

Technology Foresight

Smart Blades

IEEE Conf. 2020

Future Analysis

Photodetector technology

Scenario approach

Smart Wind Turbine Blades

Piezoelectric materials



Instrumentation
@nri.ac.ir



021
88093950



021
88079646



تهران، شهرک غرب، انتهای
بلوار شهید دامن، پژوهشگاه
نیرو، گروه پژوهشی ابزار دقیق



صاحب امتیاز: پژوهشگاه نیرو

مدیر مسئول: بابک امینی

سردبیر: ندا یآوری

مدیر اجرایی: ندا یآوری

گرافیکست و صفحه‌آرا: منصوره کریمی

ویراستار: ندا یآوری، مجتبی طباطبائیان

عکس روی جلد: منصوره کریمی

همکاران این شماره:

بابک امینی، ندا یآوری، پریسا فخری، مجتبی طباطبائیان،

منصوره کریمی، ملیحه رنجبران

اعضای هیئت داوران:

بابک امینی، ندا یآوری

همکاران معاونت پژوهشی:

نوشین فرودی

اهداف و رویکرد:

این برونداد تخصصی بخشی از فعالیت‌ها، تحقیقات و

یافته‌های علمی صورت گرفته در گروه پژوهشی ابزار

دقیق است که به صورت داخلی منتشر می‌گردد.

ناشر:

نشانی الکترونیکی: Instrumentation@nri.ac.ir

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان،

پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی ابزار دقیق.

تلفن:

۰۲۱-۸۸۰۷۹۶۴۶

دورنگار:

۰۲۱-۸۸۰۹۳۹۵۰

۱	سخن سردبیر
۲	مقاله پژوهشی
۲۳	همایش
۲۹	تازه‌های علمی
۳۲	مقاله علمی
۴۱	معرفی کتاب

سخن سردبیر

ششمین برونداد تخصصی گروه پژوهشی ابزار دقیق با معرفی مقاله پژوهشی با موضوع "تحلیل آینده پیش روی فناوری‌های آشکارسازهای نوری با رویکرد سناریونویسی" آغاز می‌شود. در این تحقیق به شناسایی آینده‌های محتمل فناوری‌های برگزیده آشکارسازهای نوری با استفاده از روش آینده‌پژوهی ترکیبی شامل پویش محیطی، دلفی، تحلیل اثر متقابل و سناریونویسی پرداخته شده است.

در ادامه یکی از کنفرانس‌های بین‌المللی حوزه اندازه‌گیری و ابزار دقیق معرفی شده و نیم‌نگاهی به تازه‌های اکتشافی فناوری چاپ فلزی برای ساخت قطعات الکترونیکی انعطاف‌پذیر داشته‌ایم. مقاله علمی با عنوان "آنالیز ارتعاش پره توربین بادی یکپارچه شده با یک لایه پیزوالکتریک" از دیگر موضوعات مطرح شده در این برونداد می‌باشد. در این مقاله از آنالیز اجزا محدود برای بررسی کنترل ارتعاش پره هوشمند توربین بادی، که در آن یک لایه پیزوالکتریک روی سطح پره قرار گرفته، استفاده شده است.

همچنین در این برونداد شما را با کتابی با عنوان ابزار دقیق الکترونیکی برای تولید پراکنده و فرایندهای قدرت آشنا خواهیم کرد. این کتاب پلی ارتباطی بین فرایندهای صنعتی نمایشی توسط منابع پراکنده و لوازم جانبی آنالوگ/دیجیتالی مورد استفاده در سیستم‌های برق مدرن است.

بدون شک بروندادهای تخصصی گروه‌های پژوهشی، یکی از ابزارهای دانشی جهت آگاهی‌سازی از فعالیت‌های تخصصی انجام شده در پژوهشگاه نیرو است و امید است مطالب ارائه شده در این برونداد گامی مؤثر در جهت نیل به این اهداف باشد.

تحلیل آینده پیش‌روی فناوری‌های آشکارسازهای نوری با رویکرد سناریونویسی

ندا یاوری، ملیحه رنجبران، بابک امینی

چکیده

آینده‌پژوهی فناوری، دانش و معرفت شکل بخشیدن به آینده به شیوه‌ای آگاهانه و عاملانه است و می‌کوشد تا اندیشه‌ای آینده‌نگارانه را برای درک فرصت‌ها و تهدیدهای محتمل در عرصه علم، فناوری و اقتصاد مبتنی بر دانش ایجاد کند. یکی از فناوری‌هایی که در علم فوتونیک و مواد مورد توجه بسیاری قرار گرفته، فناوری آشکارسازهای نوری است. در این مقاله به منظور شناسایی آینده‌های محتمل فناوری‌های برگزیده آشکارسازهای نوری، روش آینده‌پژوهی ترکیبی شامل پویش محیطی، دلفی، تحلیل اثر متقابل و سناریونویسی مورد استفاده قرار گرفته است. سناریوهای سازگار نهایی مبین فراگیر شدن آشکارسازهای نوری با پاسخ‌دهی فرکانسی بالا، زمان پاسخ نسبتاً سریع، جریان تاریکی پایین، توان نوری معادل نوفه کم و مساحت بزرگ است. این ویژگی‌ها با بکارگیری مواد دوبعدی، صفر بعدی و سپس یک بعدی در ساختار آشکارسازها محقق می‌شود. کلید واژه‌ها: آینده‌پژوهی فناوری، آشکارسازهای نوری، تحلیل اثر متقابل، سناریو ویزارد، تحلیل سناریویی.

۱. مقدمه

آینده‌پژوهی در علم و فناوری که از اصلی‌ترین عوامل ایجاد تغییرات پرشتاب در جوامع محسوب می‌شوند، در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود معطوف ساخته است. در آینده‌پژوهی فناوری‌ها، با استفاده از تجزیه و تحلیل منابع، الگوها و عوامل تغییر و یا ثبات، به تجسم آینده‌های بالقوه و برنامه‌ریزی برای آن‌ها پرداخته می‌شود. با شناسایی آینده‌های محتمل فناوری‌های برگزیده در جهان، می‌توان گام‌های بعدی برای نوشتن سند

نقشه راه، چشم انداز، اهداف کلان و همچنین راهبردهای مناسب برای رسیدن به اهداف را تعیین کرد [۱]. یکی از فناوری‌هایی که در علم فوتونیک و مواد تحقیقات بسیاری را به خود اختصاص داده، فناوری آشکارسازهای نوری است.

آشکارسازهای نوری مهمترین بخش ابزار دقیق فوتونیک در تبدیل سیگنال نوری به الکتریکی هستند. بخش حسگری آن‌ها شامل المان‌های فوتونیک برای دریافت و برهم‌کنش با نور، فیبر نوری به عنوان موجبر و در انتها یک آشکارساز نوری برای تبدیل سیگنال نوری به الکتریکی است [۲]. با توجه به کاربرد وسیع سامانه‌های فوتونیک در صنعت و نقش کلیدی آشکارسازهای نوری در تعیین مشخصه‌های خروجی این سامانه‌ها، شناسایی آینده‌های محتمل فناوری‌های برگزیده آشکارسازها برای رسیدن به کاربردهای مطلوب امری ضروری است. با توجه به اینکه پیش از شروع هر گونه تصمیم‌گیری پیرامون یک فناوری لازم است شناخت کاملی از حوزه آن فناوری، اجزاء و کاربردهای گوناگون آن حاصل شود، نیاز به روشی برای آینده‌پژوهی داریم که بتواند فناوری‌های دارای اهمیت را شناسایی و بر اساس آن آینده فناوری آشکارسازهای نوری را پیش‌بینی نماید.

تحقیقات نشان داده است که پیش‌بینی‌های علمی و قابل اطمینان زمانی حاصل می‌شود که از ترکیب روش‌های آینده‌پژوهی استفاده گردد [۳]. در این تحقیق، از ترکیب روش‌های آینده‌پژوهی از جمله پویش محیطی^۱، دلفی^۲، تحلیل اثر متقابل متوازن^۳ و سناریونویسی^۴ بهره گرفته شده است. این ترکیب پیش‌نیاز به کارگیری

^۱ Environmental scanning

^۲ Delphi

^۳ Cross Impact Balance method

^۴ Scenario planning

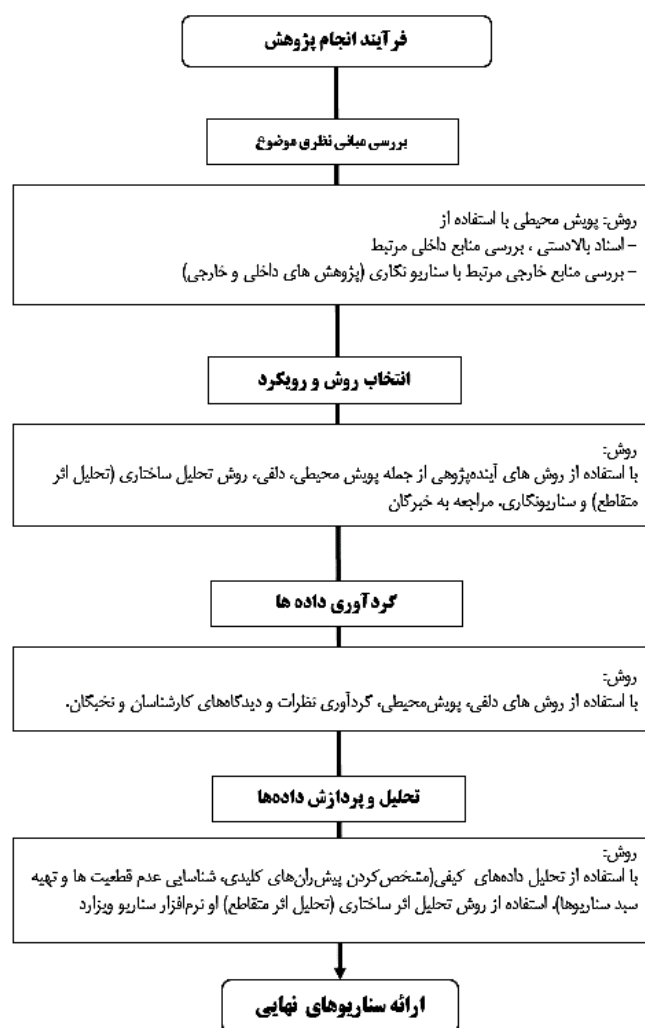
نرم افزار سناریو ویزارد ۵ است. این نرم افزار در تحلیل اثر متقابل متوازن (CIB) برای تحلیل سناریویی شبکه- های اثرگذاری به کار می رود. این نرم افزار اولین بار در سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳ در پروژه های کاربردی مراکز ارزیابی تکنولوژی به کار برده شد [۴ و ۵]. پس از آن در کاربردهای تحقیقاتی گوناگونی از جمله انرژی [۶ و ۷]، بیوتکنولوژی [۸]، مدیریت پسماند [۹ و ۱۰]، آموزش [۱۱]، سلامت [۱۲ و ۱۳]، فناوری اطلاعات [۱۴ و ۱۵]، هواشناسی [۱۶ و ۱۷]، مدیریت [۱۸]، سیاست [۱۹]، فناوری [۲۰] و ... مورد استفاده قرار گرفت.

در پی دستیابی به آینده های محتمل فناوری آشکارسازهای نوری، پس از پویش محیطی، لیستی از متخصصین صنعت، اساتید دانشگاه، و فارغ التحصیلان تهیه گردید. از میان اعضای لیست پیشنهادی، بر مبنای روش وزن دهی، کمیته راهبری انتخاب گردیدند. سپس عوامل کلیدی یا نیروهای پیشران و میزان تغییرات آنها، جهت خلق سناریوهای آشکارساز نوری شناسایی شدند. پس از مطالعات فراوان و چندین جلسه پرسش و پاسخ با اعضای کمیته راهبری، توصیفگرها و متغیرهای حالت مربوط به آنها به عنوان ورودی برنامه سناریو ویزارد انتخاب گردیدند. توصیفگرها به گونه ای انتخاب شدند که مواد جدید مورد استفاده و تمامی فناوری های موجود آشکارسازهای نوری، پوشش داده شوند. در گام بعد ماتریس برهم کنش المان های فناوری با در نظر گرفتن میزان سازگاری و عدم سازگاری المان های فناوری، امتیازدهی شد. در نهایت سناریوهای سازگار بدست آمده و به منظور شناسایی فناوری هایی از آشکارسازهای نوری که در آینده فراگیر خواهند شد، مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند.

^۵ Scenario Wizard

۲. روش تحقیق

شکل ۱ فرایند انجام این تحقیق را به صورت کامل نشان می‌دهد. روش و رویکرد مورد استفاده در این تحقیق شامل ترکیبی از روش‌های پویش محیطی، دلفی، تحلیل اثر متقابل متوازن و سناریوپردازی می‌باشد که در ادامه هر یک به تفصیل مورد بحث قرار خواهند گرفت.



شکل ۱- فرایند انجام تحقیق به صورت ترکیبی از روش‌های پویش محیطی، دلفی، تحلیل اثر متقابل متوازن و سناریوپردازی

۱-۲ پوشش محیطی

در فاز یک این تحقیق به منظور شناسایی، انتخاب و دسته‌بندی منابع اطلاعاتی جهت بسط تئوریک و تهیه اطلاعات مورد نیاز فازهای بعدی، پوشش محیطی انجام گرفته است. در این راستا، پیمایش کتابخانه‌ای انجام شده و مروری بر ادبیات نظری تحقیق، منابع اطلاعاتی مختلف، پژوهش‌های داخلی و خارجی صورت پذیرفته است.

۲-۲ انتخاب کمیته راهبری

در گام بعد به منظور گزینش افراد متخصص و نخبه در پنل دلفی، از یک طبقه‌بندی مدون مبتنی بر روش‌شناسی ارگان‌های نظارتی و اعتبارسنجی استفاده شد. در این طبقه‌بندی، چهار رده خبره، ارزشی، اقلیمی و امکان دسترسی در نظر گرفته شد. منظور از رده خبره، چارچوب ملاحظات طبیعی برای گزینش افراد در یک مجموعه با عناوین سیاست‌گذاران (نماد P^1)، مدیران (نماد M^7)، بازنشستگان (نماد S^8) و کارشناسان با تجربه (نماد E^9) می‌باشد. منظور از رده ارزشی، صلاحیت‌های فرد خبره در چارچوب معیار ارزیابی ECA^{10} است که شامل صلاحیت‌های تحصیلی، تخصصی و تجربی در حیطه آینده‌پژوهی آشکارسازهای نوری می‌باشد. در رده اقلیمی، نقش و جایگاه عضو پنل در زمینه اقلیم، جمعیت، منابع سرزمینی و صنعت بومی در نظر گرفته شده است. در رده امکان دسترسی نیز، با توجه به این که افراد پنل دارای مشغله‌های گوناگون در رده‌های مختلف حکومتی، دولتی، بخش خصوصی و نهادهای مستقل هستند، دسترسی به افراد از "الف تا د" طبقه‌بندی شده

⁶ Policy makers

⁷ Managers

⁸ Seniors

⁹ Experts

¹⁰ European Consortium for accreditation (ECA)



است. لیست اولیه اعضای پیشنهادی از متخصصین صنعت، اساتید دانشگاه، و فارغ التحصیلان در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- لیست اولیه اعضای پیشنهادی از متخصصین صنعت، اساتید دانشگاه، و فارغ التحصیلان

رده امکان دسترسی	شایستگی	رده اقلیمی	رده ارزشی	رده خبره	ردیف
الف	دانشگاه بهشتی	۱	HV	E	۱
الف	دانشگاه تهران	۱	HV	E	۲
ب	انرژی اتمی	۱	MV	E	۳
الف	دانشگاه تهران	۱	MV	E	۴
د	دانشگاه تهران	۱	HV	P	۵
الف	دانشگاه تهران	۱	V	M	۶
ب	دانشگاه امیرکبیر	۱	MV	E	۷
الف	دانشگاه بهشتی	۱	HV	E	۸
الف	دانشگاه تهران	۱	MV	E	۹
ب	دانشگاه بهشتی	۱	MV	E	۱۰
ب	دانشگاه تربیت مدرس	۱	MV	E	۱۱
ب	دانشگاه تهران	۱	HV	E	۱۲

جهت انتخاب فرد خبره به عنوان عضو کمیته راهبری، تابع وزنی W_i از رابطه

$$W_i = \frac{\alpha + \beta + \gamma}{3}, \quad (1)$$

محاسبه شده است که در این رابطه پارامتر α رده ارزشی، β رده اقلیمی و γ رده امکان دسترسی است و مقادیر این پارامترها بین صفر و یک قرار دارد ($0 < \alpha, \beta, \gamma \leq 1$). پس از محاسبه W_i برای هر یک از خبرگان که در لیست اولیه ارزیابی تیم پروژه قرار گرفته بودند، عضو خبره‌ای که دارای $W_i > 0.8$ بود، به عنوان عضو

کمیته راهبری انتخاب گردید. بدیهی است فردی که تابع وزنی (W_i) بالاتری دارد، شایستگی بیشتری برای حضور در کمیته راهبری و اعمال رأی در گام‌های بعدی پروژه دارد.

۲-۳ به‌کارگیری تحلیل آثار متقابل متوازن

پس از انتخاب کمیته راهبری، از روش تحلیل آثار متقابل متوازن (CIB) که روشی برای تحلیل شبکه‌های اثرگذاری است، بهره گرفته شد. این روش از بینش کیفی درباره روابط بین عوامل یک شبکه اثرگذاری استفاده می‌کند تا به تصویری سازگار درباره رفتار شبکه دست یابد. تحلیل سناریویی، یکی از کاربردهای معمول این روش است. بر مبنای روش CIB نیاز بود که عوامل کلیدی یا نیروهای پیشران و میزان تغییرات آن‌ها جهت خلق سناریوهای آشکارساز نوری شناسایی شوند [۲۱ و ۲۲]. با توجه به اینکه عوامل کلیدی تأثیر مستقیم و یا غیرمستقیم چشمگیری بر موضوع اصلی سناریو دارند، به منظور شناسایی و تایید آن‌ها از هر دو روش پویا محیطی و پنل خبرگان به صورت همزمان بهره گرفته شد.

۲-۳-۱ شناسایی توصیفگرها و متغیرهای حالت

شناسایی مجموعه عوامل کلیدی (توصیفگرها) که از نظر هدف تحلیلی، سیستم را توصیف می‌کنند، نقطه شروع تحلیل CIB است. به منظور شناسایی توصیفگرها به مشخصه‌هایی از آشکارساز نوری نیاز بود که بر مبنای آن‌ها بتوان عملکرد یک آشکارساز نوری را توصیف نموده و همچنین آشکارسازهای مختلف را با هم مقایسه کرد. پس از تعیین مشخصه‌ها و کاربردهای آشکارساز نوری که مبنای انتخاب توصیفگرها در فرایند آینده پژوهی هستند، می‌بایست مجموعه‌ای از مؤلفه‌های کیفی و کمی (متغیرهای حالت) که حالت‌های ممکن توصیفگرها را نشان می‌دهند، تعریف گردند. قابل ذکر است که تعداد این متغیرها متناسب با هر توصیفگر



تعیین می‌شود. پس از پوشش محیطی گسترده و چندین جلسه پرسش و پاسخ با کمیته راهبری، توصیفگرها و متغیرهای حالت مربوطه مطابق با جدول ۲ تعیین گردیدند.

جدول ۲- توصیفگرها و متغیرهای حالت

Descriptors	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7	Variant 8
A. Wavelength Range (nm)	A ₁ =UV	A ₂ =VIS	A ₃ =IR					
B. Responsivity (A/W)	B ₁ <1	B ₂ >1						
C. Response time	C ₁ =ps	C ₂ =ns	C ₃ =μs - s					
D. Dark current (nA)	D ₁ <1	D ₂ >1						
E. NEP (W/√Hz)	E ₁ <10 ⁻¹⁴	E ₂ >10 ⁻¹⁴						
F. Active area (mm ²)	F ₂ <1	F ₁ >1						
H. TRL	H ₁ <4	H ₂ >4						
I. Type	Photo Emission	PD (PN)	PD (PIN)	PD (Schottky)	PD (APD)	Photo transistor	Photo conductive	Thermal
L. Dimension of effective elements	0 D	1 D	2 D	3 D				

مطابق با جدول ۲، عوامل کلیدی یا توصیفگرهایی که مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: طیف پاسخ فرکانسی^{۱۱}، پاسخدهی فرکانسی^{۱۲}، زمان پاسخدهی^{۱۳}، جریان تاریکی^{۱۴}، توان نوری معادل نوفه^{۱۵}، سطح مقطع^{۱۶}، سطوح آمادگی فناوری (TRL)^{۱۷}، نوع آشکارساز نوری، بعد المان مؤثر^{۱۸}. برای توضیح این

¹¹ Wavelength

¹² Responsivity

¹³ Response time

¹⁴ Dark current

¹⁵ Noise equivalent power

¹⁶Active area

¹⁷Technology readiness levels (TRL)

¹⁸ Effective element dimension

توصیفگرها می‌توان گفت که طیف پاسخ فرکانسی، بازه طول‌موجی است که در آن آشکارساز پاسخ قابل ملاحظه‌ای دارد. پاسخ‌دهی فرکانسی معیاری از میزان تقویت ورودی در خروجی آشکارساز است. زمان پاسخ‌دهی به صورت زمان مورد نیاز برای رسیدن سیگنال خروجی از ۱۰٪ به ۹۰٪ مقدار نهایی خود در پاسخ به یک تابع پله ورودی نوری تعریف می‌شود. جریان تاریکی به میزان جریان خروجی آشکارساز بدون اعمال سیگنال نوری گفته می‌شود. توان نوری معادل نوفه معیاری از ضعیف‌ترین سیگنال اپتیکی است که قابل آشکارسازی است. سطح مقطع فعال در واقع سطح مقطع حساس به نور در یک آشکارساز نوری است [۲]. سطوح آمادگی فناوری تخمینی از بلوغ یک فناوری در طول دوره رشد آن است [۲۳].

توصیفگرهای نوع آشکارساز و بعد المان مؤثر جهت وارد کردن توصیفگر "ماده سازنده آشکارساز"، با توجه به تنوع بی‌شمار مواد مورد استفاده در آشکارسازها، در نظر گرفته شدند. بعد المان مؤثر به محدود شدن یک یا تعداد بیشتری از ابعاد یک جامد گفته می‌شود که در ساختار اصلی سازنده آشکارساز اضافه گردیده است. با کاهش بعد ماده، ویژگی‌های شیمی-فیزیکی آن به صورت قابل توجهی نسبت به حالت سه بعدی تغییر می‌کند و خواص جدید الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی، مغناطیسی و اپتیکی ظهور پیدا می‌کنند. بر حسب بعد می‌توان دسته‌بندی زیر را انجام داد: ساختارهای سه بعدی (3D) (که در آن‌ها هیچ کوانتیدگی برای حرکت ذره وجود ندارد و ذره کاملاً آزاد است)، ساختارهای دو بعدی (2D) (که حرکت ذره در یک راستا کوانتیده و در دو راستای دیگر آزادانه است. از جمله ساختارهای دو بعدی می‌توان چاه کوانتومی (QW^{19})، ساختارهای لایه‌ای مانند گرافن و ... را نام برد)، ساختارهای یک بعدی (1D) (که کوانتیدگی در دو راستا اتفاق می‌افتد و حرکت ذره تنها در یک راستا آزادانه است. سیم کوانتومی (QR^{20})، نانو سیم، نانولوله و.. از این دسته هستند)

¹⁹ Quantum well

²⁰ Quantum wire

و ساختارهای صفر بعدی (OD) (که در هر سه راستا کوانتیدگی وجود دارد. نقطه کوانتومی (QD^{۲۱}), نانو ذره و.. در این دسته قرار می‌گیرند) [۲۴].

از نظر توصیفگر نوع آشکارساز، آشکارسازهای نوری را در دو دسته حرارتی و فوتونیک می‌توان در نظر گرفت که آشکارسازهای حرارتی به سه نوع ترموکوپل^{۲۲}، پیروالکترویک^{۲۳} و بلمترها^{۲۴} دسته‌بندی می‌شوند. آشکارسازهای فوتونیک نیز به سه دسته آشکارسازهای فوتون‌گسیل^{۲۵}، آشکارسازهای فوتولتاییک^{۲۶} و آشکارسازهای فوتوالکترونیک^{۲۷} تقسیم می‌شوند. برای دسته سوم که آشکارسازهای نوری فوتوالکترونیک هستند، می‌توان تقسیم بندی دیود نوری^{۲۸} pn، دیود نوری^{۲۹} PIN، دیود نوری بهمنی^{۳۰} (APD)، آشکارساز فلز-نیمه هادی-فلز (MSM^{۳۱})، ترانزیستور نوری^{۳۲} و رسانای نوری^{۳۳} را در نظر گرفت. این دسته از آشکارسازها هم سیگنال به نوبه خوبی دارند و هم از سرعت پاسخ بالایی برخوردار هستند. بنابراین می‌توان گفت که پیشرفت‌هایی که در زمینه آشکارسازهای نوری صورت می‌گیرد، با این نوع از آشکارسازها گره خورده است [۲۵]. لازم به ذکر است که آشکارسازهای فوتون‌گسیل از حساسیت بسیار بالا و در عین حال هزینه بالایی

21 Quantum dot

22 Thermocouple

23 Pyroelectric

24 Bolometer

25 Photoemission

26 Photovoltaic

27 Photoelectric

28 pn photodiode

29 PIN photodiode

30 Avalanche photodiode (APD)

31 Metal-Intrinsic-Metal

32 Phototransistor

33 Photoconductive

برخوردار هستند. بنابراین در کاربردهای صنعتی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. آشکارسازهای فوتولتاییک نیز در سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند که هدف این تحقیق نیستند.

قابل ذکر است که اگر چه توصیفگرهای سیاستگذاری و توجیه‌پذیری اقتصادی به عنوان توصیفگر مستقل در جدول ورودی برنامه سناریو ویزارد در نظر گرفته نشده‌اند، اما هنگام امتیازدهی جدول برهم‌کنش المان‌های فناوری لحاظ شده‌اند. همچنین امتیازدهی این جدول با نگاه به آینده انجام شده است.

۲-۴ تشکیل ماتریس اثر متقابل

طی جلساتی که با حضور تیم راهبری و تیم کارشناسی تشکیل شد، روابط بین توصیفگرهای فناوری و متغیرهای مربوطه به صورت تحلیل اثر متقابل به پارامترهای کمی تبدیل شده و در خانه‌های ماتریس اثر متقابل قرار داده شد. در جهت تعیین سناریوهای سازگار، نیاز بود که تعیین شود کدام متغیرها، متغیرهای دیگر را تقویت و کدام متغیرها، در برابر متغیرهای دیگر مقاومت می‌کنند. میزان این تأثیرها در صورت سازگاری با استفاده از اعداد بین ۰ تا ۲ (بی‌اثر، ضعیف و قوی) و در صورت عدم سازگاری با استفاده از اعداد ۰ تا -۲ (بی‌اثر تا قوی) امتیازدهی شد که در جدول ۳ آورده شده است.

روابط بین توصیف‌کنندگان در قالب یک شبکه تحلیل می‌شود و برای پیش‌بینی سناریوهای نهایی استفاده می‌گردد. ممکن است روابط اثرگذاری به صورت یکطرفه یا دوطرفه باشد. در این تحقیق، تحلیل اثر متقابل با استفاده از نرم‌افزار سناریو ویزارد انجام شده است. این نرم‌افزار کمک می‌کند تا از محاسبات دستی طولانی اجتناب شود.

جدول ۳- ماتریس اثر متقابل

	A (W.L)	B (RES)	C (RES.T)	D (Dark.C)	E (NEP)	F (Area)	H (TRL)	I (TYPE)	L (DIM.)
A(W.L)									
A1		1 1	2 2 1	2 1	2 1	1 1	1 2	1 2 2 2 2 2 2 0	2 2 2 2
A2		1 2	2 2 0	2 1	2 1	1 1	-1 1	1 2 2 2 2 2 2 1	2 2 2 2
A3		1 2	2 2 1	2 1	2 1	1 1	1 2	0 2 2 2 2 2 2 2	1 2 2 2
B(RES)									
B1<1	1 1 1		1 2 1	1-1	1-1	1 0	0 1	-2 1 2 2 -1 0 2 1	-1 1 1 0
B2>1	1 2 2		1 2 1	2 1	2 0	2 1	1 2	1 2 2 2 1 1 2 1	2 1 2 1
C(RES.T)									
C1	2 2 2	1 1		2 2	2 2	2 2	2 2	1 1 2 1 2 2 2 -1	1 2 2 2
C2	2 2 2	2 2		2 2	2 2	2 2	1 2	0 2 2 2 2 2 1 0	2 2 2 2
C3	1 0 1	1 1		2 1	2 1	2 2	0 1	-2 1 1 1 2 0 0 2	2 2 2 2
D(Dark.C)									
D1	2 2 2	1 2	2 2 2		2 2	2 1	2 1	2 2 2 2 2 2 0 0	1 1 1 1
D2	1 1 1	-1 1	2 2 1		2 1	2 1	2 2	-1 1 1 1 1 0 2 0	1 1 1 1
E(NEP)									
E1	2 2 2	1 2	2 2 2	2 2		1 1	2 1	1 2 2 2 2 2 2 1	1 1 1 1
E2	1 1 1	-1 0	2 2 1	2 1		1 1	0 1	0 1 1 1 1 0 1 1	1 1 1 1
F(Area)									
F1	1 1 1	1 2	2 2 2	2 2	1 1		1 1	1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1
F2	1 1 1	0 1	2 2 2	1 1	1 1		1 1	1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1
H(TRL)									
H1	1-1 1	0 1	2 1 0	2 2	2 0	1 1		0 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1
H2	2 1 2	1 2	2 2 1	1 2	1 1	1 1		1 2 2 2 2 2 2 2	1 1 1 1
I(TYPE)									
I1	1 1 0	-2 1	1 0 -2	2-1	1 0	1 1	0 1		-2 -2 1 1
I2	2 2 2	1 2	1 2 1	2 1	2 1	1 1	1 2		1 1 1 1
I3	2 2 2	1 2	2 2 1	2 1	2 1	1 1	1 2		1 1 1 1
I4	2 2 2	1 2	1 2 1	2 1	2 1	1 1	1 2		1 1 1 1
I5	2 2 2	-1 1	2 2 2	2 1	2 1	1 1	1 2		1 1 1 1
I6	2 2 2	1 1	2 2 0	2 0	2 0	1 1	1 2		1 1 1 1
I7	2 2 2	2 2	2 1 0	0 2	2 1	1 1	1 2		1 1 1 1
I8	0 1 2	1 1	-1 0 2	0 0	1 1	1 1	1 2		1 1 1 1
L(Dim)									
L1	2 2 1	-1 2	1 2 2	1 1	1 1	1 1	1 1	-2 1 1 1 1 1 1 1	
L2	2 2 2	1 1	2 2 2	1 1	1 1	1 1	1 1	-2 1 1 1 1 1 1 1	
L3	2 2 2	1 2	2 2 2	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1 1 1 1 1 1 1	
L4	2 2 2	0 1	2 2 2	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1 1 1 1 1 1 1	

۲-۵ استخراج سناریوهای سازگار

در مرحله بعدی لازم است تا سازگاری میان سناریوها شناسایی شود. شبکه‌ی روابط اثرگذاری در ماتریس آثار متقابل، فضایی از سناریوهای معقول برای حالت سیستم را پیش‌بینی می‌کنند. هر سناریوی انتخابی شامل تناقض‌هایی در رابطه با قواعد شبکه خواهد بود. بنابراین می‌توان با محاسبه توازن آثار یک سناریو، تناقض‌ها را آشکار ساخت. سازگاری درونی یک سناریو نیازمند انتخاب متغیرهای توصیفگر به روشی است که تضمین می‌کند که هیچ متغیر دیگری از یک توصیفگر یکسان از جانب آثار ترکیبی دیگر توصیفگرها به این متغیر توصیفگر قویاً ترجیح داده نمی‌شود (اصل سازگاری). در این تحقیق پس از اجرای برنامه سناریو ویزارد، در

نهایت ۳۶ سناریو سازگار به صورت جدول ۴ بدست آمد که در نشست نهایی با کمیته راهبری مورد تایید قرار گرفتند.

جدول ۴- سناریوهای سازگار نهایی. از سمت چپ به ترتیب شماره سناریو، شماره توصیفگرهای A تا L (به طور مثال A3,B2,C2,...) و امتیاز هر سناریو

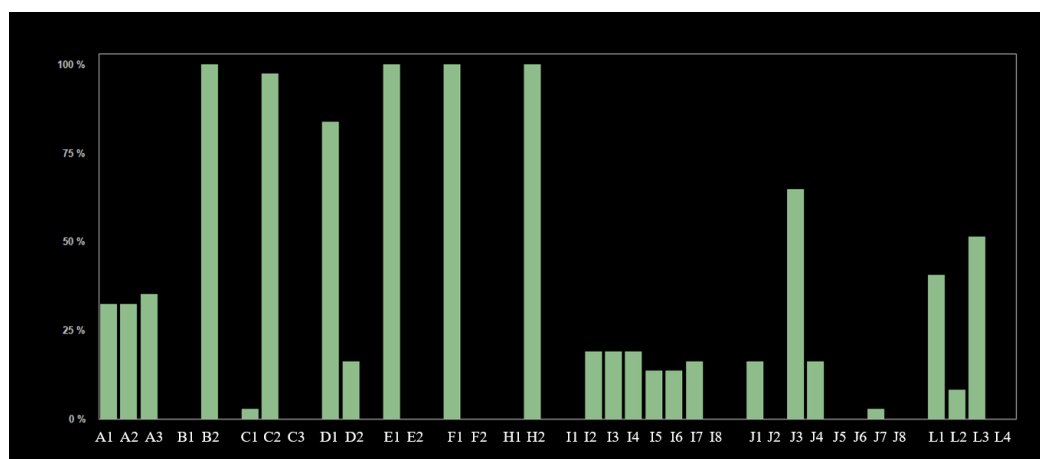
No./Code/Consistency value/Total impact score/Title

No.	Code	A	B	C	D	E	F	H	I	L	Consistency value	Total impact score	Title
0001		3	2	2	1	1	1	2	2	1	0000	00150	
0002		3	2	2	1	1	1	2	3	1	0000	00150	
0003		3	2	2	1	1	1	2	4	1	0000	00150	
0004		1	2	2	1	1	1	2	2	1	0000	00152	
0005		2	2	2	1	1	1	2	2	1	0000	00152	
0006		1	2	2	1	1	1	2	3	1	0000	00152	
0007		2	2	2	1	1	1	2	3	1	0000	00152	
0008		1	2	2	1	1	1	2	4	1	0000	00152	
0009		2	2	2	1	1	1	2	4	1	0000	00152	
0010		1	2	2	1	1	1	2	5	1	0000	00152	
0011		2	2	2	1	1	1	2	5	1	0000	00152	
0012		1	2	2	1	1	1	2	6	1	0000	00152	
0013		2	2	2	1	1	1	2	6	1	0000	00152	
0014		1	2	2	2	1	1	2	7	1	0000	00146	
0015		2	2	2	2	1	1	2	7	1	0000	00146	
0016		3	2	2	1	1	1	2	2	2	0000	00150	
0017		3	2	2	1	1	1	2	3	2	0000	00150	
0018		3	2	2	1	1	1	2	4	2	0000	00150	
0019		1	2	2	1	1	1	2	2	3	0000	00152	
0020		2	2	2	1	1	1	2	2	3	0000	00152	
0021		1	2	2	1	1	1	2	3	3	0000	00152	
0022		2	2	2	1	1	1	2	3	3	0000	00152	
0023		1	2	2	1	1	1	2	4	3	0000	00152	
0024		2	2	2	1	1	1	2	4	3	0000	00152	
0025		1	2	2	1	1	1	2	5	3	0000	00152	
0026		2	2	2	1	1	1	2	5	3	0000	00152	
0027		1	2	2	1	1	1	2	6	3	0000	00152	
0028		2	2	2	1	1	1	2	6	3	0000	00152	
0029		1	2	2	2	1	1	2	7	3	0000	00146	
0030		2	2	2	2	1	1	2	7	3	0000	00146	
0031		3	2	2	1	1	1	2	2	3	0000	00152	
0032		3	2	2	1	1	1	2	3	3	0000	00152	
0033		3	2	2	1	1	1	2	4	3	0000	00152	
0034		3	2	2	1	1	1	2	5	3	0000	00152	
0035		3	2	2	1	1	1	2	6	3	0000	00152	
0036		3	2	2	2	1	1	2	7	3	0000	00146	

۴- نتایج و بحث

با شناسایی سناریوهای سازگار می توان به آینده پژوهی بر اساس محتمل ترین سناریوها اقدام نمود. گزارش تحلیلی برنامه سناریو ویزارد از درصد تکرار توصیفگرها و متغیرهای حالت در سناریوهای سازگار نهایی در

شکل ۲ آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، بیشترین سهم به توصیفگرهای پاسخدهی فرکانسی (B)، زمان پاسخدهی (C)، توان نوری معادل نوفه (E)، سطح مقطع (F) و سطح آمادگی فناوری (H) و در نهایت جریان تاریکی (D) اختصاص دارد. در واقع می توان این گونه نتیجه گیری کرد که تحقیقاتی که بر روی آشکارسازهای نوری صورت می گیرد، در راستای فراگیر شدن آشکارسازهای نوری در آینده است که پاسخدهی فرکانسی بالا ($B2 > 1$)، زمان پاسخ نسبتاً سریع ($C2 = ns$)، جریان تاریکی پایین ($D1 < 1$)، توان نوری معادل نوفه کم ($E1 < 10^{-14}$) و مساحت بزرگی ($F1 > 1$) داشته باشند.



شکل ۲- گزارش تحلیلی برنامه سناریو ویزارد از درصد تکرار توصیفگرها و متغیرهای حالت در سناریوهای سازگار نهایی

همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، در میان بازه های فرکانسی A1 تا A3، بازه A3 درصد بیشتری را به خود اختصاص داده است، اگرچه این تفاوت اندک است. پیش تر بیان شد که پیش بینی می شود که در آینده به دلیل پیشرفت های که در عرصه ارتباطات فیبر نوری رخ می دهد، بازه طول موجی فرورسرخ (A3) پیش رو باشد [۲۶]. اما در کاربردهای مختلف، انتخاب بازه طول موجی کاملاً به کاربرد مورد نظر بستگی دارد. با توجه به این که در کاربردهای بررسی شده در این پروژه، بازه طول موجی مرئی و فرابنفش نیز بسیار پرکاربرد بودند، اولویت گذاری خاصی میان این بازه های طول موجی نمی توان در نظر گرفت.

در میان دو متغیر حالت مربوط به توصیفگر پاسخ فرکانسی، بازه B2 به صورت صد در صد پیشتاز شده است. گزارش‌های آینده پژوهی نشان می‌دهند که APD بیشترین سود فروش را در بازار آشکارسازهای نوری به خود اختصاص داده است [۲۶]. این امر، نیاز بازار به آشکارسازهایی با پاسخ‌دهی فرکانسی بالا را به خوبی نشان می‌دهد. اما بر طبق همین گزارش‌ها، بیشترین حجم فروش به دیودهای نوری PIN و pn تعلق دارد. زیرا اگرچه پاسخ‌دهی فرکانسی کمتری نسبت به APD دارند، اما از هزینه پایین‌تری برخوردار هستند. نکته‌ای که قابل توجه است جهت‌گیری پژوهش‌های اخیر به سمت استفاده از مواد جدید و بکارگیری المان‌های مؤثر صفر، یک و دو بعدی است که تأثیر بسزایی در افزایش پاسخ‌دهی آشکارسازهای نوری دارد [۲۷-۲۹]. بنابراین در صورت فراگیر شدن این فناوری‌ها، شاهد حضور آشکارسازهای نوری‌ای خواهیم بود که در عین دارا بودن پاسخ‌دهی فرکانسی بالا، از هزینه مناسبی نیز برخوردار هستند.

از نظر توصیفگر زمان پاسخ‌دهی، متغیر حالت C2 پیشتاز بوده است که سرعت پاسخ ns را نشان می‌دهد. متغیر C1 که بیانگر سرعت پاسخ ps می‌باشد، که با توجه به پیچیده‌تر بودن فناوری آن در کاربردهای خاص بکار گرفته می‌شود و لذا از نظر کاربرد عمومیت ندارد. در کاربردهایی که در این گزارش مورد بررسی قرار گرفته‌اند نیز چنین سرعت پاسخی مورد نیاز نمی‌باشد. این در حالی است که امروزه سرعت پاسخ در مقیاس نانو ثانیه که بسیاری از آشکارسازهای فوتونیک‌ها به آن دست یافته‌اند، نسبت به متغیر C3 سریع‌تر و لذا پرکاربردتر است.

در بین دو متغیر حالت جریان خاموشی، D1 که جریان تاریکی کمتر از ۱ nA را نشان می‌دهد، سهم بیشتری را از آن خود کرده است. همان‌گونه که گفته شد، جریان تاریکی، جریانی ناخواسته است که به صورت نوفه به سیستم اضافه می‌شود. با توجه به این که این جریان تابع مواد سازنده آشکارساز نوری و همچنین دما

می‌باشد، در ساخت آشکارسازهای نوری، مواد جدید و روش‌هایی در نظر گرفته می‌شود که این جریان ناخواسته را کاهش دهند. به طور مثال در صورت بکارگیری المان‌های مؤثر صفر و یک بعدی، به دلیل کاهش پراکندگی فوتونی، کاهش قابل توجه جریان تاریکی در انتظار خواهد بود [۳۰].

از دید توصیفگر توان نوری معادل نوفه، متغیر $E1$ سهم صد در صدی دارد. از آنجاییکه این توصیفگر متناسب با عکس توانایی آشکارسازی است، هر چه بیشتر باشد میزان سطح نوفه آشکارساز بیشتر است. بنابراین واضح است که انتظار می‌رود در آینده شاهد حضور آشکارسازهایی با توان معادل نوفه کمتر از $10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ باشیم. نکته قابل توجه این است که در بین دو متغیر مربوط به توصیفگر سطح مقطع نیز متغیر $F1 > 1 \text{ mm}^2$ سهم صد در صدی را دارد. توانایی آشکارسازی با سطح مقطع فعال آشکارساز نسبت مستقیم دارد. به عبارت بهتر هر چه سطح مقطع فعال بزرگ‌تر و توان معادل نوفه آن کمتر باشد، با آشکارساز بهتری روبرو هستیم. با توجه به این که با افزایش سطح مقطع، جریان تاریکی و همچنین زمان پاسخ‌دهی نیز افزایش می‌یابد، برای انتخاب حالت بهینه، میان این توصیفگرها رقابت وجود دارد [۲]. قابل ذکر است که از نظر توصیفگر زمان پاسخ‌دهی، آشکارسازهای بسیار سریع (ps) که سطح مقطع فعال کوچک‌تری دارند، انتخاب نشده‌اند. بنابراین انتظار می‌رود در آینده شاهد حضور آشکارسازهایی با سطح مقطع نسبتاً بزرگ باشیم.

از دید توصیفگر سطوح آمادگی فناوری، با توجه به شیوه امتیازدهی ماتریس برهم‌کنش المان‌های فناوری، متغیر $H2 > 4$ انتخاب شده است. در امتیازدهی جدول ۳، اگر فناوری در حال حاضر وجود دارد و پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیز وجود داشته باشد، امتیاز بالاتر به $H2$ داده شده است. با توجه به گسترش تحقیقات و مطالعات فناورانه بر روی آشکارسازهای نوری در حال حاضر و پیشرفت این فناوری‌ها در آینده، متغیر $H2$ سهم صد در صدی را به خود اختصاص داده است.

از نظر توصیفگر نوع آشکارسازهای نوری، آشکارسازهای دیود نوری pn، PIN و MSM (I2 تا I4) دارای بیشترین سهم و سپس رسانای نوری (I7) و در نهایت دیود نوری بهمنی (I5) و ترانزیستور نوری (I6) از سهم بالایی در انتخاب سناریوهای نهایی برخوردار هستند. بر طبق مستندات موجود، دیودهای نوری PIN و pn به دلیل پهنای باند وسیع، حساسیت بالا و نوفه کم، پر فروش ترین نوع هستند. همچنین APDها پرسودترین نوع دیودهای نوری هستند [۲۶]. ترانزیستورهای نوری نیز مانند APDها از پاسخ‌دهی بالایی برخوردار هستند و لذا می‌توان آن‌ها را هم‌ردیف APDها در نظر گرفت و در رده آخر، رساناهای نوری قرار دارند. این رساناها اگرچه حساسیت کمتری نسبت به دیودهای نوری دارند، اما از ساختار ساده‌تری برخوردار هستند و بعضی از انواع آن از جمله HgCdTe در طول موج‌های فروسرخ مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۲۷].

در مورد عدم انتخاب آشکارسازهای PMT می‌توان گفت که این آشکارسازها در اندازه‌گیری‌هایی که شدت نور دریافتی بسیار ضعیف است، مورد استفاده قرار می‌گیرند و از هزینه بالایی برخوردار هستند. بنابراین کاربرد آن‌ها عمومیت ندارد. آشکارسازهای حرارتی نیز، دارای حساسیت متوسط و سرعت پاسخ پایینی نسبت به آشکارسازهای فوتونی هستند. بنابراین کمتر در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند و لذا تحقیقات کمتری بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد. با توجه به این که در سناریوهای نهایی پاسخ‌دهی فرکانسی بالا و سرعت پاسخ نسبتاً زیاد، بالاترین سهم را دارند، آشکارسازهای حرارتی انتخاب نشده‌اند [۲].

از نقطه نظر بعد المان مؤثر نیز بیشترین سهم به المان‌های دوبعدی، صفر بعدی و سپس یک بعدی اختصاص یافته است. مستندات علمی نشان می‌دهند که گاف نواری صفر و تحرک‌پذیری بسیار زیاد حامل‌ها در مواد دو بعدی موجب کاربرد آن‌ها در ترانزیستورهای نوری، سلول‌های فوتوولتاییک و ... شده است. این مواد، ضخامت بسیار کم و انعطاف‌پذیری بسیار بالایی دارند. با فناوری‌های میکروساخت سازگارند و نوار انرژی

قابل تنظیم و از همه مهم‌تر، قابلیت دستیابی به پاسخ‌دهی فرکانسی بالا را دارند. این ویژگی‌ها باعث بکارگیری مواد دو بعدی در آشکارسازهای نوری و گسترش آن شده است [۳۰ و ۳۱]. آشکارسازهای صفر و یک بعدی نیز دارای پاسخ‌دهی فرکانسی بالا، جریان تاریکی کم، دمای کاری بالا و قابلیت کنترل طیف پاسخ فرکانسی هستند که نیاز به گسترش استفاده از آن‌ها را در ساخت آشکارسازهای نوری در آینده مشخص می‌سازد [۲۷ و ۲۸].

در انتها می‌توان گفت که هدف از انجام این پروژه، ایجاد یک رویه و ساختار آینده‌نگری در مطالعه مورد نظر بوده است. اکثر آینده‌پژوهی‌های انجام شده در سطح جهانی مانند آنچه سازمان‌هایی نظیر BP^{۳۴} و Shell^{۳۵} یا حتی پروژه‌های وسیعی که در اتحادیه اروپا انجام می‌شود، به صورت دوره‌ای و حداکثر سالانه منتشر می‌گردد. از این رو نسخه اول این پروژه به عنوان بذری کاشته شده است و در صورت از بهره‌برداری عملیاتی، نیاز به بازنگری در بازه‌های زمانی منظم دارد. لذا بدیهی است گزارش‌های دوره‌ای بعدی که همین ساختار پی‌ریزی شده را دنبال می‌کنند، عمق دانش جدیدی را ایجاد و منتشر می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت فناوری‌های نوین و سرعت فزاینده رشد آن‌ها، انجام آینده‌پژوهی جهت شناخت، تاثیرگذاری و شکل‌دهی آینده امری ضروری است. برای انجام آینده‌پژوهی فناوری‌ها روش‌های گوناگونی وجود دارد. پویش محیطی، دلفی، تحلیل اثر متقابل و سناریونویسی از جمله این روش‌ها هستند که در این تحقیق از ترکیب

³⁴ British multinational oil and gas company

³⁵ Royal Dutch Shell, Oil industry company

آن‌ها استفاده شده است. این روش ترکیبی برای شناسایی آینده‌های محتمل آشکارسازهای نوری به عنوان یکی از مهمترین فناوری‌های ابزار دقیق فوتونیک، مورد استفاده قرار گرفته است.

بدین منظور پس از پیمایش کتابخانه‌ای، مرور ادبیات و پژوهش‌های داخلی و خارجی در مرحله پویش محیطی، افراد متخصص و نخبه در پند دلفی به عنوان اعضای کمیته راهبری انتخاب شدند. این کمیته بر مبنای روش CIB به شناسایی توصیفگرها و میزان تغییرات آن‌ها جهت خلق سناریوهای آشکارساز نوری پرداختند. سپس طی جلساتی منظم، روابط بین توصیفگرها و متغیرهای مربوطه به صورت تحلیل اثر متقابل به پارامترهای کمی تبدیل شده و در خانه‌های ماتریس اثر متقابل قرار داده شد. در نهایت با وارد کردن این داده‌ها در نرم‌افزار سناریو ویزارد، سناریوهای سازگار به عنوان محتمل‌ترین سناریوها انتخاب شدند.

سناریوهای سازگار مبین فراگیر شدن آشکارسازهای نوری با پاسخ‌دهی فرکانسی بالا، زمان پاسخ نسبتاً سریع، جریان تاریکی پایین، توان نوری معادل نوفه کم و مساحت بزرگ هستند. چنین مشخصه‌هایی با بکارگیری فناوری‌های میکروساخت (المان‌های صفر، یک و دوبعدی) فراهم می‌گردد. بکارگیری این آشکارسازها موجب افزایش دقت و سرعت اندازه‌گیری می‌گردد.

۷- منابع

۱. پ. عباس‌زاده و م. بهرامی، روش‌های کمی آینده‌پژوهی (سری‌های زمانی تا هوش مصنوعی)، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، چاپ دوم، ۱۳۹۷.
2. R. Owens, "Photodetectors: Devices and Applications", Library Press, New York, 2017.
3. S. Inayatullah, "Futures studies: theories and methods." There's a future: Visions for a Better World, BBVA, Madrid (2013) 36-66.
4. G. Förster, "Scenarios of a Liberalized Electricity Supply", Academy for Technology Assessment (2002) Stuttgart.
5. G. Förster, W. Weimer-Jehle, "Scenarios of a liberalized electricity supply", Technology Assessment in Theory and Practice, 12: (1) (2003).



6. W. Weimer-Jehle, J. Buchgeister, W. Hauser, H. Kosow, T. Naegler, W.R. Poganietz, T. Pregger, S. Prehofer, A. von Recklinghausen, J. Schippl, and S. Vögele. "Context scenarios and their usage for the construction of socio-technical energy scenarios", *Energy*, 111 (2016) 956-970.
7. A. Månsson, "Energy security in a decarbonised transport sector: A scenario based analysis of Sweden's transport strategies", *Energy Strategy Reviews*, 13 (2016) 236-247.
8. M. Schneider, and B. Gill, "Biotechnology versus agroecology: Entrenchments and surprise at a 2030 forecast scenario workshop." *Science and Public Policy* 43(1) (2015) 74-84.
9. G. Meylan, R. Seidl, and A. Spoerri. "Transitions of municipal solid waste management. Part I: Scenarios of Swiss waste glass-packaging disposal." *Resources, Conservation and Recycling*, 74 (2013) 8-19.
10. Y. Zhang, "Strategic scenario study on international cooperation of e-waste management and metal recycling". Master thesis, ETH Zurich, University of Graz, 2014.
11. M. Mphahlele, "Interactive Scenario Analysis Technique for Forecasting E-Skills Development", Dissertation. Tshwane University of Technology, Pretoria (South Africa), 2012.
12. W. Weimer-Jehle, J. Deuschle, and R. Rehaag. "Familial and societal causes of juvenile obesity—A qualitative model on obesity development and prevention in socially disadvantaged children and adolescents." *Journal of Public Health*, 20 (20 (2012) 111-124.
13. S. R. Daniels, D. K. Arnett, R. H. Eckel, S. S. Gidding, L. L. Hayman, S. Kumanyika, T. N. Robinson, B.J. Scott, S. St. Jeor, and C. L. Williams. "Overweight in children and adolescents: pathophysiology, consequences, prevention, and treatment." *Circulation*, 111 (15) (2005) 1999-2012.
14. P. Abbassi, M. Kaul, V. Mohan, Y. Shen, Z. Winkelman, "Securing the net - Global governance in the digital domain", *Global Governance Futures*, report 2013.
15. J. Ehrhardt, "Realistic Development Scenarios for a Digital and Open Cloud Services Platform". Master Thesis, Reutlingen University, 2014.
16. M. Ruth, O. Özgün, J. Wachsmuth, and S. Gößling-Reisemann. "Dynamics of energy transitions under changing socioeconomic, technological and climate conditions in Northwest Germany." *Ecological Economics* 111 (2015) 29-47.
17. V. Schweizer, "Scenarios and Decision Support for Security and Conflict Risks in the Context of Climate Change." *Current Climate Change Reports*, 5 (1) (2019) 12-23.
18. G. Aschenbrücker, R. Geiger, "The cross-impact balance sheet analysis as an instrument of early detection". *Controller Magazine*, 3 (2015) 47-52.
19. I. Chuvyckina, *The perspectives of the EU-Russia Energy Dialogue - a scientific scenario analysis*. Dissertation. University of Bremen, 2017.
20. H. Lee, and Y. Geum. "Development of the scenario-based technology roadmap considering layer heterogeneity: An approach using CIA and AHP." *Technological Forecasting and Social Change*, 117 (2017) 12-24.
21. W. Weimer-Jehle, "Cross-impact balances: A system-theoretical approach to cross-impact analysis", *Technological Forecasting and Social Change*, 73(4) (2006) 334-361.
22. W. Weimer-Jehle, "Cross-impact balances: Applying pair interaction systems and multi-value Kauffman nets to multidisciplinary systems analysis", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(14) (2008) 3689-3700.
23. M. Héder, *From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation*, the *Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal*, 22(2) (2017) article 3.
24. R. J. B. Balaguru and B. G. Jeyaprakash, "Quantum Wells, Quantum Wires, Quantum Dots, Quantum Limit of Conductance, Quantum Capacitance & Quantum HALL Effect, NPTEL courses– Electrical & Electronics Engineering – Semiconductor Nanodevices", NPTEL courses.
25. A. Karim and J. Y Andersson, *Infrared detectors: Advances, challenges and new technologies*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 51 (2013) 01200.

26. <https://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/photodiode-sensor-market.htm>.
27. M. S. El-Tokhy, I. I. Mahmoud, H. A. Konber, Comparison studies of infrared photodetectors with a quantum-dot, *Opto-electronics review*, 19(4) (2011) 405–417.
28. M. S. El-Tokhy, I. I. Mahmoud, H. A. Konber, Comparative study between different quantum infrared photodetectors, *Opt Quant Electron* (2009) 41:933–956.
29. A. Karim and J. Y Andersson, Infrared detectors: Advances, challenges and new technologies, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 51(2013) 01200.
30. G. Wang, Y. Zhang, C. You, B. Liu, Y. Yang, H. Li, A. Cui, D. Liu, H. Yan, Two dimensional materials based photodetectors, *Infrared Physics & Technology*, 88 (2017) 149-173.
31. N. Huo and G. Konstantatos, Recent Progress and Future Prospects of 2D-Based Photodetectors, *Advanced materials*, (2018) 1801164.

کنفرانس بین المللی فناوری‌های اندازه‌گیری و ابزار دقیق IEEE

۲۵-۲۸ می ۲۰۲۰، دوبرونیک، کرواسی

کنفرانس بین‌المللی فناوری ابزار دقیق و اندازه‌گیری (IEEE I²MTC)، کنفرانس مربوط به انجمن ابزار دقیق و اندازه‌گیری IEEE است و به پیشرفت‌های صورت گرفته در روش‌های اندازه‌گیری، سیستم‌های اندازه‌گیری، ابزار دقیق و سنسور در همه زمینه‌های علوم و فناوری اختصاص یافته است. این ویژگی‌ها I²MTC را به یک رویداد منحصر به فرد و یکی از مهمترین کنفرانس‌ها در زمینه ابزار دقیق و اندازه‌گیری تبدیل می‌کند.

IEEE I²MTC به عنوان کاتالیستی جهت ارتقاء تعامل بین صنعت و دانشگاه ارائه شده است. در این کنفرانس طیف گسترده‌ای از نتایج تحقیقات دانشگاهی همراه با کاربردهای عملی بالقوه در فناوری صنعتی فعلی و همچنین پیشرفت‌های صنعت و کاربرد محور ارائه خواهد شد.



محورهای ارسال مقاله

- Measurement theory and methodology
- Metrology and technical standards
- Information technology in measurements
- Signal and image processing in measurements
- Circuits and systems for instrumentation and measurement
- Instrumentation systems design and evaluation
- Data acquisition systems
- Real time measurements
- Networked embedded sensors
- Sensors and transducers
- Micro and Nanotechnology in instrumentation and measurement
- Optical measurement systems and fiber optic measurements
- Measurement of electromagnetic quantities
- Measurement of mechanical and acoustical quantities
- Measurement of chemical and biological quantities
- Non-destructive testing and evaluation
- Biomedical measurements
- Measurements in energy and power
- Measurements in communication systems
- Industrial measurements
- Measurements in robotics
- Measurements in automotive and transportation industry
- Aerospace measurements
- Measurements in agriculture and food production
- Measurements in oil and drill industry
- Environmental measurements

نحوه‌ی مشارکت در کنفرانس

- سخنرانی‌های کلیدی
- گفتگوهای ویژه
- نمایش‌های صنعتی
- ارائه مقالات
- جلسات ویژه
- پوسترها

موضوع نشست‌ها و کمیته‌های علمی

۱. اندازه‌گیری پیشرفته و تجزیه و تحلیل داده‌ها در تجهیزات صنعتی پایش سلامت

تنظیم کننده: Weihua Li (whlee@scut.edu.cn)

۲. حسگرهای هوشمند در صنعت

تنظیم کننده: Vincenzo Paciello (v.paciello@unicas.it)

۳. سنسورها، ابزار دقیق و فناوری‌های هوشمند مصنوعی Envi-IoT در زمینه بررسی تغییرات میدانی، پیش‌بینی بیماری‌ها

تنظیم کننده: Der-Chen Huang (huangdc@nchu.edu.tw)

۴. اندازه‌گیری‌های مربوط به چالش‌ها و فناوری‌های ارتباطی: پهن‌بند و شبکه‌های صنعتی

تنظیم کننده: Gianfranco Miele (emiliano.sisinni@unibs.it)

۵. سیستم‌ها و فناوری‌های پوشیدنی پایشی برای کاربردهای پزشکی

تنظیم کننده: Carlo Massaroni (c.massaroni@unicampus.it)

۶. ابزار دقیق و اندازه‌گیری برای بهبود کیفیت، اطمینان و ایمنی: چشم اندازه‌های جدید برای تحقیقات و صنعت

تنظیم کننده: Lorenzo Ciani (lorenzo.ciani@unifi.it)

۷. حسگرهای سبز: سیستم‌ها و مبدل‌های سنجش برای اجرای اقتصاد پایدار

تنظیم کننده: Carlo Trigona (carlo.trigona@dieei.unict.it)

۸. حسگرهای و سیستم‌های حسگری در فناوری‌های کمکی

تنظیم کننده: Vincenzo Marletta (vincenzo.marletta@dieei.unict.it)

۹. سیستم‌های اندازه‌گیری مربوط به در شرایط محیطی سخت

تنظیم کننده: Georg Brasseur (georg.brasseur@tugraz.at)

۱۰. تصویربرداری چند کاناله برای کاربردهای علمی و صنعتی

تنظیم کننده: Maik Rosenberger (maik.rosenberger@tu-ilmenau.de)

۱۱. پیشرفت‌های اخیر در حسگرهای فیبر نوری: حسگرها، ابزار دقیق و کاربردها

تنظیم کننده: Tuan Guo (tuanguo@jnu.edu.cn)

۱۲. سیستم‌های حسگری مربوط به امنیت عمومی و واکنش اضطراری

تنظیم کننده: Yang Cai (ycai@cmu.edu)

۱۳. مدارهای ارتباطی پیشرفته در حسگرهای خودمختار

تنظیم کننده: Bobby George (boby@ee.iitm.ac.in)

۱۴. سیستم‌ها و حسگرهای با مصرف انرژی پایین و مستقل از انرژی

تنظیم کننده: Sebastian Bader (Sebastian.Bader@miun.se)

۱۵. تصویربرداری و حسگری الکترومغناطیسی میدان نزدیک

تنظیم کننده: Gui Yun Tian (g.y.tian@newcastle.ac.uk)

۱۶. رادیوی نرم‌افزاری در اندازه‌گیری و ابزار دقیق

تنظیم کننده: Hubert Zangl (hubert.zangl@aau.at)

۱۷. رباتیک: حسگری مجاورتی و لمسی

تنظیم کننده: Stephan Mühlbacher-Karrer (Stephan.Muehlbacher-Karrer@joanneum.at)

۱۸. ارتباطات درون شبکه ای برای شبکه‌های بدن

تنظیم کننده: Željka Lučev Vasić (Zeljka.Lucev.Vasic@fer.hr)

حامیان مالی



پشتیبانان



غرفه داران نمایشگاه جانبی



GlobalLogic®

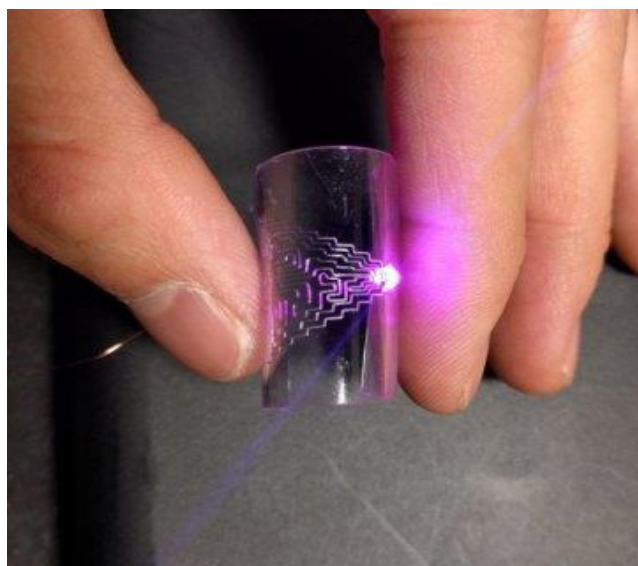
سایت کنفرانس

<https://i2mtc2020.ieee-ims.org/pages/call-papers>

تازه‌های علمی

چاپ فلزی روشی ارزان برای ساخت قطعات الکترونیکی کشسان و انعطاف پذیر

خلاصه: محققان روش جدیدی برای چاپ مستقیم مدارهای فلزی ابداع کرده‌اند که ساخت لوازم الکترونیکی با قابلیت‌های انعطاف پذیری و کشسانی را میسر می‌کند. این تکنیک می‌تواند از لایه‌های چندگانه از جنس فلز و بستر نیمه‌رسانا بهره‌بردار و با سیستم‌های تولید کنونی که از فناوری‌های چاپ مستقیم استفاده می‌کنند نیز سازگار است.



۱: این نمونه اولیه، توانایی تکنیک جدید در چاپ مدارهای کشسان و انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد **Jingyan Dan**:دانشگاه ایالتی کارولینای شمالی

پژوهشگران دانشگاه ایالتی کارولینای شمالی روش جدیدی برای چاپ مستقیم مدارهای فلزی ابداع کرده‌اند که ساخت لوازم الکترونیکی انعطاف‌پذیر و دارای قابلیت کشسانی را ممکن می‌کند. این تکنیک

می‌تواند از چندین لایه فلز و بستر نیمه‌رسانا (substrate) استفاده کند و با سیستم‌های تولید کنونی که از روش چاپ مستقیم استفاده می‌کنند نیز سازگار است.

جیانگ دونگ نویسنده مقاله در این زمینه و دانشیار دانشکده صنعت و مهندسی سیستم‌ها دانشگاه ایالتی کالیفرنیا شمالی می‌گوید: "نوید استفاده از الکترونیک انعطاف‌پذیر در بسیاری از زمینه‌ها داده شده است، اما هزینه‌ی تولید قابل توجه آن باعث شده که چالشی در ساخت عملی آنها برای استفاده تجاری ایجاد گردد." وی در ادامه اظهار می‌دارد: "رویکردهای ما باید هزینه‌ها را کاهش داده و روش‌های کارآمدی برای تولید مدارهایی با تفکیک‌پذیری بالا فراهم آورد تا یکپارچه‌سازی آنها در تجهیزات تجاری امکان‌پذیر شود."

این تکنیک از فناوری فعلی چاپ الکترونیکی استفاده می‌کند که قبلاً هم در بسیاری از فرآیندهای ساخت که از جوهرهای خاص^۱ (یا جوهرهای عملیاتی) بهره می‌بردند، استفاده می‌شد. تیم آقای دونگ در این روش بجای جوهر از آلیاژهای فلزی مذاب با نقطه ذوب کمتر از ۶۰ درجه سلسوس استفاده می‌کند. این محققان روش چاپ خود را با استفاده از سه آلیاژ متفاوت، و بر روی چهار بستر مختلف از جمله شیشه، کاغذ، و دو نوع پلیمر کشسان ارائه داده‌اند.

دونگ می‌گوید: "این چاپ مستقیم بوده و نیازی به هیچ‌گونه پوشانه‌گذاری (ماسک)، لایه‌برداری، یا قالب-ریزی ندارد که این امر فرآیند را بسیار سراسرتر و آسان‌تر می‌کند." محققان تاب‌آوری^۲ مدار روی یک بستر پلیمری را آزمایش کردند و دریافتند که هدایت (رسانایی) مدار حتی بعد از هزار بار خم شدن تغییری نمی‌کند. مدارها حتی زمانی که تا ۷۰ درصد استحکام کششی^۳ کشیده می‌شوند نیز از نظر الکتریکی پایدار هستند.

^۱ Functional Inks – جوهرهایی که بسته به کاربرد رسانا، نارسانا یا نیمه‌رسانا هستند.

^۲ resilience

^۳ tensile strain

محققان همچنین دریافته‌اند که این مدارها حتی اگر بوسیله خمش یا کشش بیش از حد شکسته شوند، قادر به "ترمیم" خود هستند.

دونگ می‌گوید: "به دلیل نقطه ذوب پایین، شما می‌توانید به آسانی سطح موردنظر را تحت تاثیر دمای حدود ۷۰ درجه سلسیوس قرار دهید که در این حالت فلز مربوطه در اثر حرارت نسبتاً سیال شده و درهم می‌آمیزد و بدین صورت آسیب وارد شده تعمیر می‌گردد."

پژوهشگران قابلیت عملکردی این روش چاپ را با ساخت یک حسگر لمسی دارای تراکم بالا نشان داده‌اند که در آن یک آرایه ۴۰۰ پیکسلی در یک سانتی‌متر مربع گنجانده شد.

آقای دونگ می‌گوید: "ما تاب‌آوری و کارآمدی راهکارمان را نشان داده‌ایم و تلاش می‌کنیم تا به منظور پیاده‌سازی این روش در تولید حسگرهای پوشیدنی یا سایر تجهیزات الکترونیکی، با صنعت همکاری کنیم."

مراجع:

Story Source:

Materials provided by North Carolina State University. *Note: Content may be edited for style and length.*

Journal Reference:

Yiwei Han, Jingyan Dong. Electrohydrodynamic (EHD) Printing of Molten Metal Ink for Flexible and Stretchable Conductor with Self-Healing Capability. *Advanced Materials Technologies*, 2017; 1700268 DOI: 10.1002/admt.201700268

Vibration Analysis of A Wind Turbine Blade Integrated by A Piezoelectric Layer

Mohammad Kashfi**, Parisa Fakhri, Babak Amini, Neda Yavari

Abstract—Vibration of wind turbine blades is a critical parameter to study its durability and performance. Active control using piezoelectric sensors and actuators have been emerged as a promising technology. In the present work, finite element analysis (FEA) has been developed for vibration analysis of a smart wind turbine blade, in which a piezoelectric layer is integrated on the blade layers. The numerical model of the blade with active and inactive piezoelectric actuator was constructed in COMSOL Multiphysics. Modal analysis has been performed to identify natural frequencies. It was shown that usage of piezoelectric layer increases the blade stiffness, thus increases the blade natural frequencies. These results indicate the feasibility of using piezoelectric actuators as a smart material for vibration suppression in the wind turbine blades.

Keywords—Piezoelectric; Wind Turbine Blade; Vibration analysis; FEM modeling.

Introduction

In the recent decades, usage of smart materials to active control of structures have attracted a lot of attractions [1-3]. The piezoelectric materials are mostly used smart materials to active control of structures because of their favorable properties such as fast response and wide inclusion of frequency. The direct and reverse piezoelectric effects allow these materials to be applied as sensors and actuators to active control of systems [4-6]. Many effort have been made to reduce the vibration of plates by piezoelectric patches integrated with the main structure. In order to see the actuator behavior of a piezoelectric material, only reverse piezoelectric effect is considered where the external electric field induces deformation in the material, neglecting the direct piezoelectric effect which is result of the deformation of material [7].

Vibration of wind turbine blades is an important issue to investigate the engine durability and performance. Zemsic et al [8] developed one dimensional finite element model for the analysis of structures with applied piezoelectric sensors to control the mechanical behavior in real-time. Sensitivity analysis was also performed for modal analysis with and without piezoelectric patches. Pietrzakowski [9] formulated the models of laminated plates integrated with piezoelectric that involve the electric potential distribution. The analysis was carried out for supported plates. The effect of piezoelectric layers thickness and also the electric potential



distribution on the natural frequencies modification was investigated. Qiao et al [10] proposed the usage of piezoelectric materials to protection of blade vibration. The blades was modeled and the embedded piezoelectric materials was designed as well. They focused on research considering active control of rotor and smart structures to reduce the load. The displacement response from the piezoelectric actuator was obtained to control the vibration.

Two most important piezoelectric materials are Lead zirconate titanate (PZT) and polyvinylidene difluoride (PVDF) [11]. These materials have become popular in the field of sensors, actuators and MEMS [12-14]. The main idea to apply piezoelectric elements as sensors and actuators to control the flexible structures has been experimentally studied by numerous researches. Most works have been focused on piezoelectric actuation and active damping of the beam transverse vibrations with bonded or embedded piezoelectric elements. The analysis is generally simplified by considering a static model for the interaction between the actuators and the host structure, and by ignoring the effect of piezoelectric elements on the beam stiffness.

In the present work, the effect of a piezoelectric layer on the stiffness of a smart wind turbine blade is numerically studied. The considered blade is a composite material integrating piezoelectric actuator layer. The piezoelectric layer is poled through the thickness and two surface electrodes applied on it. A finite element analysis of the wind turbine blade with active and inactive piezoelectric actuator is developed and analyzed for studding the natural frequencies and mode shape determinations.

For piezoelectric materials, the electrical and mechanical constitutive equations are coupled. Here, the laminar piezoelectric effect is considered. It means that the material is polarized in the thickness direction. The describing electromechanical equations for a linear piezoelectric material can be written as follows:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (1)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ij} E_j \quad (2)$$

where

σ —stress

ε —strain



D – electric displacement

E – electric field intensity

c – stiffness matrix

ϵ – permittivity matrix

e – piezoelectric coefficient matrix.

Governing Eq. (1) refers to converse piezoelectric effect in which the stress in the piezoelectric material is proportional to both the applied strain and the applied electric field. It uses in case of actuators.

The Eq. (2) refers to direct piezoelectric effect. It shows that the electric displacement is proportional to both the applied strain and the applied electric field. The permittivity in Eq. (2) is measured at the constant strain condition. In the considered piezoelectric layer the poling axis is in the direction of the thickness or 3 axis, and the piezoelectric coefficient matrix e is given by

$$e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Where e_{31} , e_{32} , e_{33} are the piezoelectric stress constants in the 1, 2 and 3 axis, respectively. e_{24} , and e_{15} are the piezoelectric shearing stress constants in the 2-3 and 1-3 plane, respectively.

The permittivity matrix ϵ is written as

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Results and discussion

To formulate a mathematical model for dynamic behavior of a system, the modal analysis is used which determine the inherent dynamic characteristics of the system. The basic idea behind modal analysis is that the physical and mechanical properties of the structure such as mass, stiffness and damping are defined by the modal parameters such as natural frequencies, mode

shapes and modal damping. Thereby, changes in the material properties of a system, could lead to observable changes in the modal parameters.

COMSOL Multiphysics is a complete set of simulations that can solve the differential equations of nonlinear systems by FEA in one, two and three dimensional problems.

In order to apply modal analysis within COMSOL, the blade is modeled and meshed by using 6612 elements obtained after mesh independency study. The FE model is shown in Fig. 1. [15]. The mesh refinement was performed by increasing the number of elements of the structure. The modal analysis is then chosen; the properties of the material and the boundary conditions of the blade are applied to the model as given in Table 1. A PZT-5A type was chosen as piezoelectric layer on the whole surface of blade. The material properties is provided in Table 1.

The main dimensions of the considered blade are shown in Fig. 1. The length of the blade is 80 cm and the major width is 12 cm. Moreover, arc length is indicated in the figure which is needed in the next step of analysis.

Left side of the blade is fixed in all direction to apply the boundary conditions. This region is considered to the main body of the rotor, thus fixed displacement condition is assumed in the FE simulation.

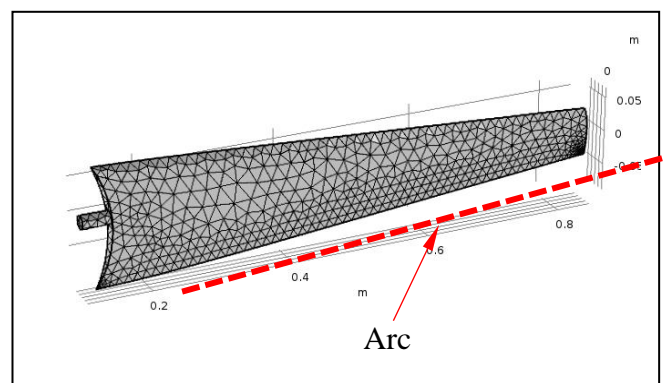


Fig. 1 FE model of the wind turbine blade in COMSOL

MECHANICAL AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF PZT-5A

Stiffness matrix component (GPa)

$$C_{11} = C_{22} = 12.72, C_{33} = 11.74, C_{12} = 8.021, C_{13} = C_{23} = 8.46702,$$

$$C_{44} = C_{55} = 2.29885, C_{66} = 2.34742$$

Piezoelectric coefficient (pC/N)

$$e_{15} = e_{24} = 710, e_{31} = e_{32} = e_{33} = -274$$

Relative Permittivity

$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 1704.4, \epsilon_{33} = 1433.6$
Density (kg/m ³)
7500

A piezoelectric layer, modeled across the whole surface of the composite blade, was considered in two conditions; active and inactive states. The blade with an inactive piezoelectric actuator is equivalent with the blade without any piezoelectric layer. Once the voltage is applied to the piezoelectric layer, it will be active and acts as an actuator.

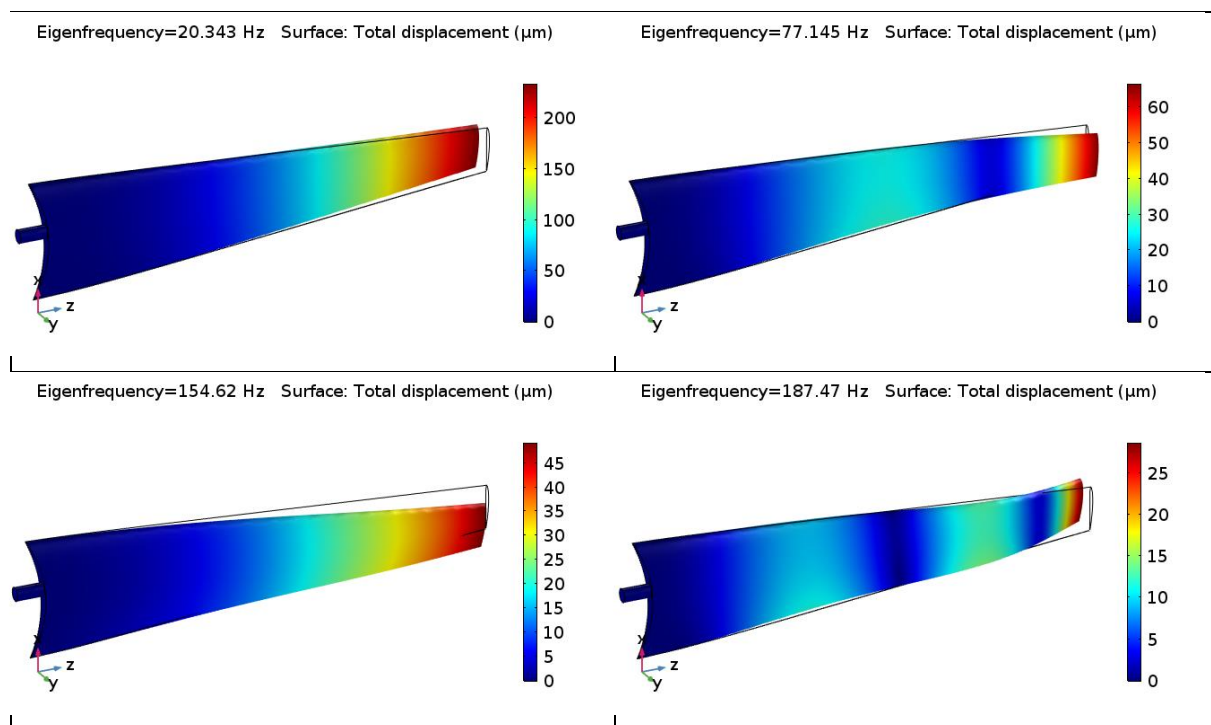


Fig. 2 First four modal deformation contours for the wind turbine blade while the piezoelectric actuator is disabled

A finite element analysis of the wind turbine blade with active and inactive piezoelectric actuator is developed and analyzed for the natural frequency and mode shape determinations. First, the numerical simulations are carried out for the blade with inactive piezoelectric actuator. Fig. 2 shows the blade mode shapes while the piezoelectric layer is applied as an actuator.

First six modes were determined, however to avoid crowding, only four modes were shown in the Fig. 2. The data for all six modes are presented in the following.

Fig. 3 demonstrates the deformation of the blade in every mode shape obtained from the FE analysis. The figure suggests that the deformation along the blade edge is decreased by increasing the natural frequency. It implies that lower natural frequencies could be considered as the critical values.

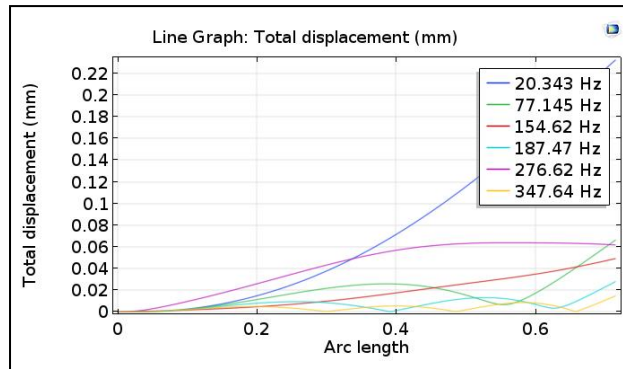


Fig. 3 Total displacement as a function of the arc length while the piezoelectric actuator is disabled

The figure suggests, the first three natural frequency are determined 20.343, 77.145 and 154.62 Hz. As stated before the critical natural frequencies (minimum values) are reported here.

Numerical simulations are also carried out for blade with piezoelectric actuator as shown in Fig. 4. In these simulation, the piezoelectric layer is actuated by an external voltage. Same as before, six modes were considered, to avoid crowding only four modes were shown in the Fig. 4. The data for all six modes are presented in Fig. 5.

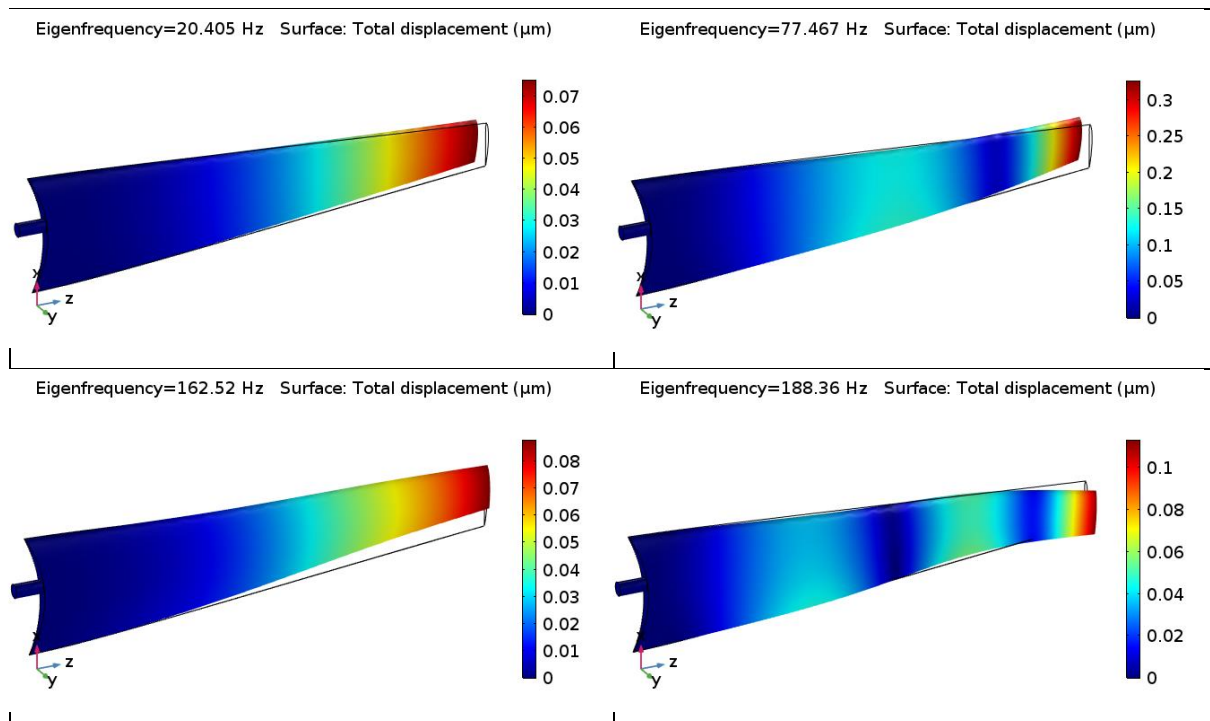


Fig. 4 First four modal deformation contours for the wind turbine blade with active piezoelectric actuator

Arc length deformation curves for first six modes are presented in Fig. 5. As the figure shows, the first three natural frequencies are determined 20.405, 77.467 and 162.52 Hz.

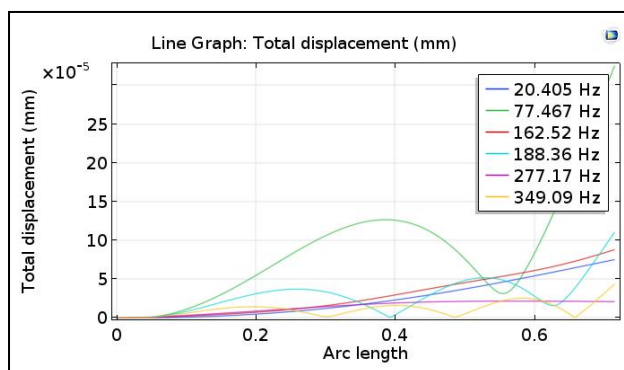


Fig. 5 Total displacement as a function of the arc length while the piezoelectric actuator is enabled

In Table 2 the natural frequencies of the simulated blade without actuation is compared with natural frequencies after actuation. As the table shows, all natural frequencies are reasonably enhanced. Therefore the working speed can perform better by increasing the natural frequencies. Moreover, in the first mode shape more than 0.3% enhancement is obtained, nevertheless about 5% improvement is determined for the blade after piezo actuation for third mode shape.

COMPARING NATURAL FREQUENCIES WHILE piezo LAYER ACTUATION IS ENABLED AND DISABLED

Mode shape	Natural frequency (Hz)		Error (%)
	Piezoelectric unactuated	Piezoelectric actuated	
1	20.343	20.405	0.305
2	77.145	77.467	0.417
3	154.62	162.52	5.109
4	187.47	188.36	0.475

It is worth to note that the natural frequencies are reasonably improved, however the blade tip deformation is significantly reduced. For instance in mode shape 1 the blade tip deformation is reduced from 200 micron to 0.07 micron and for mode shape 2 the values are calculated 90 and 0.1 microns before and after actuating the piezoelectric layer, respectively. It implies that, although integrated piezoelectric layer actuating enhanced the natural frequencies, the total deformation of the blade tip is significantly improved.

Conclusion

As sum up, obtained results show that the vibrations induced in the wind turbine blade are damped by applying piezoelectric actuator on the surface of blades. Therefore, piezoelectric

actuators can be used for vibration damping in wind turbines by applying these actuators to the wind turbine blades. As it is seen in the deformation contours raised for the first four mode shapes, in mode 3 the deformation mechanism is changed to twisting from bending. This change leads to significantly change in the deformation value. It is worth to note that, due to the deformation in mode 4 is turn to bending once more, the blade deformation is increased same as first two modes.

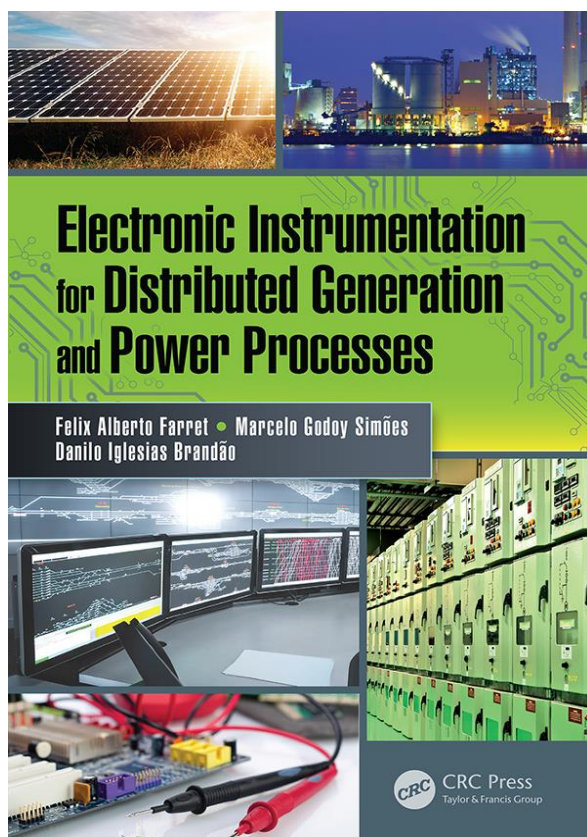
In this paper, numerical simulations using COMSOL are conducted for a smart wind turbine blade vibrations by applying a piezoelectric layer on its surface. Numerical results are obtained for inactive and active piezoelectric actuator. The comparison of the natural frequencies with inactive and active piezoelectric layer show that using piezoelectric actuator, the natural frequencies has been increased which is resulted from increase of blades stiffness. Moreover, significant improvement is achieved in total deformation of the blade tip.

These results show that the vibrations induced in the wind turbine blade are damped by applying piezoelectric actuator on the surface of blades. Therefore, piezoelectric actuators can be used for vibration damping in wind turbines by applying these actuators to blades.

References

1. Xiangqiu, L., *Thory and experiment research on active control of smart structures*. The Master Degree in Engineering of Harbin Institute of Technology, 2006.
2. Morada, A., et al., *Application of piezoelectric materials for aircraft propeller blades vibration damping*. Int. J. Sci. Eng. Res, 2015. **6**: p. 513-520.
3. Ciang, C.C., J.-R. Lee, and H.-J. Bang, *Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods*. Measurement science and technology, 2008. **19**(12): p. 122001.
4. Chen, W.-m., D. Guand, and M. Li, *Active vibration control of thin plate with piezoelectric actuators (P)*. ACTA AERONAUTICA ET ASTRONAUTICA SINICA-SERIES A AND B-, 2001. **22**(2): p. 109-154.
5. Ray, M. and J. Shivakumar, *Active constrained layer damping of geometrically nonlinear transient vibrations of composite plates using piezoelectric fiber-reinforced composite*. Thin-Walled Structures, 2009. **47**(2): p. 178-189.
6. Qiao, Y.-h., et al., *Modeling smart structure of wind turbine blade*. Applied Composite Materials, 2012. **19**(3-4): p. 491-498.
7. Pietrzakowski, M., *Active damping of laminated plates by skewed piezoelectric patches*. Journal of theoretical and applied Mechanics, 2001. **39**(2): p. 377-393.
8. Zemčik, R. and P. Sadilek, *Modal analysis of beam with piezoelectric sensors a actuators*. 2007.
9. Pietrzakowski, M., *Piezoelectric control of composite plate vibration: Effect of electric potential distribution*. Computers & Structures, 2008. **86**(9): p. 948-954.
10. Qiao, Y.-h., et al., *Finite element analysis and vibration suppression control of smart wind turbine blade*. Applied Composite Materials, 2012. **19**(3-4): p. 747-754.
11. Fakhri, P., et al., *Flexible hybrid structure piezoelectric nanogenerator based on ZnO nanorod/PVDF nanofibers with improved output*. RSC advances, 2019. **9**(18): p. 10117-10123.
12. Song, G., et al., *Wind turbine blade health monitoring with piezoceramic-based wireless sensor network*. International Journal of Smart and Nano Materials, 2013. **4**(3): p. 150-166.

13. Huh, Y.-H., et al., *Application of PVDF film sensor to detect early damage in wind turbine blade components*. Procedia Engineering, 2011. **10**: p. 3304-3309.
14. Rim, M.-S., et al. *Damage assessment of small-scale wind turbine blade using piezoelectric sensors*. in *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012*. 2012. International Society for Optics and Photonics.
15. Kashfi, M., et al., *A new overall nonlinear damage model for fiber metal laminates based on continuum damage mechanics*. Engineering Fracture Mechanics, 2019. **206**: p. 21-33.



ابزار دقیق الکترونیکی برای تولید پراکنده

و فرایندهای قدرت

نویسنده:

Felix Alberto Farret,
Marcelo Godoy Simões,
Danilo Iglesias Brandão

ناشر:

Taylor & Francis Group

ابزار دقیق به عنوان هنر علم و فن آوری در تقریب‌سازی اندازه‌گیری و کنترل متغیرهای پردازش درون مجموعه‌های واقعی از جهان، حوزه‌ی تولیدی، آزمایشگاهی یا حتی مجموعه‌ای بسیار متنوع و گسترده از آرایش سنسورها برای انواع محیط‌هایی مانند زمین، جو، اقیانوس، جنگل‌ها، فضا و غیره در نظر گرفته می‌شود. هرگونه ابزار اندازه‌گیری کمیت فیزیکی مانند جریان، دما، سطح، فاصله، زاویه، فشار یا پارامتر الکتریکی می‌تواند به سادگی سنجش خواندن مستقیم، کمی پیچیده‌تر برای آنالیزورهای پردازش چند متغیره یا حتی کاملاً گسترده در یک منطقه جغرافیایی وسیع با قابلیت‌های شبکه‌ای باشد. دستگاه‌ها یا ابزار دقیق می‌تواند بخشی از یک سیستم کنترل در پالایشگاه‌ها، کارخانجات، وسایل نقلیه یا سیستم‌های قدرت باشد. دستگاه‌های مکانیکی سنتی، مانند دستگاه‌های مورد استفاده در دیگ‌های بخار، ژنراتورهای الکتریکی، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال با دستگاه‌های پیشرفته الکترونیکی و دیجیتال جایگزین شده‌اند. عصر جدیدی از انرژی‌های تجدید پذیر و سیستم‌های شبکه هوشمند با پروتکل‌های ارتباطی جامع بر مبنای

تکنولوژی‌ها بسیاری مانند بلوتوث، Wi-Fi و دستگاه‌های اینترنتی، بحث کلی فناوری، علم کامپیوتر، مهندسی کامپیوتر، شبکه سازی و طراحی‌های سخت افزار محور و زمان واقعی را لازم دارد که می‌تواند عصر جدید سیستم کنترل و اتوماسیون مدرن شامل کامپیوتر، دستگاه‌های الکترونیکی، ارتباطات و حلقه‌های کنترل با شبکه‌های هوشمند و مدارهای دیجیتال جالب را شامل شود. این کتاب پلی ارتباطی بین فرایندهای صنعتی نمایشی توسط منابع پراکنده و لوازم جانبی آنالوگ/دیجیتالی مورد استفاده در سیستم‌های برق مدرن است. متغیرهای سنجش ضروری به دقت، پاسخ سریع و تصمیم‌گیری مناسب جهت کنترل فرآیند صنعتی نیاز دارند.

این کتاب ابزار دقیق الکترونیکی را برای سیستم‌های منابع پراکنده مدرن مورد بررسی قرار می‌دهد. نویسندگان مبانی ابزارهای الکترونیکی، تقویت کننده‌های آنالوگ برای ابزار دقیق، سنسورهای دیجیتال و آنالوگ، مبانی ابزارهای الکترونیکی برای اندازه‌گیری‌های الکترومکانیکی، شبیه‌سازهای سیگنال، تجزیه و تحلیل سیگنال سیستم‌های قدرت و سیستم‌های جمع‌آوری داده‌ها را مورد بحث قرار می‌دهند. آنها همچنین نحوه استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی در ابزار دقیق برای تولید توزیع شده و نحوه‌ی افزایش شبکه هوشمند با چنین نمونه‌ی ابزار دقیق را توضیح می‌دهند.

من این کتاب را برای خوانندگان توصیه می‌کنم که می‌خواهند بدانند چگونه پانل‌های فتوولتائیک مدرن، انرژی باد، سلول‌های سوختی، ذخیره انرژی و ماشین‌های الکتریکی می‌توانند با ابزار الکترونیکی دیجیتال تحت نظارت، مدیریت و کنترل قرار گیرند. فصل‌های این کتاب شامل مطالب مربوط به طراحی، تجزیه و تحلیل و اجرای مدار برای ابزار الکترونیکی است. زمینه منابع برق پراکنده به منظور ساخت سیستم‌های انرژی تجدید پذیر برای اتصال به شبکه برق قدرت مدرن بسیار مهم است. این بحث شامل آلارم‌های هوشمند، بارهای هوشمند، طراحی سیستم و یکپارچه‌سازی است. این کتاب می‌تواند برای دوره‌های کارشناسی ارشد یا دوره‌های کارشناسی ارشد سال اول توصیه گردد. همچنین، متخصصین و مهندسان صنعت از خواندن این کتاب سود خواهند برد.