digital Twins for a Smart Factory: An open source toolkit for application design and benchmarking," in *2020 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, 2020, pp. 1-6: IEEE.

[٧٨] A. Albo, L. Svedlund, and P. Falkman, "Modular Virtual Preparation method of production systems using a Digital Twin architecture," in *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2021, pp. 1-8: IEEE.

[٧٩] M. Eckhart and A. Ekelhart, "Towards security-aware virtual environments for digital twins," in *Proceedings of the 4th ACM workshop on cyber-physical system security*, 2018, pp. 61-72.