



بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

# مواد هوشمند

و کاربردهای آن در رشته‌های  
مختلف علوم و مهندسی

دکتر حمید رضا اشرفی

عضو هیئت علمی دانشگاه رازی

مهندس علیرضا پولادخان

کارشناس ارشد مهندسی سازه

مؤلفین:

سرشناسه	: اشرفی، حمیدرضا، ۱۳۳۶ -
عنوان و نام پدیدآور	: مواد هوشمند و کاربردهای آن در رشته‌های مختلف علوم و مهندسی / مولف حمیدرضا اشرفی، علیرضا پولادخان.
مشخصات نشر	: تهران : نوآور، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۲۱۶ ص.: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۱۷۵-۲
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
موضوع	: مواد هوشمند -- راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع	: نانوتکنولوژی -- راهنمای آموزشی (عالی)
شناسه افزوده	: پولادخان، علیرضا، ۱۳۵۹ -
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۲۱۰.
یادداشت	: نمایه.
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ ۱۵۹ هـ / ۴۱۸/۹ TA
رده بندی دیویی	: ۰۴۴/۷۲۱۰۷
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۴۵۳۷۹۵

### مواد هوشمند و کاربردهای آن در رشته‌های مختلف علوم و مهندسی

مؤلفین:	دکتر حمیدرضا اشرفی - مهندس علیرضا پولادخان
ناشر:	نوآور
شمارگان:	۱۰۰۰ نسخه
ناظر چاپ:	محمدرضا نصیرنیا
نوبت چاپ:	
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۱۷۵-۲



### نمایشگاه دائمی و مرکز فروش:

نوآور: تهران - خ انقلاب، خ فخررازی، خ شهدای ژاندارمری نرسیده به خ دانشگاه

ساختمان ایرانیان، پلاک ۵۸، طبقه دوم، واحد ۶

۹۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

[www.noavarpub.com](http://www.noavarpub.com)

فروشگاه ۱: تهران خ انقلاب، نبش خ ۱۲ فروردین پلاک ۱۳۱۰، کتابفروشی الیاس تلفن: ۶۶۹۵۵۸۷۸ - ۶۶۴۰۵۰۸۴

فروشگاه ۲: تهران خ انقلاب، مقابل دانشگاه تهران، جنب بانک ملت، پلاک ۱۲۱۲، کتابفروشی گوتنبرگ تلفن: ۶۶۴۱۳۹۹۸ - ۶۶۴۰۲۵۷۹

فروشگاه ۳: تهران خ انقلاب، بین خ ۱۲ فروردین و اردیبهشت، پلاک ۱۳۱۲، کتابفروشی صانعی تلفن: ۶۶۴۰۹۹۲۴ - ۶۶۴۰۵۳۸۵

فروشگاه ۴: اصفهان، م انقلاب، خ چهار باغ عباسی ابتدای خ سید علی خان، کتابفروشی مهرگان تلفن: ۰۳۱۱۲۳۱۳۷۵۱

فروشگاه ۵: تبریز، خ امام، فلکه دانشگاه، اول خ دانشگاه، کتابفروشی علامه تلفن: ۰۴۱۱۳۳۴۱۶۶۹ - ۰۴۱۱۳۳۴۱۹۸۶

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلفان و مصنفان مصوب سال ۱۳۴۸ برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلق به نشر نوآور می‌باشد. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب (از قبیل هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، عکس برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به صورت اینترنتی، سی دی، دی وی، فیلم فایل صوتی یا تصویری و غیره) بدون اجازه کتبی از نشر نوآور ممنوع بوده و شرعاً حرام است و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

## فهرست فصول

- فصل اول: مبانی و تعاریف مواد و سیستم‌های هوشمند
- فصل دوم: مفاهیم پایه‌ای
- فصل سوم: انواع مواد هوشمند از نظر مبانی و مکانیسم
- فصل چهارم: انواع مواد هوشمند از نظر عملکرد
- فصل پنجم: مواد پیزوالکتریک
- فصل ششم: مواد الکتروستریکتیو
- فصل هفتم: آلیاژهای حافظه‌دار
- فصل هشتم: مواد هوشمند کرومیک
- فصل نهم: مواد هوشمند نوری
- فصل دهم: سیالات هوشمند
- فصل یازدهم: نانومواد هوشمند
- فصل دوازدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی شیمی، مهندسی مواد، و محیط زیست
- فصل سیزدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر، و رباتیک
- فصل چهاردهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی مکانیک
- فصل پانزدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی هوافضا
- فصل شانزدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی عمران
- فصل هفدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی پزشکی

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

## فهرست مطالب

مقدمه

### فصل اول: مبانی و تعاریف مواد و سیستم‌های هوشمند

- ۱-۱ مواد و سیستم‌های هوشمند
- ۲-۱ مواد پیزوالکتریک یا کهربا فشار
- ۳-۱ میزبان
- ۴-۱ کاپلینگ
- ۵-۱ مکاستراکترونیک
- ۶-۱ هوش مصنوعی
- ۱-۶-۱ تاریخچه هوش مصنوعی
- ۲-۶-۱ آزمون تورینگ
- ۳-۶-۱ تعریف و طبیعت هوش مصنوعی
- ۴-۶-۱ فلسفه هوش مصنوعی
- ۵-۶-۱ اتاق چینی
- ۶-۶-۱ تکنیک‌ها و زبان‌های برنامه‌نویسی هوش مصنوعی
- ۷-۶-۱ عامل‌های هوشمند
- ۸-۶-۱ سیستم‌های خبره
- ۷-۱ تعریف و عملکرد مواد هوشمند
- ۸-۱ مواد هوشمند و سازه‌های هوشمند

### فصل دوم: مفاهیم پایه‌ای

- ۱-۲ قُطْبُش یا پُلاریزاسیون
- ۲-۲ مدار فیدبک
- ۳-۲ نیمه‌هادی‌ها یا نیمه‌رساناها
- ۱-۳-۲ انواع نیمه‌رساناها
- ۲-۳-۲ عناصر نیمه‌رسانا
- ۳-۳-۲ ساخت ادوات الکترونیکی به وسیله نیمه‌رساناها
- ۴-۲ اسیلوسکوپ
- ۱-۴-۲ قسمتهای مختلف اسیلوسکوپ
- ۲-۴-۲ مولد مبنای زمان

۲-۴-۳ مدارهای اصلی اسیلوسکوپ

۲-۵ الکترون

۲-۶ بار الکتریکی

۲-۶-۱ نتایج آزمایش فرانکلین

۲-۶-۲ بررسی کمی نیروی موجود میان بارهای الکتریکی

۲-۶-۳ کاربرد نیروهای الکتریکی بین اجسام باردار

۲-۷ جریان الکتریکی

۲-۸ جریان و آمپر

۲-۹ ولتاژ و ولت

۲-۱۰ مقاومت

۲-۱۱ مدار الکتریکی

۲-۱۲ اتصالی در یک مدار، یا اتصال کوتاه

۲-۱۳ میدان الکتریکی

۲-۱۳-۱ مشخصات میدان الکتریکی

۲-۱۳-۲ خطوط نیرو، یا خطوط میدان الکتریکی

۲-۱۴ شار الکتریکی

۲-۱۴-۱ رابطه شار با میدان الکتریکی

۲-۱۴-۲ یکای شار الکتریکی

۲-۱۴-۳ شار الکتریکی و قانون گاوس در الکتروستاتیک

فصل سوم: انواع مواد هوشمند از نظر مبانی و مکانیسم

۳-۱ انواع مواد هوشمند

۳-۲ انواع مواد هوشمند گروه اول

۳-۳ انواع مواد هوشمند گروه دو

فصل چهارم: انواع مواد هوشمند از نظر عملکرد

۴-۱ سنسورها یا حسگرها

۴-۱-۱ تعریف سنسور

۴-۱-۲ کاربرد سنسورها

۴-۱-۳ سنسورهای بدون تماس

۴-۱-۴ سنسورهای القایی

۴-۱-۵ سنسورهای مادون قرمز منفعل یا پسیو

۴-۱-۶ سنسورهای بیوالکتریک یا زیست حسگرها

- ۲-۴ عمل‌کننده‌ها یا محرک‌ها  
 ۱-۲-۴ هدف از اندازه‌گیری  
 ۲-۲-۴ کنترل  
 ۳-۲-۴ انواع عملگر (عمل‌کننده)  
 ۳-۴ آشنایی با سیستم‌های هیدرولیک و نیوماتیک  
 ۴-۴ پردازشگرها و ریزپردازشگرها  
 ۱-۴-۴ واحد پردازش مرکزی  
 ۲-۴-۴ ترانزیستورهای گسسته و مدارات مجتمع (واحد پردازش مرکزی)  
 ۳-۴-۴ ریزپردازنده

### فصل پنجم: مواد پیزوالکتریک

- ۱-۵ تاریخچه مواد پیزوالکتریک  
 ۲-۵ کرنش مکانیکی  
 ۳-۵ چگالی شار الکتریکی  
 ۴-۵ مکانیسم رفتار کاپلینگ الکترومکانیکی  
 ۵-۵ معادلات ساختاری سه بعدی  
 ۶-۵ شرایط مرزی الکتریکی و مکانیکی  
 ۱-۶-۵ شرط مرزی اتصال کوتاه  
 ۲-۶-۵ شرط مرزی مدار باز  
 ۷-۵ به کار اندازنده‌های انباشته پیزوالکتریک  
 ۸-۵ ترانسفورماتور (مبدل)های خم‌کننده پیزوالکتریک  
 ۹-۵ کاربردها، مزایا و معایب مواد پیزوالکتریک  
 ۱۰-۵ مقدمه‌ای بر سیستم‌های یک درجه آزادی  
 ۱۱-۵ معادله حرکت سیستم "جرم-فنر-میراگر"  
 ۱۲-۵ معادله دینامیکی حرکت سیستم "جرم-فنر-میراگر-پیزوالکتریک"  
 ۱۳-۵ کاپلینگ الکترومکانیکی-سختی متغیر  
 ۱-۱۳-۵ حالت اتصال کوتاه  
 ۲-۱۳-۵ حالت مدار باز  
 ۱۴-۵ مقاومت موازی پیزوالکتریک برای اتلاف انرژی  
 ۱۵-۵ جمع‌بند

### فصل ششم: مواد الکتروستریکتیو

- ۱-۶ مقدمه  
 ۲-۶ کاپلینگ الکترومکانیکی در مواد الکتروستریکتیو

- ۳-۶ پاسخ خطی شده در مواد الکتروستریکتیو
- ۴-۶ پلیمرهای با کرنش زیاد در مواد الکتروستریکتیو
- ۵-۶ جمع‌بندی مواد الکتروستریکتیو

#### فصل هفتم: آلیاژهای حافظه‌دار

- ۱-۷ مقدمه
- ۲-۷ تاریخچه مختصر آلیاژهای حافظه‌دار
- ۳-۷ بیشترین آلیاژهای حافظه‌دار شناخته شده
- ۴-۷ بررسی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار
- ۵-۷ استحاله‌های فازی در آلیاژهای حافظه‌دار
- ۶-۷ رابطه مکانیک و دما در آلیاژهای حافظه‌دار

#### فصل هشتم: مواد هوشمند کرومیک

- ۱-۸ مواد کرومیک
- ۲-۸ مواد فتوکرومیک
- ۳-۸ مواد ترموکرومیک
- ۴-۸ مواد مکانوکرومیک و کیموکرومیک
- ۵-۸ مواد الکتروکرومیک

#### فصل نهم: مواد هوشمند نوری

- ۱-۹ شیشه‌های هوشمند
- ۲-۹ مواد لومینسانس
- ۳-۹ مواد فتولتائیک

#### فصل دهم: سیالات هوشمند

- ۱-۱۰ مفهوم سیال
- ۲-۱۰ لزجت یا ویسکوزیته یا گراندروی
- ۳-۱۰ قانون لزجت نیوتن
- ۴-۱۰ انواع سیالات
- ۵-۱۰ سیالات نیوتنی
- ۶-۱۰ سیالات غیرنیوتنی
- ۷-۱۰ سیالات الکتریکی - رئولوژیکی (ER)
- ۸-۱۰ سیالات مغناطیسی - رئولوژیکی (MR)

#### فصل یازدهم: نانومواد هوشمند

- ۱-۱۱ نانو چیست؟
- ۲-۱۱ فناوری نانو چیست؟
- ۳-۱۱ مزایای فن آوری نانو
- ۴-۱۱ زمینه‌های کاربردی فن آوری نانو
- ۵-۱۱ نانو حسگرها
- ۶-۱۱ انواع نانو حسگرها
- ۱-۶-۱۱ استفاده از نقاط کوانتومی در تولید نانو حسگرها
- ۲-۶-۱۱ استفاده از نانولوله‌ها در تولید نانو حسگرها
- ۳-۶-۱۱ استفاده از نانو ابزارها در تولید نانو حسگرها
- ۷-۱۱ نانو حسگرها و کنترل آلودگی هوا
- ۸-۱۱ مبارزه با انتشار گازهای سمی
- ۹-۱۱ جذابیّت‌های نانو حسگرها
- ۱۰-۱۱ نانو پوشش‌های هوشمند
- ۱-۱۰-۱۱ نانو پوشش‌های هوشمند ضد خوردگی
- ۲-۱۰-۱۱ نانو پوشش‌های ضد رادار
- ۳-۱۰-۱۱ نانو پوشش‌های هوشمند تصفیه‌کننده هوا

#### فصل دوازدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی شیمی، مهندسی مواد، و محیط زیست

- ۱-۱۲ مصالح خودترمیم
- ۲-۱۲ مواد هالوکرومیک
- ۳-۱۲ سیستم‌های کروموزنیک
- ۴-۱۲ مواد ترموالکتریک (دمابرقی)
- ۵-۱۲ مواد ترومیک
- ۶-۱۲ پلیمرهای هادی
- ۷-۱۲ ژل‌های پلیمری
- ۸-۱۲ پلیمرهای حسّاس به pH
- ۹-۱۲ الاستومرهای دی‌الکتریک

- #### فصل سیزدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر، و رباتیک
- ۱-۱۳ استفاده از مواد هوشمند در رباتیک و سیستم‌های میکرو-الکترو-مکانیکی
  - ۲-۱۳ روش بهتر تولید برق از منابع گرمایی
  - ۳-۱۳ مواد فروالکتریک

#### فصل چهاردهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی مکانیک



- ۱-۱۴ نگاهی به نقش مواد ترموالکتریک در کاهش سوخت خودروها  
۲-۱۴ بهبود راندمان  
۳-۱۴ تلفیق دو راهکار  
۴-۱۴ تئوری در مرحله اجرا  
۵-۱۴ مدل یک ماشین لباسشویی بهینه شده با بکارگیری مواد ترموالکتریک

### فصل پانزدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی هوافضا

- ۱-۱۵ استفاده از مواد هوشمند در صنایع هوافضا  
۲-۱۵ جمع‌بندی

### فصل شانزدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی عمران

- ۱-۱۶ مقدمه  
۲-۱۶ استفاده از مواد هوشمند در سازه‌ها  
۳-۱۶ بتن خودترمیم‌شونده  
۱-۳-۱۶ کلیات  
۲-۳-۱۶ آزمایش‌ها  
۳-۳-۱۶ نحوه عملکرد  
۴-۱۶ سیمان‌های هوشمند  
۵-۱۶ بتن‌های هوشمند  
۱-۵-۱۶ بتن‌های هوشمند جلوگیری‌کننده از یخ زدگی  
۲-۵-۱۶ بتن‌های هوشمند واکنش‌دهنده در برابر تغییرات  
۳-۵-۱۶ بتن‌های هوشمند گرمازا  
۶-۱۶ مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان، و کاربردهای آن در مهندسی عمران  
۱-۶-۱۶ کلیات  
۲-۶-۱۶ انواع مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان  
۳-۶-۱۶ تأثیر به کاراندازنده‌ها  
۴-۶-۱۶ تأثیر سنسورها  
۵-۶-۱۶ مطالعه و بررسی خُلل و فُرَج در سازه‌های بتنی، و اثر خصوصیات مواد مرکب پیزوالکتریک بر روی آن‌ها  
۶-۶-۱۶ رابطه بین حجم سرامیک و تخلخل، در سرامیک‌های مرکب پیزوالکتریک  
۷-۶-۱۶ رابطه بین حجم سرامیک و مقاومت فشاری، در سرامیک‌های مرکب پیزوالکتریک

۱۶-۶-۸ رابطه بین حجم سرامیک و دی‌الکتریسیته، در سرامیک‌های مرکب  
پیزوالکتریک

۱۶-۶-۹ پارامترهای وابسته به قطبش، در پیزوالکتریک‌های مرکب بر پایه سیمان... ۱۸۴  
۱۶-۶-۱۰ دما

۱۶-۶-۱۱ شدت میدان الکتریکی

۱۶-۶-۱۲ تأثیر شدت میدان الکتریکی (E) بر روی کرنش پیزوالکتریک (d33) در  
فرآیند قطبش

۱۶-۶-۱۳ تأثیر زمان قطبش (t) بر روی کرنش پیزوالکتریک (d33)

۱۶-۶-۱۴ تأثیر دمای قطبش (T) بر روی کرنش پیزوالکتریک (d33)

۱۶-۶-۱۵ اثر اندازه ذرات پیزوالکتریک بر روی خصوصیات دی‌الکتریسیته و  
ضریب کرنش پیزوالکتریسیته در مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان

۱۶-۷ کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در مهندسی عمران

۱۶-۸ کاربرد مواد هوشمند در پل‌ها

۱۶-۹ ماده SMA، به عنوان یک ماده جایگزین مناسب برای فولاد

۱۶-۱۰ مدل‌سازی مواد هوشمند SMA در مهندسی سازه

۱۶-۱۱ اهمیت استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در اتصالات سازه‌ها

۱۶-۱۲ عملکرد آلیاژهای حافظه‌دار

۱۶-۱۳ جزئیات اتصالات هوشمند

۱۶-۱۴ مدل‌سازی اتصال

### فصل هفدهم: کاربردهای مواد هوشمند در مهندسی پزشکی

۱۷-۱ مقدمه‌ای بر آلیاژهای حافظه‌دار

۱۷-۲ کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار در مهندسی پزشکی

۱۷-۳ خواص حافظه‌داری و شبه‌الاستیسیته

۱۷-۴ استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در سیم‌های راهنما

۱۷-۵ استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار ASDOS برای آب‌بندی حفره بین دو بطن قلب

۱۷-۶ استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در ارتودونسی، ارتوپدی، و ساخت قاب عینکها

فهرست مراجع

فهرست موضوعی (نمایه)



## مقدمه

مطالعه و بررسی مواد هوشمند و سیستم‌های هوشمند، یکی از شاخه‌های جدید علمی است. این مواد در حال حاضر گستره وسیعی پیدا کرده و دامنه کاربرد آن‌ها روزبه‌روز گسترده شده و دامنه‌های هر چه جدیدتری را در برخواهد گرفت.

هدف این کتاب ارائه اصول و مبانی و مفاهیم مواد هوشمند، و نیز کاربردهای آن در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی است.

در فصل اول، مبانی و تعاریف مواد و سیستم‌های هوشمند ارائه شده است، و خواننده با مطالعه آن آشنایی کلی و مقدماتی و پایه‌ای با این نوع مواد پیدا خواهد کرد.

خواننده برای آشنایی با مواد هوشمند نیازمند دارا بودن اطلاعات عمومی علمی و مهندسی در مورد برخی از مفاهیم و زمینه‌ها است. به منظور جامع بودن و خودکفا بودن کتاب، در فصل دوم کتاب به این مفاهیم پرداخته شده است. از جمله این مفاهیم عبارتند از: قطبش یا پلاریزاسیون، مدار فیدبک، نیمه هادی‌ها، اسیلوسکوپ، بار الکتریکی، جریان الکتریکی، میدان الکتریکی، و شار الکتریکی.

در فصل‌های سوم و چهارم، انواع مواد هوشمند به ترتیب از نظر مبانی و مکانیسم، و نیز عملکرد شرح داده شده است.

در فصل‌های پنجم تا یازدهم، مبانی و مفاهیم و روابط انواع مواد هوشمند به تفصیل شرح داده شده است. این مواد عبارتند از: مواد پیزوالکتریک، مواد الکتروستریکتیو، آلیاژهای حافظه‌دار، مواد هوشمند کرومیک، مواد هوشمند نوری، سیالات هوشمند، و نانو مواد هوشمند. در فصل‌های دوازدهم تا هفدهم نیز کاربردهای مواد هوشمند در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی به تفصیل شرح داده شده‌اند. این شاخه‌های علوم و مهندسی عبارتند از: مهندسی شیمی، مهندسی مواد، محیط زیست، مهندسی برق، مهندسی کامپیوتر و رباتیک، مهندسی مکانیک، مهندسی هوا فضا، مهندسی عمران، و مهندسی پزشکی.

این کتاب می‌تواند به عنوان یک کتاب درسی و مرجع و پایه برای کلیه اساتید و دانشجویان رشته‌های مختلف علوم و مهندسی، که می‌خواهند در زمینه مواد هوشمند تدریس، تحصیل و یا پژوهش نمایند به خوبی قابل استفاده باشد.

در خاتمه از همکاری‌های دوست گرامی جناب آقای نصیرنیا مدیریت محترم انتشارات نوآور، و نیز کلیه همکاران گرامی‌شان، بخاطر به تلاش‌های بی‌دریغ و مجدانه‌شان برای انتشار کتاب صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

حمیدرضا اشرفی - علیرضا پولاخان



نشر نوآور

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

## فصل اول

### مبانی و تعاریف مواد و سیستم‌های هوشمند

#### ۱-۱ مواد و سیستم‌های هوشمند

- در گفتمان روزمره، در بسیاری از مواقع از واژه "هوشمند"<sup>۱</sup> استفاده می‌کنیم. از جمله:
- برجسب یک فرآورده خوراکی، که هرگاه در دمای محیطی بسیار زیاد قرار گیرد رنگش تغییر می‌کند.
  - عینکی که در محیط بیرون از خانه، در آفتاب، مانند یک عینک آفتابی عمل می‌کند ولی در خانه به وضعیتی شیشه‌های روشن باز می‌گردد.
  - طناب یک کوهنورد، که هنگام تضعیف، تغییر رنگ می‌دهد.
  - رنگی که بر روی بال هواپیما، توزیع فشار آیرودینامیکی را نشان می‌دهد.
  - بزرگرایی که به طور خودکار بر آمد و شد خودروها نظارت می‌کند.
  - خانه‌هایی که با حسگر و کامپیوترهایش، دما، رطوبت، کیفیت هوا، نورپردازی و امنیت خانه را کنترل می‌کند.

مطالعه و بررسی مواد هوشمند<sup>۲</sup> و سیستم‌های هوشمند، یکی از شاخه‌های جدید علمی است. بعضی از این مواد هنگامی که تحت یک نیروی خارجی مثلاً کشش، تغییرات دمایی (گرما و سرما) و یا میدان الکتریکی قرار می‌گیرند از خود تغییراتی نشان می‌دهند. نوع دیگری از این مواد چنانچه تحت خمش یا کشش قرار گیرند سیگنال الکتریکی تولید می‌کنند. مواد هوشمند موادی هستند که می‌توانند بین چند محیط (دامنه) فیزیکی، وابستگی و ارتباط ایجاد کنند. در جدول ۱-۱ می‌توان چند محیط فیزیکی را مشاهده نمود.

۱. Smart

۲. Smart Materials

جدول ۱-۱- محیط‌های فیزیکی

دما	مکانیکی	الکتریکی	مغناطیسی
حرارت	تنش	میدان الکتریکی	میدان مغناطیسی
آنتالپی	کرنش	چگالی شار الکتریکی	چگالی شار مغناطیسی

به عنوان مثال، محیط مکانیکی شامل کمیت‌های تنش و کرنش است. همچنین، محیط الکتریکی شامل کمیت‌های میدان الکتریکی<sup>۱</sup> و چگالی شار الکتریکی<sup>۲</sup> (با نام تاریخی بردار جابجایی الکتریکی) می‌باشد.

با تعریف محیط‌های فیزیکی و کمیت‌های هر محیط می‌توان بین این محیط‌ها یک وابستگی ایجاد کرد. ارتباط بین محیط‌ها هنگامی صورت می‌گیرد که تغییر در کمیت یک محیط باعث تغییر کمیت در محیط دیگر گردد.

تغییر در دمای یک ماده، که جزء کمیت‌های دمایی می‌باشد، می‌تواند باعث ایجاد کرنش، که جزء کمیت‌های مکانیکی است، گردد. این نوع وابستگی را، که ناشی از وابستگی بین خصوصیات فیزیکی دما و مکانیکی می‌باشد، وابستگی ترمومکانیک می‌گویند.

در مواد الکترومکانیک (پیزوالکتریک) بین کمیت‌های الکتریکی<sup>۳</sup> (میدان الکتریکی و چگالی شار الکتریکی) و کمیت‌های مکانیکی<sup>۴</sup> (تنش و کرنش) یک وابستگی دوگانه وجود دارد، یعنی تغییر در کمیت‌های الکتریکی باعث تغییر در کمیت‌های مکانیکی می‌گردد و بر عکس.

چنانچه ماده‌ای مثل آلومینیوم را در نظر بگیریم و به آن بار مکانیکی اعمال کنیم، یک تغییر شکل در ماده ایجاد می‌گردد، اما چنانچه بار الکتریکی (ولتاژ) اعمال کنیم ماده هیچگونه تغییر شکلی از خود نشان نمی‌دهد. از این رفتار ماده درمی‌یابیم که این ماده هیچگونه وابستگی بین محیط‌های مختلف را ندارد و یک ماده معمولی و غیرهوشمند است.

برخی از تعریف‌های ابتدایی از درجات مختلف هوشمندی در سازه‌ها، در اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی ارائه شده است.

یک "سازه هوشمند غیرفعال"<sup>۵</sup> دارای یک سیستم ریزحسگر<sup>۶</sup> است که به طور یک پارچه با سازه ساخته شده است و از آن برای تشخیص وضعیت سازه استفاده می‌کنند.

۱. Electric Field

۲. Electric Flux Density

۳. Electric Variables

۴. Mechanic Variables

۵. Passive Smart Structure

۶. Micro Sensor

"سازه هوشمند واکنشی"<sup>۱</sup>، هم دارای سیستم ریزحسگر ساخته شده به طور یک پارچه با سازه و هم دارای یک سیستم به کار اندازنده<sup>۲</sup> است. اگر چه "سازه حسگر"<sup>۳</sup> نام مناسب تری برای سازه ای است که وضعیتش را فقط حس می کند، ولی عبارت سازه هوشمند برای این دسته از سازه ها به خوبی جا افتاده است.

"سازه تطبیقی هوشمند"<sup>۴</sup> دارای هر دو سیستم حسگری و به کار اندازنده است. اطلاعات جمع آوری شده توسط حسگرها و پردازش شده توسط ریز کنترل کننده<sup>۵</sup>، و منطق الگوریتم کنترلی آن، توسط سیستم به کار اندازنده، به منظور تغییر وضعیت سیستم سازه ای، به کار گرفته می شود.

سازه هایی به همراه حس کننده ها و به کار اندازنده های هوشمند که دارای یک قابلیت کنترلی برای ارائه یک رفتار خاص باشند، و یا سازه هایی به همراه حسگرها و به کار اندازنده های کاملاً توزیع شده در یک سیستم کنترلی فعال را می توان در نظر گرفت.

"سازه هوشمند آمیزش پذیر"<sup>۶</sup>، هر دوی سیستم های حسگری و به کار اندازی را (علاوه بر سیستم پردازشگر و منطق کنترلی) دارا است و قادر است از تجربیات گذشته اش درس بگیرد. یک سازه غیر بیولوژیکی، دارای یک هدف مشخص می باشد و وسایل و ابزار رسیدن به این هدف، طبق یک الگوی بیولوژیک است.

در این زمینه، یک سازه را می توان با اسکلت بدن انسان مقایسه کرد. براساس جدول ۱-۲، در واقع بدن انسان نوع بسیار پیشرفته ای از سازه هوشمند است که بشر به دنبال مدل سازی آن در سازه های طراحی شده توسط خود می باشد. اینکه فرض کنیم اسکلت بدن انسان به خودی خود توانایی بارهای وارد بر آن را دارد، تصور اشتباهی است. در واقع مجموعه ای از حسگرها و محرک ها (ماهچه ها و رباط ها) به اسکلت انسان متصل شده اند. بدون وجود این اتصالات، اسکلت بدن انسان فرو خواهد ریخت. بدن انسان یک سازه استاتیکی نیست. بسیاری از عملگرهای محرک مانند ماهیچه ها در بدن انسان قرار دارد که در نقاط حساس، نیروهایی را به اسکلت وارد کرده و با کوچکترین تغییر در ساختمان داخلی در برابر بارهای خارجی مقاومت می کنند.

ماهیچه ها با تغییر شکل خود به اسکلت انسان در تحمل بار کمک می کنند و با برداشته شدن

۱. Reactive Smart Structure  
 ۲. Active System  
 ۳. Structure Sensory  
 ۴. Smart Adaptive Structure  
 ۵. Micro Controller  
 ۶. Intelligent Structure

بار، به حالت اولیه بر می گردند. اگر چه وزن ماهیچه‌ها کم است اما در همه نقاط بدن پخش شده‌اند و همه آن‌ها با یک هماهنگی کنترل شده‌ای اسکلت را برای مقاومت در برابر بارهای خارجی مقاوم می‌سازند. این عمل ماهیچه‌ها رفتار هوشمندی است که ما در سازه‌های هوشمند به دنبال نوع ساده‌ای از آن هستیم.

سه جزء اصلی یک سازه فعال عبارتند از: سنسور یا حسگر، محرک، و پردازنده. شبکه‌های عصبی در بدن انسان، که نمونه ایده‌آل یک سازه فعال است، عمل حس کردن را انجام می‌دهد. مغز انسان، عملیات پردازش اطلاعات ورودی و صدور فرمان را برعهده دارد و ماهیچه‌ها به عنوان محرک عمل می‌کنند.

جدول ۱-۲- مقایسه سازه هوشمند و بدن انسان

بدن انسان	سازه هوشمند
ماهیچه	به کار اندازنده (محرک)
شبکه عصبی	سنسور
مغز	میکروکنترلر
غذا	منابع انرژی
دستگاه گوارش	قدرت

## ۱-۲ مواد پیزوالکتریک یا کهربا فشار

دسته‌ای از مواد هوشمند، که در فصول بعد بطور مفصل در مورد آن‌ها بحث خواهد شد، مواد پیزوالکتریک می‌باشند. این مواد، جزء مواد الکترومکانیک می‌باشند، یعنی در آن‌ها، بین محیط‌های مکانیکی و الکتریکی، یک وابستگی وجود دارد، و به عبارتی یک کاپلینگ<sup>۱</sup> الکترومکانیکی در این دسته از مواد موجود است. کلمه کهربا به معنای الکتریسیته و مرتبط با کلمه الکترون است. همان‌گونه که می‌دانیم، کهربا ماده‌ای است که بر اثر مالش به پارچه پشمی، باردار شده و خُرده‌های کوچک کاه را جذب می‌کند. این ربایش به علت نیرویی اتفاق می‌افتد که یونانیان آن را الکتریسیته نامیده‌اند.

## ۱-۳ میزبان

از واژه میزبان<sup>۲</sup> در سازه‌های هوشمند استفاده می‌شود. در حالت کلی، یک سازه

۱. Coupling

۲. Host



غیر هوشمند (غیرفعال) مانند یک صفحه الاستیک می‌تواند پذیرای دو لایه هوشمند، مثلاً دو لایه پیزوالکتریک، باشد. در این حالت، ورق الاستیک را به عنوان سازه میزبان می‌شناسیم که میزبان یک لایه به عنوان سنسور و یک لایه دیگر به عنوان محرک می‌باشد. همچنین می‌توان به عنوان مثال، به بازوی یک ربات اشاره نمود که توسط آلیاژهای حافظه‌دار (SMA) به‌طور هوشمند رفتار می‌کند. در این صورت، بازوی ربات را می‌توان به عنوان میزبان در نظر گرفت.

#### ۴-۱ کاپلینگ

واژه کاپلینگ، به معنای وابستگی و ارتباط متقابل بین محیط‌ها و کمیتهای مختلف فیزیکی است و اصطلاحی رایج در مواد و سازه‌های هوشمند می‌باشد. لذا، مواد هوشمند را براساس این واژه تعریف می‌کنیم. به عبارت دیگر، مواد هوشمند موادی هستند که یک ارتباط متقابل، مثلاً بین اثرات مکانیکی با اثرات الکتریکی، حرارتی و یا مغناطیسی دارند، که اصطلاحاً این ارتباط متقابل را کاپلینگ بین این اثرات می‌نامیم. به عنوان نمونه، مواد هوشمند پیزوالکتریک را می‌توان نام برد که جزء مواد الکترومکانیک می‌باشند، یعنی در آنها، بین محیط‌های مکانیکی و الکتریکی وابستگی وجود دارد. همچنین، آلیاژهای حافظه‌دار جزء مواد ترمومکانیک هستند، یعنی در این دسته از مواد، بین محیط‌های مکانیکی و حرارتی یک کاپلینگ و وابستگی برقرار است.

#### ۵-۱ مکاستراکترونیک

واژه مکاستراکترونیک<sup>۱</sup> در حقیقت ترکیبی از سه واژه مکانیک، استراکچر و الکترونیک است که به خوبی ماهیت این رشته از سازه‌های هوشمند را نشان می‌دهد. هم‌ارز این رشته در مهندسی برق و مکانیک، رشته میان رشته‌ای مکاترونیک<sup>۲</sup> می‌باشد.

۱. Mechastructronics

۲. Mechatronics