



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Smart materials: Specifications and Applications

ARTICLE INFO

Article Type

Review

Authors

A. Mohammad Saeedi Zadegan¹
B. Mona Zamani Pedram²

¹ Department of Mechanics, K. N. Toosi
University of Technology, Tehran,
Iran, Saeidi97@kntu.ac.ir

² Department of Mechanics, K. N. Toosi
University of Technology, Tehran,
Iran, M.zpedram@kntu.ac.ir

* Correspondence

Address: Department of Mechanics, K.
N. Toosi University of Technology,
Vanak Square, Tehran, Iran
Postal Code: 19991-43344
Phone: (021) 88678580
Fax: 88674758
Saeidi97@email.kntu.ac.ir

Article History

Received: April 2, 2021
Accepted: June 27, 2021
published: August 3, 2021

ABSTRACT

Nowadays, in various fields of biology and engineering, the need for instrumental and smart engineering materials has increased in the world. Due to the requirement of using and classifying each of these materials, describing and reviewing them (one by one) is a time consuming and almost impossible task. Therefore, according to the similarities in their fields of applications, each group of known smart materials can be classified in their inherent response type. Also, identifying the strengths and weaknesses in each group of these materials is a reliable way to grow and improve the efficiency of smart materials in various sciences, which will lead to the production of better materials with greater efficiency and longer useful life. Finally, accurate knowledge of these properties makes it possible to build a combination of several smart materials (while maintaining the expected properties) in any engineering or medical structure.

Keywords: Engineering structures, intrinsic properties, self-improve, smart materials, nuclear engineering

مواد هوشمند: مشخصات و کاربردها

محمد سعیدی زادگان*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مونا زمانی پدرام

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

امروزه، در زمینه های متفاوت زیستی و مهندسی نیاز به مواد مهندسی ساز و هوشمند در سراسر جهان افزایش یافته است. با توجه به لزوم کاربرد و دسته بندی هر یک از اینگونه مواد، توصیف و بررسی اجمالی یک به یک آن ها کاری وقت گیر و تقریباً ناممکن می باشد. لذا با توجه به شباهت ها در زمینه های کاربردیشان، هر گروه از مواد هوشمند شناخته شده می تواند در نوع پاسخ دهی ذاتی خود طبقه بندی بشود. همچنین شناسایی نقاط ضعف و قوت هر گروه از این مواد راهی قابل اطمینان به جهت رشد و بهبود بهره وری از مواد هوشمند در علوم مختلف می باشد که موجب تولید مواد بهتر با کارایی بیشتر و طول عمر مفیدتر خواهد شد. در نهایت شناخت دقیق این خواص امکان ساخت ترکیبی از چندین ماده هوشمند (با حفظ خواص مورد انتظار) در هر سازه مهندسی و یا پزشکی را فراهم می سازند.

کلید واژه ها: سازه مهندسی، خواص ذاتی، خود ترمیم، مواد هوشمند، مهندسی هسته ای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

* نویسنده مسئول: Saeidi97@kntu.ac.ir

۱ مقدمه

با پیشرفت علم، بسیاری از مواد جدید، با کیفیت بالا و مقرون به صرفه در زمینه های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته اند. در یکصد سال گذشته، مواد جدید به ویژگی چند منظوره بودن دست یافتند و همچنین نیاز مهندسی به بهینه سازی خصوصیات این مواد منجر به اصلاحاتی در آن ها شد. براساس آخرین سیر تکاملی مواد مهندسی، این مفهوم به سمت ترکیباتی از چند ماده با چند ویژگی پیش رفته است که اخیراً، مرحله تکاملی بعدی با مفهوم مواد هوشمند در نظر گرفته شده است. مواد هوشمند مواد نسل جدیدی هستند که از مواد ساختاری و کاربردی امروزی مرسوم فراتر رفته اند. این مواد دارای قابلیت انطباق با محرک های خارجی، مانند بارها یا محیط، با هوش ذاتی هستند [1,2]. مواد هوشمند را به عنوان موادی تعریف کرده اند که دارای توانایی تغییر خصوصیات فیزیکی خود به روش خاص در پاسخ به محرک خاص هستند [3]. محرک های خارجی می توانند فشار [4]، دما [5]، میدان های الکتریکی و مغناطیسی [6]، مواد شیمیایی [7]، فشار هیدرواستاتیک [8] یا تشعشعات هسته ای [9] باشند. خصوصیات فیزیکی قابل تغییر در این مواد می تواند تغییر در شکل، سختی، گرانشی یا میرایی باشد. در سال ۱۹۹۰ از این دسته از مواد را، مواد هوشمند معرفی کردند که در بهترین شرایط به تغییرات محیطی پاسخ می دهند و عملکردهای خود را با توجه به محیط نشان می دهند [10]. واژه هوشمندی در واقع خود سازگاری، خودسنجی، داشتن حافظه و ویژگی های متعدد مواد یا ساختارها را توصیف می کند. این خصوصیات کاربردهای احتمالی بیشماری را برای این مواد و سازه ها در فضا، در ساخت سیستم های زیرساخت های عمرانی، بیومکانیک و محیط فراهم می کند [1]. ویژگی های خود سازگاری سازه های هوشمند مزیت بزرگی است که از سازگاری ذاتی مواد هوشمند مانند آلیاژهای حافظه شکل استفاده می کند. به عنوان مثال با تغییر در این ویژگی های ذاتی، مواد هوشمند می توانند گسل ها و ترک ها را تشخیص دهند و

قرار گیرد که به نوبه خود رفتارهای "هوشمند" نشان دهند. نمونه‌هایی از این رفتار شامل پاسخ به محرک‌های بیرونی مانند خود ترمیمی، خود تحریک کنندگی، خودتشخیصی و تغییر شکل است. بنابراین، می‌توان مواد هوشمند را مواردی دانست که وسیله‌ای برای دستیابی به یک واکنش فعال "هوشمند" در محصولی ارائه می‌دهند که در غیر این صورت فاقد آن است و پتانسیل تولید بسیاری از قابلیت‌ها و ویژگی‌های پیشرفته را دارد. اگرچه غالباً به عنوان یک فناوری نسبتاً جدید مشاهده می‌شود زیرا اصطلاح "ماده هوشمند" برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفت، بسیاری از محصولاتی که از مواد برای انتقال رفتار هوشمندانه استفاده می‌کنند [14]، برای دهه‌های گذشته در دسترس بوده است، به عنوان مثال عینک‌های فتوکرومیک یکی از پرکاربردترین تجهیزات طبی در تکنولوژی عصر حاضر به منظور حذف نور اضافی و کمک به دید بهتر می‌باشند [15].

۳ کارایی مواد هوشمند

نمونه‌هایی از قابلیت‌های مواد هوشمند به شرح جدول ۱ است. توجه داشته باشید که این گروه‌ها لزوماً از یکدیگر جدا نیستند. به عنوان مثال، خود سنجی ممکن است با خود ترمیمی یا تشخیص خود به خودی همراه باشد یا آغاز شود. مواد تغییر شکل از بالاترین فناوری‌های ذکر شده هستند و بیشتر آن‌ها مبتنی بر مواد فلزی-حافظه شکل (SMM) می‌باشند [16]. آن‌ها ویژگی "به یاد آوردن" شکل اصلی خود را که پس از تغییر شکل هنگام قرار گرفتن در معرض یک محرک حرارتی به آن باز می‌گردند، به نمایش می‌گذارند. اکثر SMM های امروزی آلیاژهای حافظه شکل

بنابراین به عنوان یک ابزار تشخیصی مفید در مهندسی عمران و... نقش داشته باشند [11]. می‌توان از این ویژگی برای جبران نقص یا خسارت در سازه‌های متفاوت، مواد هوشمند تعبیه شده در آن‌ها را به روش مناسب فعال و ترمیم کرد. این پدیده اثر خود ترمیم کننده نامیده می‌شود [12].

در این پژوهش، پرکاربردترین دسته‌بندی مواد هوشمند بنا به نیازهای امروزی مهندسی، پزشکی و... در نظر گرفته شده و سپس هر یک از گروه‌ها به اختصار شرح داده شده‌اند. از مهم‌ترین بخش‌های قابل توجه در این زمینه از علم مواد هوشمند معرفی نقاط ضعف و قوت هر کدام از آن‌ها می‌باشد. همچنین آنچه در این مقاله باید به آن توجه کامل داشت توانایی ترکیب هر یک از این گروه از مواد با حفظ توانایی‌های ذاتی خودشان است که این بدان معناست با تلفیق این مجموعه از توانایی‌های ذاتی امکان تولید تجهیزات مهندسی ساز هوشمند با ویژگی‌های کاملاً منحصر به فرد وجود داشته باشد.

۲ تعریف کلی مواد هوشمند

گرچه به طور گسترده‌ای در ادبیات فنی و همچنین مطبوعات مشهور مورد بحث قرار گرفته است، اما تعریف دقیقاً موادی که "هوشمند" هستند، وجود ندارد. بسیاری معتقدند که اینها موادی هستند که برخی محرک‌ها را از محیط خارجی حس می‌کنند و پاسخی مناسبی ایجاد می‌کنند اما این عملکرد شامل مواد سنجش متداولی مانند پیزوالکتریک یا ترکیبات مغناطیسی است که چندین نویسنده آن‌ها را "هوشمند" طبقه‌بندی می‌کنند [13]. با این حال، مورد قابل توجه در این دست پدیده‌ها در نظر گرفتن پاسخ است تا خود ماده. برخی محققان استدلال می‌کنند که موادی به عنوان مواد هوشمند فی نفسه وجود ندارد بلکه فقط موادی هستند که خصوصیات ذاتی خاصی را به نمایش می‌گذارند که می‌تواند در محصولات، سیستم‌ها یا سازه‌هایی مورد استفاده

جدول ۱: دسته‌بندی برخی از خواص مواد هوشمند بر طبق عملکرد و کاربردشان [20].

نام‌گذاری	نحوه عملکرد	وضعیت کنونی
تغییر شکل دهنده (Shape-changing)	تغییر شکل در پاسخ به محرک خارجی	بکارگیری شده در صنایع
خود محرک (Self-actuating)	تحریک خودکار در پاسخ به محرک خارجی	مرحله تحقیق
خود سنجشی (Self-sensing)	تشخیص خودکار تغییرات محرک های خارجی	بکارگیری شده در صنایع و همچنین مورد توجه تحقیقات بیشتر
خود تشخیصی (Self-diagnostic)	تشخیص خودکار نقص در ساختار (روکش‌ها، خرابی‌های و...)	مرحله تحقیق
خود ترمیم شونده (Self-healing)	ترمیم خودکار آسیب های خارجی	بکارگرفته شده (به طور محدود) در برخی از محصولات و همچنین موضوع تحقیقات بیشتر

(SMA^۲) هستند که بر پایه مواد نیتروژن-تیتانیوم بوده و عناصر تشکیل دهنده مواد و محل کشف اصلی، در سازمان نیروی دریایی ایالات متحده ساخته شده است [17,18]. SMAها به طور گسترده‌ای در اشکال مختلف فیزیکی در دسترس هستند و تقریباً ۲۰ آلیاژ مختلف دوتایی، سه تایی یا حتی چهارگانه شناخته شده‌اند که اثر حافظه شکل را به نمایش می‌گذارند. اولین کاربردها در اواخر دهه ۱۹۶۰ گزارش شدند [19]. رفتار حافظه SMA ناشی از تحول فاز آستنیت^۳ به مارتنسایت^۴ ناشی از دما است که گاهی اوقات به عنوان تحول مارتنزیتی گرمانرم شناخته می‌شود [20,21]. تغییر شکل حاصل از بازیابی شکل نتیجه نیاز شبکه بلوری به حفظ حداقل حالت انرژی در دمای معین است، توانایی که برخی SMAها برای بازیابی در یک تنظیم از پیش تعیین شده قرار می‌گیرند. شکل گرمایش بالاتر از دمای تحول و بازگشت به حالت دیگر در خنک‌سازی به عنوان اثر حافظه شکل دو طرفه شناخته می‌شود. علاوه بر محرک‌های حرارتی، برخی از SMAها در معرض میدان‌های مغناطیسی تغییر شکل می‌دهند: آلیاژهای حافظه شکل فرومغناطیسی، که در MIT^۵ در سال ۱۹۹۶ کشف شد [22].

آن‌ها می‌توانند دو یا گاهی سه شکل را حفظ کنند. همچنین در سال ۲۰۱۳، سرمایه‌های حافظه شکل توسط گروهی در MIT گزارش شده است [24]. همچنین توانایی خود تحریک شونده این دسته از مواد هوشمند از نگاه ساختاری برای تغییر شکل یکسان و مشابه است و شامل استفاده از موادی است که در پاسخ به محرک خارجی، فشار یا جابجایی قابل توجهی ایجاد می‌کنند. این فناوری در مرحله تحقیق باقی مانده و کامپوزیت‌های حاوی عناصر پیزوالکتریک، عناصر مغناطیسی، SMA و مایعات الکترو رئولوژیکی نمونه‌هایی از مواد آزمایشی هستند که این خاصیت را به نمایش می‌گذارند. در نهایت امید است که اجزا و سازه‌هایی ساخته شوند که در صورت تحریکات الکتریکی، حرارتی یا مکانیکی بتوانند جابجایی‌های زیادی ایجاد کنند. اگرچه خود محرک نیست، اما از SMA در محرک‌های خطی و چرخشی استفاده شده است [25]. چندین فن‌آوری خود ترمیمی در مرحله تحقیق نشان داده شده است و همچنین برخی از آن‌ها در مرحله تجاری سازی اولیه می‌باشند. بیشتر آن‌ها به منظور ترمیم آسیب‌های وارد شده به مواد کامپوزیتی یا پوشش‌هایی با ویژگی خود ترمیمی به طور کاملاً خودکار می‌باشند [26]. این فن‌آوری نوین توسط گروهی از دانشگاه Illinois at Urbana-Champaign صورت گرفت که

^۲ shape-memory alloy

^۳ Austenite: به عنوان آهن فاز گاما (γ-Fe) شناخته می‌شود، یک آلوتروپ فازی، غیر مغناطیسی از آهن یا یک محلول جامد از آهن، با یک عنصر آلیاژی است.

^۴ Martensite: یک شکل بسیار سخت از ساختار کریستالی فولاد است.

^۵ Massachusetts Institute of Technology

شیمیایی حساس هستند. این گروه از مواد می‌توانند واکنش‌های مختلف خود ترمیم را شروع کنند یا تغییر رنگ را نشان می‌دهند که نشان دهنده آسیب مکانیکی است، که به بیانی ساده‌تر جزو دسته مواد هوشمند خود تشخیص دهنده می‌باشند. در نهایت، مکانیوفورها می‌توانند مواد پلیمری را با قابلیت‌های مختلف از سنجش آسیب تا خود ترمیم کامل احیا کنند [28,29]. پلیمرهای دیگری در حال تولید هستند که می‌توانند از طریق قرار گرفتن در معرض نور ماورا UV^v بنفش ترمیم شوند. بتن خود ترمیم شونده توجهات زیادی را به خود جلب می‌کند که یکی از این رویکردهای شامل ترکیب SMP است، این در حالیست که مطالعات دیگری بر مبنای رزین‌های اپوکسی، سیانوآکریلات‌ها و محلول‌های قلیایی-سیلیس است. مواد خود تشخیصی مواردی هستند که می‌توانند تنش‌ها، بارها و سایر عوامل تحمیل شده بر آن‌ها را درک و در برخی موارد ترمیم کنند [30,31].

بیشتر فن‌آوری‌های خودآزمایی شامل ترکیب عناصر حسی در یک ماده یا ساختار است و فیبرهای نوری به طور گسترده‌ای بررسی شده‌اند و می‌توانند متغیرهایی مانند تنش، فشار، لرزش، ضربه، خوردگی را تشخیص دهند. همچنین با تغییرات دما و یا تکنیک‌های دیگر، برخی آرایه‌های مواد پیزوالکتریک نوین برای شناسایی متغیرهای مشابه استفاده می‌کنند و همچنین اشباع ماده‌ای با اجزای رسانا مانند الیاف کربن یا نانوذرات که مقاومت در برابر فشار یا بار را تغییر می‌دهند که به طور گسترده‌ای بررسی شده است. بیشتر تحولات شامل انواع رفتار هوشمندانه این تجهیزات می‌تواند با استفاده از آرایه‌های عناصر هوشمند اضافه شده به آن‌ها مورد سنجش و نهایتاً تعبیه شده باشد، ترکیب مواد سنجش خود به خودی در مواد دیگر یا اصطلاحاً "پوسته‌های سنجشی" که می‌تواند برای پوشش یک ترکیب یا کامپوزیت استفاده شود، حاصل شود. فناوری خود سنجی می‌تواند به طور

شامل یک ترکیب اپوکسی است که از میکروکپسول‌های حاوی یک ماده هوشمند ترمیم کننده استفاده می‌کند. وقتی ترک به میکروکپسول می‌رسد، کپسول شکسته شده و مونومرهای فعال آن به داخل ماده اصلی می‌ریزد، جایی که می‌تواند عمل پلیمریزاسیون آغاز شده و شروع به ترمیم کند (شکل ۱) [12].

این فناوری برای جلوگیری از خوردگی لایه‌های زیرین فلز، می‌باشد که روی آن پوشش‌های خود ترمیم شونده اعمال می‌شود که با توجه به دامنه کاربردی وسیع آن به سرعت تجاری‌سازی شده است (شکل ۲). این فناوری میکروکپسول را می‌توان با پوشش‌های مبتنی بر الاستومرها و مواد حرارتی و همچنین با پوشش‌های پودری استفاده کرد. رویکرد دیگری که به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است، شامل استفاده از الیاف یا مویرگ‌های شیشه‌ای در یک ماده ترکیبی و پر کردن شبکه متخلخل حاصل از آن با یک مونومر است. وقتی آسیب مانند ترک ایجاد می‌شود، مونومر آزاد می‌شود و کپسول‌های لوله‌ای شکل حاوی ماده مونومر نیز ترک می‌خورند و این با ماده اصلی مخلوط شده و باعث ترمیم آسیب می‌شود. بسیاری از تکنیک‌های خود ترمیمی دیگر در حال توسعه است، از جمله شبکه‌های ریز عروقی مانند سه بعدی حاوی عوامل بهبودی که منبع تجدیدپذیر ماده را فراهم می‌کنند و بنابراین امکان بهبود مکرر حوادث شکستگی را فراهم می‌کنند و به طور قابل توجهی عمر مفید مواد را افزایش می‌دهد. یک پیشرفت جذاب در زمینه کشف مواد هوشمند که دارای توانایی‌های جذاب شامل یک کامپوزیت ورودی و فیبرکربن است که به انرژی اثر القا خسارت وارد شده متکی است [27]، به بیانی دیگر ضربه با سرعت متوسط، و انرژی دریافت شده در اثر آن برای بهبود مواد خسارت دیده کافیست.

تکنیک دیگری که باعث جلب توجه روز افزون می‌شود شامل پلیمرهایی با مکانیوفورها^۶ است که از نظر مکانیکی به گروه‌های

Ultraviolet ^v

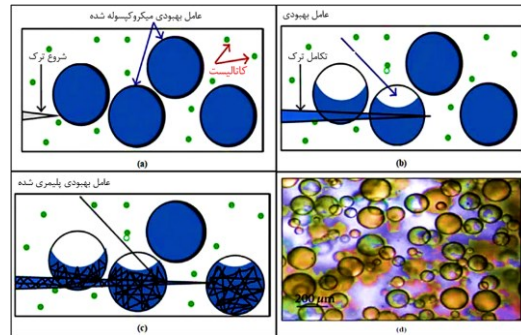
^۶ Mechanophores (MPs): دسته‌ای از مواد واکنش پذیر محرک هستند که به دلیل کاربردهای بالقوه آنها به عنوان سنسورهای تنش، مورد توجه مهندسان قرار می‌گیرند.

و به این وسیله در پوسته تجهیزات در تماس بکار گرفته می‌شوند [36,37]. با استفاده از پیکسل‌های متشکل از آرایه‌هایی از LED^۹ های نانوسیم / p-GaN کوچک شده n-ZnO، نور ایجاد می‌کند. این آرایه‌ها می‌توانند تغییرات فشار به اندازه ۱۰ کیلو پاسکال را تشخیص دهند، که شبیه ضربه آرام با انگشت است و می‌تواند در صفحه‌های لمسی، رباتیک و تصویربرداری بیولوژیکی استفاده شوند [36].

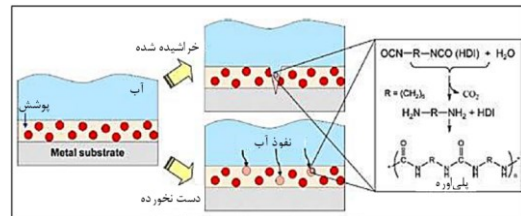
۴ انواع

این مواد با یک یا چند خاصیت می‌توانند به طور کنترل شده توسط محرک‌های خارجی به طور قابل توجهی تغییر کنند. بنابراین این ماده دارای سنسورهای داخلی، محرک‌ها و مکانیزم‌های کنترلی است که به وسیله آنها قادر است محرک را حس کند، در یک زمان کوتاه یا مناسب به آن به شیوه و میزان از پیش تعیین شده پاسخ دهد و به محض حذف محرک به حالت اولیه خود بازگردند. انواع مختلفی از مواد هوشمند موجود است و در زیر به برخی از آنها پرداخته می‌شود. مواد پیزوالکتریک نمونه بسیار متداولی از این نوع مواد است که در هنگام اعمال تنش ولتاژ تولید می‌کند. از آنجا که این اثر به صورت معکوس نیز اعمال می‌شود، ولتاژ روی نمونه باعث ایجاد تنش در داخل نمونه می‌شود. بنابراین می‌توان سازه‌های مناسب طراحی شده از این مواد را ساخت که هنگام اعمال ولتاژ خم، منبسط یا منقبض می‌شوند. همچنین می‌توان از آنها در دستگاه‌های ردیابی نوری، هد مغناطیسی، چاپگرهای ماتریس نقطه‌ای، صفحه کلیدهای رایانه، بلندگوهای استریو با فرکانس بالا، شتاب سنج‌ها، تلفن‌های میکرو، سنسورهای فشار، مبدل‌ها و احتراق‌های کوره‌های گاز استفاده کرد. مواد واکنش گرما، یا آلیاژهای حافظه شکل (SMA) یا پلیمرهای حافظه شکل، موادی

بالموه طیف وسیعی از پدیده‌های حسی را که باعث ایجاد جریان الکتریکی یا سایر موارد می‌شود، مورد بهره برداری قرار دهد [32].



شکل ۱: شماتیک خود ترمیم شونده‌گی مبتنی بر میکروکپسول در مواد هوشمند اضافه شده به برخی کامپوزیت‌ها [12].



شکل ۲: مکانیسم ضد خوردگی و خود ترمیم شونده‌گی، قابل استفاده بر روی فلزات [12].

سنسورهای نوری فایبر براگ (FBG^۸) که دسته‌ای از سنسورهای فایبرنوری توزیع شده هستند، مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. از آنجا که فیبرها می‌توانند به راحتی در کامپوزیت‌ها، الاستومرها و پلیمرها ترکیب شوند، مورد توجه واقع شده‌اند [33]. روش‌هایی از این قبیل مواد مورد توجه جامعه تحقیقاتی قرار گرفته‌اند و علاوه بر استفاده از سنسورهای FBG، که شاید گسترده‌ترین رویکرد مورد مطالعه باشد، اخیراً نمونه‌های اولیه‌ای در انستیتوی فناوری جورجیا ساخته شده که از اصطلاح "اثر پیزوفوترونیک" استفاده می‌کنند

^۹ light-emitting diode

^۸ Fiber Bragg grating : نوعی بازتابنده توزیع شده براگ است که در یک قسمت کوتاه از فیبر نوری ساخته شده و طول موج‌های خاصی از نور را منعکس کرده و بقیه را انتقال می‌دهد.

بسیار متداول نمایشگرهای کریستال مایع است. به همین ترتیب، مواد فتوکرومیک، که در پاسخ به نور تغییر رنگ می‌دهند. این را می‌توان در عینک‌های حساس به نور مشاهده کرد که هنگام قرار گرفتن در معرض نور شدید خورشید تیره می‌شوند. همچنین رنگ‌های خاصی مانند رنگ‌های اوروکروم و فوتوکرومیک که به ترتیب با گرم شدن و در معرض نور تغییر رنگ می‌دهند [39]. ژل‌های پلیمری مانند هیدروژل‌ها دارای پیوند عرضی هستند که ساختار پلیمری با یک حلال مانند آب باد شده است. ژل به دلیل تغییرات کوچک، به عنوان مثال، در اثر تغییرات محیطی دما یا pH توانایی تورم یا کوچک شدن (تا ۱۰۰۰ برابر حجم) را دارد [40].

۵ طبقه بندی

مواد هوشمند همچنین می‌توانند به دو دسته فعال یا غیرفعال طبقه بندی شوند [2]. مواد هوشمند فعال به عنوان موادی تعریف می‌شوند که توانایی استفاده از خصوصیات هندسی هستند یا به بیانی ساده تر مواد تحت میدان‌های الکتریکی، حرارتی یا مغناطیسی دارای تغییراتی ظاهری یا ساختاری (بطور موقت) هستند. یا بطور کلی دارای یک ظرفیت ذاتی برای تولید انرژی هستند. مواد پیزوالکتریک، SMA، های مایعات الکتروپولویک و مواد مغناطیسی منجمد کننده به عنوان مواد هوشمند فعال در نظر گرفته می‌شوند و بنابراین می‌توانند به عنوان مبدل نیرو و محرک‌ها استفاده شوند [41]. علاوه بر این SMA نیروی بازایی بزرگی دارد، به طور منظم ۷۰۰ مگاپاسکال (۱۰۵ psi)، که می‌تواند برای محرک استفاده شود. به همین ترتیب مواد پیزوالکتریک، که انرژی الکتریکی را به نیروی مکانیکی تبدیل می‌کنند، نیز "فعال" شناخته می‌شوند. از طرفی، به مواد غیرفعال، مواد هوشمند منفعل گفته می‌شود. اگرچه هوشمند هستند، اما فاقد قابلیت ذاتی برای تولید انرژی هستند. مواد فیبر نوری نمونه خوبی از یک ماده هوشمند منفعل هستند. چنین موادی می‌توانند به عنوان سنسور عمل کنند اما به عنوان محرک یا مبدل عمل نمی‌کنند [42].

هستند که می‌توانند اشکال مختلف را در دماهای مختلف نگه دارند که با حرارت دادن، تغییر شکل داده و به شکل اولیه خود برگردند. در واقع درون این مواد خاص فرآیندی رخ می‌دهد که در صورت تغییر دما محیط درون آنها یک نیروی محرک ایجاد می‌شود. آلیاژ حافظه دار در واقع مواد هوشمندی هستند که شامل عناصری چون، نیتینول، آلیاژ نیکل و تیتانیوم هستند که مشابه فولاد ضد زنگ دارای مقاومت در برابر خوردگی می‌باشند، به همین دلیل برای کاربردهای بیومکانیکی بسیار مفید هستند [37]. از این نوع مواد می‌توان در ترموستات تجهیزات قهوه ساز، قاب عینک فوق العاده الاستیک، انواع فنر یا استنت برای عروق داخلی استفاده کرد، در حالی که پلیمر حافظه شکل توانایی گرم شدن شکل اولیه خود را دارد. اینها به طور کلی در بخیه های جراحی قابل تجزیه که به طور خودکار در فشار صحیح محکم می‌شوند و همچنین در ترمیم بدنه اتومبیل که پس از فرورفتگی با حرارت ملایم، به شکل اولیه خود باز می‌گردند، استفاده می‌شود. علاوه بر این خواص برخی مواد هوشمند مانند مواد تولید کننده انرژی الکترو مغناطیسی مشابه پیزوالکتریک‌ها، فقط به میدان‌های مغناطیسی پاسخ می‌دهند. از برق آنها به طور معمول در مبدل‌های سونار با فرکانس پایین، قدرت بالا، موتورهای و محرک‌های هیدرولیکی، همراه با آلیاژ حافظه شکل نیتینول، مواد محدود کننده مگنتو کاندیدهای امیدوار کننده در نظر گرفته می‌شوند و همچنین به منظور دستیابی به میرایی فعال ارتعاشات میتوان از این گونه مواد به عنوان سنسور های حساس به تغییرات مکانیکی محیطی استفاده نمود [38].

مواد حساس به PH موادی هستند که در نتیجه تغییر اسیدیته تغییر رنگ می‌دهند. این می‌تواند برای رنگ‌هایی که می‌توانند تغییر رنگ دهند تا نشان دهنده خوردگی در فلز زیر آنها باشد، قابل استفاده است.

سیستم‌های کروموژنیک در پاسخ به تغییرات الکتریکی، نوری یا حرارتی تغییر رنگ می‌دهند. اینها شامل الکتروکرومیک هستند که رنگ آنها تغییر می‌کند برای مثال کدورت در اثر اعمال ولتاژ نمونه

۶ برنامه‌های کاربردی

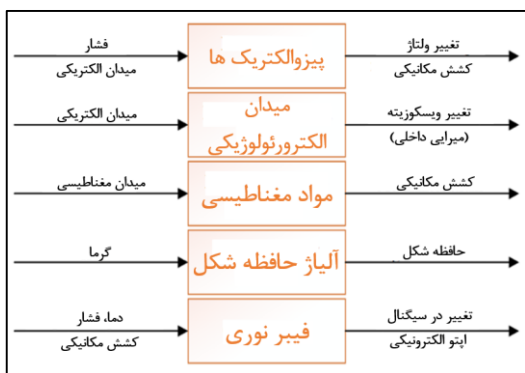
مواد هوشمند به دلیل پاسخ متنوع به محرک‌های خارجی، طیف وسیعی از برنامه‌ها را پیدا می‌کنند. مناطق مختلف کاربرد می‌تواند در زندگی روزمره ما باشد، هوا و فضا، برنامه‌های مهندسی عمران و مکترونیک تنها چند مورد از جمله کاربردهای این دسته از مواد به شمار می‌آیند. دامنه کاربرد مواد هوشمند شامل حل مشکلات مهندسی با کارایی غیرقابل انجام است و فرصتی را برای ایجاد محصولات جدید ایجاد می‌کند. ویژگی مهم مربوط به مواد و ساختارهای هوشمند این است که آن‌ها همه زمینه‌های علمی و مهندسی را در بر می‌گیرند. تا آنجا که به کاربردهای فنی مواد هوشمند مربوط می‌شود، شامل مواد کامپوزیتی جایگزین شده با فیبر نوری، محرک‌ها، حسگرها، سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی (MEMS^{۱۰})، کنترل ارتعاش، کنترل صدا، کنترل شکل، سلامت محصول یا نظارت بر طول عمر، نظارت بر درمان، پردازش هوشمند، کنترل‌های فعال و غیرفعال، خود ترمیمی (ترمیم خود به خودی)، اندام‌های مصنوعی، دستگاه‌های جدید نشانگر، آهن‌ربا‌های طراحی شده برای شرایط نامناسب (حرارت بالا و...)، پایداری الاستیک هوا و توزیع تنش در اجسام و سازه‌های مهندسی عمران از جمله این موارد می‌باشند [43].

ساختارهای هوشمند در خودروها، سیستم‌های فضایی، هواپیماهای با بال ثابت و چرخشی، شناورهای دریایی، سازه‌های مدنی، ابزارآلات، وسایل تفریحی و پزشکی یافت می‌شود. نوع مواد با پسوند "هوشمندی" نشان داده شده توسط این مواد به طور کلی با ترکیب مواد غیر هوشمند موجب ظهور ویژگی‌هایی شامل، پردازش خاص، معرفی نقص یا با اصلاح ساختار خرد می‌باشند. بنابراین برای انطباق با سطوح مختلف محرک در یک محیط کنترل شده روشی مناسب و هوشمند می‌باشد. همچنین مانند ساختارهای هوشمند، اصطلاحات «هوشمند و نیمه هوشمند» به جای هم برای مواد هوشمند استفاده می‌شود [41]. مواد هوشمند

را به عنوان موادی تعریف می‌کنند که در بهترین شرایط به تغییرات محیطی پاسخ می‌دهند و عملکردهای خود را با توجه به محیط نشان می‌دهند. عملکردهای بازخورد در داخل مواد با خصوصیات و عملکردهای مواد ترکیب می‌شوند. سیستم‌های هوشمند نیز محیط خود را حس می‌کنند و پاسخ می‌دهند، اما از یک ماده ساخته نمی‌شوند. آنها ممکن است از مواد هوشمندی استفاده کنند، اما می‌توانند با استفاده از فناوری سنتی نیز ساخته شوند. ضربان سازها یک سیستم هوشمند طراحی شده برای پاسخ به ضربان قلب نامنظم با یک ضربه الکتریکی است که آن را تنظیم می‌کند.

وردان و همکاری‌های گزارش دادند که سیستم هوشمند به دستگاہی اطلاق می‌شود که می‌تواند تغییراتی را در محیط خود احساس کند و می‌تواند با تغییر در خصوصیات ماده، هندسه شکل، پاسخ مکانیکی یا الکترومغناطیسی، پاسخی بهینه ایجاد کند. عملکرد سنسور و محرک با بازخورد مناسب خود باید به درستی ادغام شوند. طبق این تحقیقات، سیستم می‌تواند کاربرد خود را از دست بدهد یا اگر پاسخ خیلی کند یا خیلی سریع باشد، می‌تواند خطرناک باشد (شکل ۳).

برخی مواد و سیستم‌های هوشمند کاربردهای گسترده‌ای دارند که این مواد هوشمند متداول و پاسخ محرک مرتبط شان در شکل ۴ ذکر شده است [44].



شکل ۴: مواد هوشمند متداول و پاسخ محرک مرتبط با عملکرد آن‌ها.

۱-۱- نظارت بر سلامت ساختاری

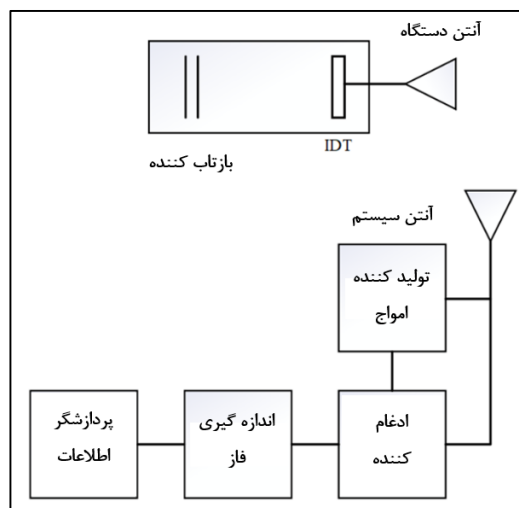
تعبیه حسگرها در داخل سازه‌ها برای نظارت بر تنش و آسیب می‌تواند هزینه‌های نگهداری را کاهش داده و طول عمر را افزایش دهد. این در حال حاضر در بیش از چهل پل در سراسر جهان استفاده می‌شود [48,49].

۲-۱- خود ترمیم شونده‌ها

یک روش در توسعه مقاومت مواد و سازه‌ها شامل جاسازی لوله‌های نازک حاوی رزین پخته نشده در مواد است. هنگامی که آسیب وارد می‌شود، این لوله‌ها می‌شکنند و در نتیجه رزین در معرض واکنش قرار می‌گیرد که هرگونه آسیب توسط آن ترمیم بشود. ترمیم خود به خودی می‌تواند در محیط‌های غیرقابل دسترسی مانند زیر آب یا فضا حیاتی باشد [50,51].

۳-۱- در زمینه دفاع و هواضا

امروزه مواد هوشمندی برای سرکوب ارتعاشات و تغییر شکل در پره‌های روتور هلیکوپتر تولید شده است. دستگاه‌های دارای آلیاژ-



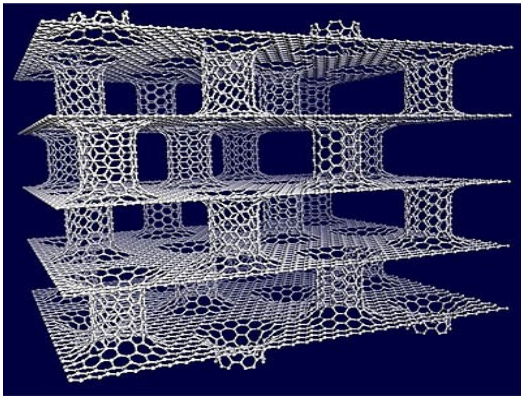
شکل ۳: شماتیکی از یک سیستم سنسور خوانش از راه دور همراه با سنسور غیرفعال SAW^{۱۱} [44].

سرمایه گذاری در تحقیق و توسعه توسط عواملی مانند قانون، کاهش ضایعات و تقاضا برای کیفیت بالاتر زندگی انجام می‌شود. سازه‌هایی مانند ساختمان‌ها، پل‌ها، خطوط لوله، کشتی‌ها و هواپیماها باید به دقت طراحی شده و به طور منظم مورد بازرسی قرار گیرند تا از آسیب "ساییدگی" در برابر خرابی‌های فاجعه بار جلوگیری شود که البته در این نوع از تجهیزات بازرسی گران و وقت گیر است، در حالی که طراحی برای جلوگیری از آسیب می‌تواند باعث کاهش ضریب توانایی و یا عملکرد کلی سیستم بشود. با برخی از مواد مدرن، آسیب می‌تواند از نظر داخلی جدی باشد درحالی که شواهد سطحی بسیار کم و گاهی غیر قابل ردیابی می‌باشند [45].

Surface acoustic wave ^{۱۱}

۱-۵- مهندسی سازه

این مواد همچنین در زمینه مهندسی سازه کاربرد دارند. از آن‌ها برای نظارت بر سازه‌های مهندسی عمران برای ارزیابی دوام آن‌ها استفاده می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶: ساختار مولکولی بتن هوشمند (بکار گرفته شده در پل‌ها، سد ها و...) که توسط نانو لوله‌های کربنی استحکام بیشتری پیدا کرده‌اند [55].

این تنها مخصوص به موادی دارای توانایی سنجش هستند نمی‌باشد، بلکه موادیکه با محیط اطراف خود مانند توانایی حرکت، لرزش و نشان دادن پاسخ‌های مختلف دیگر سازگار می‌شوند را نیز شامل می‌باشد. کاربردهای این مواد سازگار شامل توانایی کنترل شکل الاستیک بال هواپیما برای کاهش کشش و بهبود کارایی عملیاتی، برای کنترل ارتعاش ساختارهای سبک ماهواره‌ها می‌باشد، همچنین ساختارهای هوشمند در حال توسعه‌ای هستند تا یکپارچگی ساختاری را در هواپیماها و یا تجهیزات فضایی کنترل کنند. تلاش شده است تا برخی از مواد پیزوالکتریک برای کاهش سر و صدای تهویه مطبوع بررسی شود. علاوه بر این، در ایمنی سازه‌های مهندسی، این مواد برای نظارت بر یکپارچگی پل‌ها، سدها، برج‌های حفاری نفت در دریا که در آن سنسورهای فیبر نوری جاسازی شده در سازه‌ها برای شناسایی مناطق مشکل استفاده می‌شود [56].

حافظه شکل نیز در حال تولید هستند که توانایی دستیابی به شکست سریع امواج گرداب زیردریایی‌ها را دارند و به همین ترتیب سطوح کنترل انطباقی مختلفی برای بال‌های هواپیما تولید می‌شود (شکل ۵). علاوه بر این، تحقیق حاضر در حال تمرکز بر روی فناوری‌های کنترل جدید برای مواد هوشمند و روش‌های طراحی برای قرار دادن سنسورها و محرک‌ها است [52,53].



شکل ۵: نمونه یک هواپیمای ساخته شده با مواد هوشمند که در صورت آسیب دیدن قادر به ترمیم و بازگشت به شکل قبلی خود (خود ترمیم شونده) می‌باشد [52].

۱-۴- صنایع هسته‌ای

فناوری و مواد هوشمند فرصت‌های جدیدی را در بخش صنعت هسته‌ای برای افزایش ایمنی، کاهش در معرض خطر قرار گرفتن اشخاص، کاهش هزینه چرخه زندگی و بهبود عملکرد تولید ایجاد می‌کند. با این حال، محیط‌های تابشی مرتبط با عملیات هسته‌ای یک چالش منحصر به فرد برای آزمایش، صلاحیت و استفاده از مواد هوشمند است. این در حالیست که، استفاده از چنین مواد هوشمندی در تأسیسات هسته‌ای نیاز به دانش در مورد پاسخ مواد به تابش و چگونگی این امر دارد پاسخ تحت تأثیر دوز تابش قرار می‌گیرد [54,55].

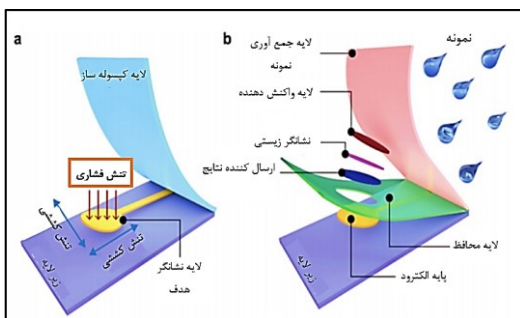
۱-۶- برنامه‌های زیست پزشکی

در زمینه پزشکی پزشکی و تشخیص پزشکی، هنوز تحقیقات در حال انجام است. مواد خاصی مانند ژل‌های پلی الکترولیت برای کاربردهای عضلانی مصنوعی در حال آزمایش هستند، جایی که یک ماتریس پلیمری با یک حلال متورم می‌شود که در صورت قرار گرفتن در معرض یک میدان الکتریکی یا تحریک دیگر می‌تواند منبسط یا منقبض شود. علاوه بر این، به دلیل تجزیه بیولوژیکی این مواد، ممکن است آن را به عنوان یک سیستم انتقال دارو مفید باشد [57].

تولیدکنندگان اکنون با استفاده از مواد هوشمند به دنبال راه‌هایی برای افزایش عمر محصول با بسته بندی هستند. با طی شدن زمان بیشتری از تاریخ تولید غذا، واکنش‌های شیمیایی درون بسته بندی اتفاق می‌افتد و باکتری‌ها جمع می‌شوند. برچسب‌های هوشمند ساخته شده است که تغییر رنگ می‌دهد تا نشان دهنده وجود افزایش سطح یک ماده شیمیایی یا باکتری در آن باشد. دمای ذخیره سازی تأثیر بسیار بیشتری نسبت به زمان در تخریب بیشتر محصولات دارد. برخی از شرکت‌ها "شاخص‌های دمای زمان" را ایجاد کرده‌اند که با سرعت وابسته به دما تغییر رنگ می‌دهند [59].

۱-۷- کاهش ضایعات

در سراسر جهان، زباله‌های الکترونیکی یکی از معمول اجزای تشکیل دهنده زباله‌های خانگی هستند. در حین دفع و فرآوری چنین زباله‌هایی، خطرناک و ابتدا مواد قابل بازیافت باید برداشته شوند. جدا کردن دستی گران و وقت گیر است اما استفاده از مواد هوشمند می‌تواند به خودکار سازی روند کمک کند. به تازگی از اتصال دهنده‌های ساخته شده از مواد حافظه شکل استفاده شده است که می‌توانند با حرارت دادن خود در آزاد شدنشان کمک کنند. به محض آزاد شدن اتصال دهنده‌ها، اجزای سازنده می‌توانند به راحتی با تکان دادن محصول جدا شوند. با استفاده از اتصال دهنده‌هایی که به دماهای مختلف واکنش نشان می‌دهند، می‌توان محصولات را به راحتی جدا کرد تا مواد به صورت خودکار مرتب شوند [58].



شکل ۱۰: ساختار کلی یک سنسور سنجش سلامت که از روی هم قرار گیری چند ماده هوشمند حساس به مواد شیمیایی تشکیل شده است. در این شکل (a) انتقال دهنده عرق روی پوست به سنسورها و (b) سنسور های حساس به مواد شیمیایی می‌باشند [60].

۱-۸- کاهش ضایعات مواد غذایی

غذا حداکثر زباله را در بین سایر مواد غذایی تشکیل می‌دهد. بیشتر غذاهایی که برای مصرف تولید می‌شوند، به دلیل انقضا آنها بدون مصرف دور ریخته می‌شوند. این تاریخ‌ها تخمین محافظه کاری است و ممکن است عمر واقعی محصول بیشتر باشد. همچنین

با این حال، بدن انسان یک محیط خصمانه است که در این شرایط حسگرها به راحتی آسیب می‌بینند. برخی از تحقیقات در مورد مواد محافظ از این سنسورها محافظت می‌کند. همچنین، امروزه

۲- نتیجه گیری

بسیاری از مشکلات مطرح در جهان می‌تواند با بکارگیری مواد و سیستم‌های هوشمند تسهیل و یا حل شوند. همچنین سیستم‌های ساخته شده از ترکیبی از مواد هوشمند توانایی ارائه خدماتی بهتر (و یا حتی بیشتر) از قبل به مشتریان خود هستند. به عنوان مثالخانه های هوشمند توسط محققان برای افراد مبتلا به زوال عقلی ساخته شده است که از حسگرهایی برای نظارت بر رفتار و اطمینان از امنیت ساکنین استفاده می‌کند. و همچنین در مواردی استفاده از مواد هوشمند به منظور راحت تر شدن دسترسی و یا رابط کاربری می‌شود که به نوبه خود پیشرفتی در جهت استفاده بهینه در فضای اشغال شده توسط تجهیزات گوناگون به طور روزمره خواهند بود.

مراجع

- [1] [1] G. Song, V. Sethi, and H.-N. Li, "Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: A review," *Eng. Struct.*, vol. 28, no. 11, pp. 1513-1524, 2006.
- [2] [2] V. Giurgiutiu, "Review of smart-materials actuation solutions for aeroelastic and vibration control," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 11, no. 7, pp. 525-544, 2000.
- [3] [3] R. Yoshida, "Self-oscillating gels driven by the Belousov-Zhabotinsky reaction as novel smart materials," *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 31, pp. 3463-3483, 2010.
- [4] [4] W. L. Suchanek and R. Riman, "Intelligent synthesis of smart ceramic materials," in *Smart Materials*, CRC Press, 2008, pp. 1-2.
- [5] [5] X. Qiu and S. Hu, "'Smart' materials based on cellulose: a review of the preparations, properties, and applications," *Materials (Basel)*, vol. 6, no. 3, pp. 738-781, 2013.
- [6] [6] B. Sim, H. S. Chae, and H. J. Choi, "Fabrication of polyaniline coated iron oxide hybrid particles and their dual stimuli-response under electric and magnetic fields," *Express Polym. Lett.*, vol. 9, no. 8, 2015.

شرکت‌های مختلفی در حال تولید کاشت‌های ارتوپدی هوشمند مانند صفحات شکستگی هستند که می‌توانند استخوان‌ها را ترمیم کنند و اطلاعات را به جراح مربوطه منتقل می‌کنند (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: ساخت نمونه آزمایشی ایمپلنت (خود ترمیم کننده) استخوان همراه با سنسور سنجش میزان پیشرفت ترمیم بافت استخوانی [63].

آزمایش های بالینی در مقیاس کوچک این نوع ایمپلنت ها موفقیت آمیز بوده است و می‌تواند طی پنج سال آینده در دسترس باشد. سایر تجهیزات احتمالی شامل اتصالات تعویضی است که هنگام شل شدن و یا در صورت وجود عفونت با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. فناوری فعلی پاسخ این دستگاه‌ها را به انتقال داده محدود می‌کند اما در آینده، این مواد می‌توانند مستقیماً با سفت کردن خود و یا آزاد کردن آنتی بیوتیک‌ها پاسخ دهنده شرایط جدید باشند [60,61].

۱-۱- کمک به جمعیت سالخورده

هم اکنون تقریباً در بیشتر کشور های پیشرفته تعداد افراد بالای ۶۰ سال بیش از کودکان هستند و این بازار جدیدی را برای محصولات ایجاد می‌کند که زندگی را برای سالمندان آسان می‌کند [62,63].

- [21] [21] S. J. Mazlouman, A. Mahanfar, C. Menon, and R. G. Vaughan, "A review of mechanically reconfigurable antennas using smart material actuators," in Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2011, pp. 1076–1079.
- [22] [22] H. T. Banks and A. J. Kurdila, "Hysteretic control influence operators representing smart material actuators: Identification and approximation," in Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control, 1996, vol. 4, pp. 3711–3716.
- [23] [23] Y. Yang, Y. Chen, Y. Li, M. Z. Q. Chen, and Y. Wei, "Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material," *Soft Robot.*, vol. 4, no. 2, pp. 147–162, 2017.
- [24] [24] A. Lai, Z. Du, C. L. Gan, and C. A. Schuh, "Shape memory and superelastic ceramics at small scales," *Science (80-.)*, vol. 341, no. 6153, pp. 1505–1508, 2013.
- [25] [25] F. K. Straub, "A feasibility study of using smart materials for rotor control," *Smart Mater. Struct.*, vol. 5, no. 1, p. 1, 1996.
- [26] [26] K. Markowski, K. Wojakowski, E. Pokropek, and M. Marzęcki, "Numerical and Experimental Performance Analysis of the Chirped Fiber Bragg Grating Based Abrasion Sensor for the Maintenance Applications in the Industry 4.0," *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 770, 2020.
- [27] [27] C. Sonnenfeld et al., "Microstructured optical fiber sensors embedded in a laminate composite for smart material applications," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2566–2579, 2011.
- [28] [28] J. Y. Jo, H. G. Jang, Y. C. Jung, D. C. Lee, and J. Kim, "Revealing the Dependence of Molecular-Level Force Transfer and Distribution on Polymer Cross-Link Density via Mechanophores," *ACS Macro Lett.*, vol. 8, no. 8, pp. 882–887, 2019.
- [29] [29] T. Kosuge et al., "Multicolor Mechanochromism of a Polymer/Silica Composite with Dual Distinct Mechanophores," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 141, no. 5, pp. 1898–1902, 2019.
- [30] [30] J. M. Korde and B. Kandasubramanian, "Biocompatible alkyl cyanoacrylates and their derivatives as bio-adhesives," *Biomater. Sci.*, vol. 6, no. 7, pp. 1691–1711, 2018.
- [31] [31] C. Joseph, A. D. Jefferson, and M. B. Cantoni, "Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials," in First international conference on self-healing materials, 2007, pp. 1–8.
- [7] [7] K. Worden, W. A. Bullough, and J. Haywood, *Smart technologies*. World Scientific, 2003.
- [8] [8] H. Nian et al., "Tetraphenylethene-based tetracationic dicyclophanes: synthesis, mechanochromic luminescence, and photochemical reactions," *Chem. Commun.*, vol. 56, no. 21, pp. 3195–3198, 2020.
- [9] [9] W. Voit, T. Ware, and K. Gall, "Radiation crosslinked shape-memory polymers," *Polymer (Guildf)*, vol. 51, no. 15, pp. 3551–3559, 2010.
- [10] [10] B. E. N. WADA, "Adaptive structures," in 30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1989, p. 1160.
- [11] [11] R. C. Smith, *Smart material systems: model development*. SIAM, 2005.
- [12] [12] R. Bogue, "Smart materials: a review of recent developments," *Assem. Autom.*, 2012.
- [13] [13] B. Aissa, N. K. Memon, A. Ali, and M. K. Khraisheh, "Recent progress in the growth and applications of graphene as a smart material: A review," *Front. Mater.*, vol. 2, p. 58, 2015.
- [14] [14] C. A. Rogers, *Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues: Selected Papers Presented at the US Army Research Office Workshop on Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 2406*, vol. 276. CRC, 1989.
- [15] [15] M. Maheshwari, V. G. M. Annamdas, J. H. L. Pang, A. Asundi, and S. C. Tjin, "Crack monitoring using multiple smart materials; fiber-optic sensors & piezo sensors," *Int. J. Smart Nano Mater.*, vol. 8, no. 1, pp. 41–55, 2017.
- [16] [16] J. Gardan, "Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–18, 2019.
- [17] [17] T. Duerig, D. Stoeckel, and D. Johnson, "SMA: smart materials for medical applications," in *European Workshop on Smart Structures in Engineering and Technology*, 2003, vol. 4763, pp. 7–15.
- [18] [18] M. G. Faulkner, J. J. Amalraj, and A. Bhattacharyya, "Experimental determination of thermal and electrical properties of Ni-Ti shape memory wires," *Smart Mater. Struct.*, vol. 9, no. 5, p. 632, 2000.
- [19] [19] S. Seelecke and C. Busked, "Optimal control of beam structures by shape memory wires," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 31, 1970.
- [20] [20] R. Bogue, "Smart materials: A review of capabilities and applications," *Assem. Autom.*, 2014.

- [45] [45] J. N. Schoess, "Conductive polymer sensor arrays: A new approach for structural health monitoring," in *Advanced Nondestructive Evaluation for Structural and Biological Health Monitoring*, 2001, vol. 4335, pp. 9–19.
- [46] [46] M. Barbosh, P. Singh, and A. Sadhu, "Empirical mode decomposition and its variants: a review with applications in structural health monitoring," *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 9, p. 93001, 2020.
- [47] [47] I. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov, and D. Shi, "A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring," *Smart Mater. Struct.*, vol. 15, no. 3, p. 737, 2006.
- [48] [48] J. Oliveira, V. Correia, H. Castro, P. Martins, and S. Lanceros-Mendez, "Polymer-based smart materials by printing technologies: Improving application and integration," *Addit. Manuf.*, vol. 21, pp. 269–283, 2018.
- [49] [49] G. F. Zhao and W. N. Di, "Application Perspective of Environmentally Responsive Materials in the Downhole Operation," in *Materials Science Forum*, 2020, vol. 993, pp. 799–805.
- [50] [50] T. D. Dao, N. S. Ha, N. S. Goo, and W.-R. Yu, "Design, fabrication, and bending test of shape memory polymer composite hinges for space deployable structures," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 29, no. 8, pp. 1560–1574, 2018.
- [51] [51] A. A. Basheer, "Advances in the smart materials applications in the aerospace industries," *Aircr. Eng. Aersp. Technol.*, 2020.
- [52] [52] A. Golshahr, E. Natarajan, M. S. Santhosh, R. Sasikumar, S. Ramesh, and R. Durairaj, "Multiwall carbon nanotube reinforced silicone for aerospace applications," *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 8, no. 4, pp. 743–752, 2018.
- [53] [53] H. Zhao, A. Gachagan, G. Dobie, and T. Lardner, "Wavelet analysis of poorly-focused ultrasonic signal of pressure tube inspection in nuclear industry," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1949, no. 1, p. 170004.
- [54] [54] İ. N. QADER, K. Ö. K. Mediha, F. DAGDELEN, and Y. AYDOĞDU, "A review of smart materials: researches and applications," *El-Cezeri J. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 755–788, 2019.
- [55] [55] V. Parvaneh and S. H. Khiabani, "Mechanical and piezoresistive properties of self-sensing smart concretes reinforced by carbon nanotubes," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 26, no. 11, pp. 993–1000, 2019.
- [32] [32] D. Li, Q. He, and J. Li, "Smart core/shell nanocomposites: intelligent polymers modified gold nanoparticles," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 149, no. 1–2, pp. 28–38, 2009.
- [33] [33] R. Ramly, W. Kuntjoro, and M. K. A. Rahman, "Using embedded fiber Bragg grating (FBG) sensors in smart aircraft structure materials," *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 600–606, 2012.
- [34] [34] S. Duan, J. Wu, J. Xia, and W. Lei, "Innovation Strategy Selection Facilitates High-Performance Flexible Piezoelectric Sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2820, 2020.
- [35] [35] B. N. Sahoo, B. Choi, J. Seo, and T. Lee, "Hybrid functional microfibers for textile electronics and biosensors," *J. Semicond.*, vol. 39, no. 1, p. 11009, 2018.
- [36] [36] F. Luan, B. Gu, A. S. L. Gomes, K.-T. Yong, S. Wen, and P. N. Prasad, "Lasing in nanocomposite random media," *Nano Today*, vol. 10, no. 2, pp. 168–192, 2015.
- [37] [37] K. R. C. Gisser et al., "Nickel-Titanium Memory Metal: A "Smart" Material Exhibiting a Solid-State Phase Change and Superelasticity," *J. Chem. Educ.*, vol. 71, no. 4, p. 334, 1994.
- [38] [38] T. Chan et al., "Use of FBG optical sensors for structural health monitoring: Practical application," in *Australian Conference on Optical Fibre Technology: Bragg Gratings, Poling and Photosensitivity (30th)*, 2005, pp. 1–3.
- [39] [39] Y. Yu and T. Ikeda, "Photodeformable polymers: A new kind of promising smart material for micro-and nano-applications," *Macromol. Chem. Phys.*, vol. 206, no. 17, pp. 1705–1708, 2005.
- [40] [40] J. Kopeček, "Swell gels," *Nature*, vol. 417, no. 6887, pp. 389–391, 2002.
- [41] [41] I. Kang et al., "Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 37, no. 6, pp. 382–394, 2006.
- [42] [42] K. N. Melton, "General applications of SMA's and smart materials," *Shape Mem. Mater.*, pp. 220–239, 1998.
- [43] [43] N. Jackson, L. Keeney, and A. Mathewson, "Flexible-CMOS and biocompatible piezoelectric AlN material for MEMS applications," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 11, p. 115033, 2013.
- [44] [44] V. K. Varadan and V. V. Varadan, "Microsensors, microelectromechanical systems (MEMS), and electronics for smart structures and systems," *Smart Mater. Struct.*, vol. 9, no. 6, p. 953, 2000.

- Applications of smart materials in drug delivery and tissue engineering," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 102, pp. 589–605, 2019.
- [62] [62] K. W. Shah and W. Li, "A review on catalytic nanomaterials for volatile organic compounds VOC removal and their applications for healthy buildings," *Nanomaterials*, vol. 9, no. 6, p. 910, 2019.
- [63] [63] P. Rizzo, "A review on the latest advancements in the non-invasive evaluation/monitoring of dental and trans-femoral implants," *Biomed. Eng. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 83–102, 2020.
- [64] [64] T. C. Callari, L. Moody, P. Magee, and D. Yang, "Smart—not only intelligent! Co-creating priorities and design direction for 'smart' footwear to support independent ageing," *Int. J. Fash. Des. Technol. Educ.*, vol. 12, no. 3, pp. 313–324, 2019.
- [65] [65] A. S. Lah, P. Fajfar, G. Kugler, and T. Rijavec, "A NiTi alloy weft knitted fabric for smart firefighting clothing," *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 6, p. 65014, 2019.
- [56] [56] S. G. Farag, "Application of smart structural system for smart sustainable cities," in 2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), 2019, pp. 1–5.
- [57] [57] M. Cianchetti, C. Laschi, A. Menciassi, and P. Dario, "Biomedical applications of soft robotics," *Nat. Rev. Mater.*, vol. 3, no. 6, pp. 143–153, 2018.
- [58] [58] E. Lemaire, C. Ayela, and A. Atli, "Eco-friendly materials for large area piezoelectronics: self-oriented Rochelle salt in wood," *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 2, p. 25005, 2018.
- [59] [59] I. Safarik, E. Baldikova, J. Prochazkova, M. Safarikova, and K. Pospiskova, "Magnetically modified agricultural and food waste: preparation and application," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 66, no. 11, pp. 2538–2552, 2018.
- [60] [60] Y. Gao, L. Yu, J. C. Yeo, and C. T. Lim, "Flexible hybrid sensors for health monitoring: materials and mechanisms to render wearability," *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 15, p. 1902133, 2020.
- [61] [61] M. Sponchioni, U. C. Palmiero, and D. Moscatelli, "Thermo-responsive polymers: