مقاله

# مواد پیزوالکتریک و کاربردهای متنوع آنها

سید علی واجدی
دانشجوی دکتری ریاضی فیزیک با تخصص علوم شبیه‌سازی ریاضی
دانشکدهٔ فیزیک تکنیکال
آکادمی علوم جمهوری تاجیکستان
s.ali.vajedi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۰۹

**چکیده**

در این مقاله مواد پیزوالکتریک و کاربردهای متنوع آنها در صنایع معرفی شده است. برای این منظور، نخست تاریخچهٔ مختصری از پیدایش مواد پیزوالکتریک و تحولات آن طی جنگ‌های جهانی اول و دوم مطرح می‌شود. سپس نمونه‌های متنوعی از مواد پیزوالکتریک، اعم از مواد طبیعی و ترکیبی معرفی و کاربردهای هر یک به اجمال تشریح می‌شود. در ادامه، حسگرها، مبدل‌ها[۱] و عملگرهای پیزوالکتریک[۲] معرفی و کاربردهای آنها در صنایع گوناگون تبیین می‌شود. در پایان، افق‌های فراروی این دسته از مواد پرکاربرد در دنیای فناورمحور امروز تشریح و فرصت‌های استفاده از این مواد به اجمال تشریح می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** مواد پیزوالکتریک، حسگر، عملگر، مبدل پیزوالکتریک، اثر مستقیم پیزوالکتریک، اثر معکوس پیزوالکتریک

## ۱. مقدمه

پیزوالکتریک[۳] یا اثر فشاربرقی [۱] اصطلاحاً به ویژگی خاصی اطلاق می‌شود که در پاره‌ای از مواد بلورین، سرامیک‌های خاص و زیست‌موادی چون استخوان، رشته‌های دی. ان. ای.[۴] و پروتئین‌های گوناگون وجود دارد [۲]. براساس این خاصیت، این گروه از مواد در برابر تنش مکانیکی، بار الکتریکی[۵] تولید می‌کنند. در واقع، واژهٔ پیزوالکتریک به‌مفهوم تولید جریان الکتریسیته در اثر اعمال نیروی مکانیکی است [۳]. این واژه برآمده از لغت یونانی پیزو یا پیـزن[۶] به‌معنـای فشردن یا فشاردادن و الکتریک یا الکترون[۷]، که در روزگاران گذشته برای کهربا[۸] به‌کار می‌رفته است، می‌باشد [۴].

خاصیت پیزوالکتریک، در سال ۱۸۸۰ م، توسط ژاکوب کوری[۹]، فیزیک‌دان برجستهٔ فرانسوی و استاد رشتهٔ کانی‌شناسی دانشگاه مونپلیه[۱۰]، و پیئر کوری[۱۱]، فیزیک‌دان شهیر فرانسوی، برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۳ م و پیشگام در عرصه‌هایی چون بلورشناسی[۱۲]، مغناطیس و واپاشی هسته‌ای[۱۳]، کشف و معرفی شد [۳]. در بسیاری از متون و مقالات علمی، اثر پیزوالکتریک به‌عنوان تبادل

الکترومکانیک میان وضعیت الکتریکی و مکانیکی در مواد بلورین معرفی شده است. بدین صورت که رابطه‌ای برگشت‌پذیر میان این دو وجود دارد؛ یعنی در اثر اعمال نیروی مکانیکی به یک مادهٔ پیزوالکتریک، بار الکتریکی تولید می‌شود و یا در اثر تولید بار الکتریکی در آن، مادهٔ مورد نظر کشیده یا فشرده می‌شود [۵]. مثلاً، در مادهٔ بلورینی چون تیتانات زیرکونات سرب[۱۴] هنگامی خاصیت پیزوالکتریک ظهور و بروز می‌یابد که ساختار بلورین این ماده حدود ۰/۱ درصد نسبت به حالت اولیه و ابعاد نخستین خود تغییر کند [۶]. این خاصیت در برخی از متون اثر مستقیم پیزوالکتریک[۱۵] نیز خوانده می‌شود.

اثر دیگری که در بحث مواد پیزوالکتریک مهم و درخور توجه است، اثر معکوس پیزوالکتریک[۱۶] نامیده می‌شود؛ اثری که براساس آن، به‌هنگام اعمال جریان الکتریکی به یک مادهٔ پیزوالکتریک، ماده دچار تغییر شکل می‌شود. امروزه از این ویژگی برای تولید امواج فراصوت[۱۷] استفاده می‌شود [۶]. در دنیای فناورمحور امروز، مواد پیزوالکتریک کاربردهای متنوعی دارند. مثلاً از این مواد در تولید مبدل‌ها و ادوات و وسائلی که جریان الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند استفاده می‌شود. همچنین در طراحی و ساخت انواع میکروسکوپ‌های پراب پویشی[۱۸] همچون میکروسکوپ تونلی روبشی[۱۹]، میکروسکوپ نیروی اتمی[۲۰] و میکروسکوپ نوری روبش میدان نزدیک[۲۱] و تحلیل‌های حرارتی در ابعاد میکرو[۲۲] از مواد پیزوالکتریک به‌وفور استفاده می‌شود [۷]. از دیگر کاربردهای نام‌آشنای این دسته از مواد می‌توان به طراحی و تولید پیکاپ انواع گرامافون، میکروفون، مولدهای فراصوت و حسگرهای سونار[۲۳] اشاره کرد. در پیکاپ[۲۴] گرامافون همچنان‌که قلم شیارهای رکورد را می‌پیماید، به مادهٔ پیزوالکتریک موجود در پیکاپ اختلاف فشاری اعمال می‌شود که این اختلاف فشار به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل و قبل از ورود به بلندگو تقویت می‌شود و در نهایت صدایی دلنشین به گوش می‌رسد [۸].

## ۲. تاریخچهٔ پیدایش

در نیمهٔ نخست قرن هجدهم میلادی، اثر تَـف‌الکتریسیته[۲۵] توسط کارل فون‌لینه[۲۶]، گیاه‌شناس و پزشک شهیر سوئدی و پایه‌گذار نظام امروزین طبقه‌بندی گیاهان و جانوران، و فارنتس آپینوس[۲۷]، دانشمند برجستهٔ آلمانی در عرصهٔ فلسفهٔ طبیعی، معرفی شد. براساس این خاصیت، در اثر اعمال حرارت به دسته‌ای خاص از مواد، جریان الکتریکی تولید می‌شود [۹]. با الهام از همین اثر جالب توجه بود که رِنـه جاست هـای[۲۸]، کانی‌شناس شهیر فرانسوی، و آنتونی سـزار بکـرل[۲۹]، دانشمند برجستهٔ فرانسوی در زمینهٔ مطالعهٔ شب‌تابی[۳۰]، مطالعات گسترده و آزمایش‌های متعددی ترتیب دادند و بدین ترتیب رابطهٔ میان تنش‌های مکانیکی و شارژ الکتریکی را مسلم و قطعی دانستند. اما این پدیدهٔ جالب همچنان در هاله‌ای از ابهام باقی ماند تا اینکه در سال ۱۸۸۰ م، اثر پیزوالکتریک توسط ژاکوب کوری و پیئر کوری معرفی شد [۱۰]. این دو دانسته‌های خود دربارهٔ اثر پیزوالکتریک را با معلوماتی دربارهٔ ساختار بلورین مواد درهم آمیختند و همین کار، بستر مساعد جهت پیشرفت‌هایی در زمینهٔ پیش‌بینی رفتار مواد بلورین را فراهم آورد. آنها این اثر را با استفاده از ساختار بلورین موادی چون تورمالین[۳۱]، کوارتز[۳۲]، زبرجد هندی (زمرد شرقی یا همان توپاز[۳۳])، نیشکر و نمک روشل[۳۴] نشان دادند. در این میان، کوارتز و نمک روشل بیشترین اثر پیزوالکتریک را به نمایش گذاشتند [۱۲]. این در حالی بود که این دو تن اثر معکوس پیزوالکتریک را شناسایی و معرفی نکرده بودند. از منظر دانش ریاضی، اثر معکوس پیزوالکتریک از قوانین بنیادین ترمودینامیک نشأت گرفته است؛ اثری که در سال ۱۸۸۱ م، توسط گابریل لیپمان[۳۵]، فیزیک‌دان برجسته و مخترع فرانسوی، استنباط شد [۹ و ۱۳]. چندی بعد، برادران کوری وجود اثر معکوس پیزوالکتریک را نیز تأیید کردند.

تا سال‌ها پس از این ماجرا، پدیدهٔ پیزوالکتریک تنها در سطح یک مفهوم آزمایشگاهی باقی ماند. البته در آن دوران، اقداماتی برای کشف و تعریف ساختارهایی بلورین

که قادر به نمایش این اثر خارق‌العاده بودند نیز انجام شد تا اینکه در سال ۱۹۱۰ م، ولدمار فویگت[۳۶]، فیزیک‌دان آلمانی، کتابی باعنوان *درسنامهٔ فیزیک کریستال*[۳۷] منتشر کرد و بدین ترتیب بحث دربارهٔ مواد پیزوالکتریک به اوج خود رسید [۱۴]. در این اثر، نویسنده به طبقه‌بندی بیست گونه از مواد بلورین طبیعی همت گماشته و با استفاده از تحلیل تانسوری ثابت پیزوالکتریک[۳۸] این مواد را با دقت تعریف کرده است [۱۵].

## ۳. جنگ جهانی اول و تحولات پس از آن

نخستین کاربرد عملی مواد پیزوالکتریک در ساخت دستگاه‌های ردیاب زیردریایی موسوم به سونار بود [۱۶-۱۷]. این دستگاه‌ها علاوه بر ردیابی انواع زیردریایی، قادر به ناوبری و ارتباط با دیگر یگان‌های شناور و مستغرق نیز بودند. فناوری مذکور طی جنگ جهانی اول رشد و توسعه یافت [۱۸].

در سال ۱۹۱۷ م، پل لانژون[۳۹]، فیزیک‌دان فرانسوی و شاگرد پیئر کوری، به‌کمک همکارانش اقدام به طراحی و ساخت یک موج‌یاب زیردریایی فراصوت[۴۰] نمود [۱۹-۲۰]. این حسگر از یک مبدل[۴۱] بسیار نازک از جنس کوارتز ساخته شده بود. این مبدل با دقت و ظرافتی مثال‌زدنی بین دو صفحهٔ فولادی چسبانده و در آن از یک هیدروفن[۴۲] برای بررسی پژواک دریافت‌شده استفاده شده بود. اساس کار آن نیز بدین صورت بود که با انتشار صدایی با فرکانس بالا از مبدل و اندازه‌گیری مدت زمانی که طول می‌کشد تا انعکاس صدا از امواجی که از یک شی خاص بازمی‌گردد شنیده شود، میزان فاصله تا آن شی محاسبه می‌شد. به‌کارگیری مواد پیزوالکتریک در دستگاه‌های سونار و توفیق این پروژه سبب جلب توجه دانشمندان به‌سمت این خاصیت جدید شد و دیری نپایید که استفاده از مواد پیزوالکتریک در دستگاه‌ها و ادوات خاص گسترش یافت [۲۱]. طی سالیان بعد، مواد پیزوالکتریک جدیدتر با کاربردهایی بغایت جالب‌تر کشف و به جامعهٔ علمی معرفی شدند. امروزه وسائل و ادوات بسیاری با مواد پیزوالکتریک ساخته می‌شوند؛ ادواتی که در زندگی روزمرهٔ انسان کاربردهای فراوانی دارند. همان‌گونه که قبلاً نیز بیان کردیم، از جمله کاربردهای بدوی و ابتدایی مواد پیزوالکتریک استفاده از آنها در ساخت گرامافون‌های خانگی است [۲۲]. از دیگر کاربردهای این مواد در دنیای فرافناوری امروز ساخت مبدل‌های اولتراسونیک[۴۳] و حسگرهایی چون انواع شتاب‌سنج‌های ارتعاشی پیشرفته است [۲۳].

## ۴. جنگ جهانی دوم و پیامدهای آن

در طول جنگ جهانی دوم، بین سال‌های ۱۹۳۹ لغایت ۱۹۴۵ م، مجموعه‌ها و نهادهای پژوهشی متعددی در ایالات متحدهٔ امریکا، روسیه و ژاپن، نسل جدیدی از مواد ترکیبی، موسوم به فروالکتریک[۴۴]، را کشف و معرفی کردند [۲۴]. فروالکتریسیته[۴۵] اصطلاحاً خاصیتی است که سبب ایجاد دوقطبی‌های الکتریکی دائمی، در سطح سلول واحد، به‌دلیل چینش منظم ملکول‌ها می‌شود؛ به‌طوری‌که جهت آنها با اعمال میدان الکتریکی خارجی قابل تنظیم باشد. همین دستاورد نیز سبب انجام پژوهش‌هایی فشرده جهت تولید موادی چون تیتانات باریوم[۴۶] و پس از آن، تیتانات زیرکونات سرب[۴۷]، با ویژگی‌های خاص برای کاربردهایی خاص شد [۲۵]. از جمله مثال‌های مهم از کاربرد این مواد بلورین، استفاده از این مواد در آزمایشگاه‌های تلفن بل[۴۸] بود [۲۶].

در آن دوران، دانش و فناوری ساخت و تولید ادوات و مواد پیزوالکتریک در ایالات متحدهٔ امریکا، به‌دلیل جنگ‌ها و کشمکش‌های داخلی این کشور و وجود حس رقابت میان این مؤسسات، همچنین مسائل و مباحث مرتبط با حق انحصاری ثبت اختراع، درون شرکت‌ها و مؤسسات سازنده باقی مانده بود. مدتی به‌همین منوال گذشت تا اینکه نخستین مادهٔ پیزوالکتریک روانهٔ بازار شد. کریستال‌های کوارتز[۴۹] نخستین مادهٔ پیزوالکتریکی بودند که تجاری‌سازی

شدند و مورد بهره‌برداری قرار گرفتند [۲۷]. این در حالی بود که دانشمندان همچنان به‌دنبال موادی با کیفیت و کارایی بهتر بودند.

روش‌ها و فرایندهای تولید مواد و ادوات پیزوالکتریک در ایالات متحده رشد چندانی نداشت و این در حالی بود که صنعت ساخت این مواد در کشورهایی چون ژاپن روز به‌روز توسعه می‌یافت. تولیدکنندگان ژاپنی اطلاعات خود را در اختیار دیگران نیز می‌گذاشتند و از این رهگذر، طی چند سال، از نظر فنی بر رقیبان امریکایی خود پیشی گرفتند و بازار جهانی را از آن خود کردند. عمدهٔ تجهیزاتی که در شرکت‌های ژاپنی تولید می‌شد عبارت بود از [۲۸]:

۱. فیلترهای پیزوسرامیک[۵۰] برای استفاده در وسائلی چون انواع رادیو و تلویزیون
۲. زنگ اخبارهای پیزوالکتریک و مبدل‌های صوتی[۵۱] که می‌توانستند مستقیماً به مدارهای الکتریکی متصل شوند.
۳. انواع فندک‌های پیزوالکتریک که در ساخت اجاق‌های مسافرتی و کباب‌پزها مورد استفاده قرار می‌گرفتند. در این ادوات، یک دیسک سرامیکی کوچک تحت فشار قرار می‌گیرد و به‌دنبال آن جرقه ایجاد می‌شود.

شکل ۱. نمونه‌ای از یک زنگ اخبار پیزوالکتریک

البته از مواد پیزوالکتریک در ساخت انواع مبدل‌های التراسونیک نیز استفاده می‌شود [۲۹]. در این نوع از مبدل‌ها، امواج صوتی از طریق هوا منتقل می‌شوند. نخستین کاربرد این مبدل‌ها ساخت دستگاه کنترل از راه انواع تلویزیون بوده است. اما امروزه این نوع از مبدل‌ها روی انواع خودرو، به‌عنوان ابزار پژواک‌یاب یا موقعیت‌سنج اکوستیک[۵۲] نصب و استفاده می‌شوند [۳۰]. وسیلهٔ مذکور این امکان را به راننده می‌دهد تا فاصلهٔ خودرو خود را نسبت به هر وسیله یا شی خاص تعیین کند [۳۱].

## ۵. سازوکار و نحوهٔ عملکرد

اثر پیزوالکتریک به ایجاد گشتاور دوقطبی الکتریکی[۵۳] در جامدات مربوط می‌شود. این امر نیز به نوبهٔ خود ممکن است به‌دلیل القای یون‌ها بر اطراف شبکهٔ بلورین با محیط شارژ نامقارن باشد و یا اینکه مستقیماً توسط گروه‌های ملکولی منتقل شده باشد. می‌توان به‌راحتی تراکم دوقطبی را برای کریستال‌ها محاسبه کرد که این کار با جمع گشتاورهای دوقطبی الکتریکی هر حجم از سلول واحد کریستالوگرافی صورت می‌گیرد. چون هر دوقطبی یک بردار است، لذا تراکم دوقطبی p یک میدان برداری است. دوقطبی‌های نزدیک هم تمایل به ردیف‌شدن در مناطقی را دارند که حوزه‌های وایس[۵۴] نامیده می‌شود. این حوزه‌ها معمولاً به‌طور تصادفی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، اما می‌توان با کمک فرایندهای قطبی‌شدن تراز کرد. اساساً تمامی مواد پیزوالکتریک را نمی‌توان قطبی کرد. از جمله موارد مهم برای اثر پیزوالکتریک، تغییر قطبی‌شدن p در زمان اعمال یک نیروی مکانیکی مشخص است. این امر ممکن است توسط پیکربندی مجدد محیط القایی دوقطبی و یا به‌وسیلهٔ چیدمان مجدد گشتاورهای دوقطبی ملکولی تحت تأثیر اعمال نیروی مکانیکی به‌وجود آید.

به‌طور کلی، خاصیت پیزوالکتریک می‌تواند در اثر یکی از پدیده‌هایِ تغییر دوقطبی درون شبکهٔ بلورین ماده، تقارن کریستال‌ها و یا اعمال نیروی مکانیکی از پیرامون روی دهد.

به‌نظر می‌رسد که تغییر در دوقطبی p به‌عنوان تغییر تراکم شارژ سطح بر صفحهٔ کریستال باشد؛ یعنی به‌عنوان یک

تغییر میدان الکتریکی که بین صفحه یا سطح توسط یک تغییر در تراکم دوقطبی در حجم به‌وجود می‌آید. مثلاً یک سانتی‌متر مکعب کوارتز با اعمال نیرویی معادل ۲ کیلونیوتن می‌تواند اختلاف پتانسیلی معادل ۱۲۵۰۰ ولت تولید کند [۳۲-۳۳].

## ۶. نمونه‌هایی از مواد پیزوالکتریک

در بسیاری از مواد بلورین، اعم از مواد طبیعی و یا ساختگی، می‌توان ردپایی از اثر پیزوالکتریک را مشاهده کرد. پاره‌ای از مواد بلورین طبیعی که دارای خاصیت پیزوالکتریک هستند، عبارت‌اند از [۳۴]:

۱. کوارتز
۲. فسفات آلومینیوم[۵۵]
۳. ساکارز[۵۶]
۴. پتاسیم سدیم تارترات
۵. زبرجد هندی
۶. تورمالین‌ها[۵۷]

از دیگر موادی که در آنها ردپایی از اثر پیزوالکتریک به‌چشم می‌خورد، استخوان انسان است [۳۵]. استخوان برخی از ویژگی‌ها و خصوصیات پیزوالکتریک را از خود نشان می‌دهد. مطالعات و پژوهش‌های فوکادا و همکاران (۱۹۵۷ م) نشان می‌دهد که وجود خاصیت پیزوالکتریک در استخوان بدن انسان به‌دلیل وجود کلاژن[۵۸] در ساختمان استخوان است [۳۵-۳۶]. کلاژن پروتئین اصلی بافت پیوندی است که در ماتریس خارج سلولی جانوران یافت می‌شود. سنتز این ماده در بافت‌هایی چون پوست، غضروف‌ها، زردپی، رباط‌ها، دندان‌ها و سلول‌های ماهیچهٔ صاف در دیوارهٔ رگ‌های خونی یافت می‌شود. معمولاً رشته‌های کلاژن با مواد گوناگونی درهم می‌آمیزند. مثلاً در استخوان با بلورهای کلسیم درهم می‌آمیزند و ساختار سختی می‌سازند. در نگاهی دقیق‌تر، استخوان همچون یک بتن مسلح به‌نظر می‌رسد که رشته‌های کلاژن آن همچون میلگردهای فولادی، درون بستری از بلورهای هیدروکسی آپاتیت و پروتئین‌ها جای گرفته‌اند. امروزه این ماده را به‌عنوان یک مادهٔ بیوالکتریک[۵۹] محسوب می‌کنند. وجود خاصیت پیزوالکتریک در ملکول‌های کلاژن سبب می‌شود تا به‌هنگام اعمال نیرو به استخوان‌ها، نوعی شارژ الکتریکی تولید شود و در اثر آن، جریان الکتریکی به رشته‌های عصبی منتقل و نهایتاً فرمان‌های مقتضی در شبکهٔ عصبی صادر شود. وجود خاصیت پیزوالکتریک در کلاژن سبب می‌شود تا این ماده به‌مثابه یک حسگر زیستی[۶۰] نیرو عمل کند [۳۷]. این نتایج با تحقیقات و پژوهش‌هایی که در اواخر دههٔ ۱۹۷۰ و اوائل دههٔ ۱۹۸۰ م، در دانشگاه پنسیلوانیای ایالات متحده[۶۱] صورت گرفت، تأیید شد [۳۸].

از دیگر مواد طبیعی که خاصیت پیزوالکتریک در آنها دیده می‌شود، عبارت‌اند از [۳۹]:

۱. تاندون یا زردپی
۲. ابریشم طبیعی
۳. چوب
۴. مینای دندان
۵. عاج دندان
۶. رشته‌های دی. ان. ای.
۷. پروتئین‌های ویروسی که شامل باکتری‌خوارها[۶۲] می‌شوند. در یک طرح پژوهشی ثابت شده است که فیلم نازکی از باکتری‌خوار ام. ۱۳[۶۳] را می‌توان برای ساخت یک ژنراتور پیزوالکتریک استفاده و از جریان الکتریکی حاصل از آن یک صفحه‌نمایش کریستال مایع[۶۴] (ال. سی. دی.) را روشن کرد [۴۰].

از جمله مواد بلورین ترکیبی می‌توان به فسفات گالیوم با فرمول شیمیایی $GaPO_4$ و لانگاسیت[۶۵] اشاره کرد. از سرامیک‌های ترکیبی نیز می‌توان خانوادهٔ سرامیک با ساختار برنز - تنگستن یا ساختار پروسکایت[۶۶] را نام برد. از دیگر سرامیک‌های پیزوالکتریک می‌توان به تیتانات سرب، تیتانات زیرکونات سرب - که با نام اختصاری PZT نیز شناخته می‌شود و رایج‌ترین سرامیک پیزوالکتریک در

کاربردهای صنعتی امروزی است - نیوبات پتاسیم، نیوبات سدیم، اکسید روی و سدیم تنگستات[67] اشاره کرد [۴۱].

### ۶-۱. پیزوسرامیک‌های بدون سرب

امروزه دغدغه‌های فراوانی در مورد مسمومیت با سرب در لوازمی که در ترکیبات‌شان سرب وجود دارد، به‌وجود آمده است. همین نگرانی‌ها نیز سبب شد تا در فوریهٔ ۲۰۰۳ مقررات محدودیت استفاده از مواد مخاطره‌آمیز[68] توسط اتحادیهٔ اروپا وضع شود [۴۲].

در سال ۲۰۰۴ م، گروهی از پژوهشگران ژاپنی به سرپرستی یاسویوشی سایتو[69] ترکیبی جدید با عنوان سدیم پتاسیم نیوبات را با خصوصیاتی نزدیک به تیتانات زیرکونات سرب (PZT) کشف کردند [۴۳]. ترکیبات ویژهٔ این ماده دارای خواص ارتعاشی منحصر به‌فردی بود که استفاده از آن را در صنعت ساخت مبدل‌های پیزوالکتریک رواج می‌داد. البته سرامیک‌های پیزوالکتریک بدون سرب تنها به موارد یادشده محدود نمی‌شوند و بسیار فراتر از این مواردند که اشاره به تمامی آنها در این مجال نمی‌گنجد.

شکل ۳. نمونه‌ای از شتاب‌سنج پیزوالکتریک

### ۶-۲. پلیمرهای پیزوالکتریک

ظهور و بروز خاصیت پیزوالکتریک تنها به مواد یادشده محدود نمی‌شود. این ویژگی در پلیمرها نیز دیده می‌شود. به‌عنوان مثال پلی وینیلیدین فلوراید[70] یا به اختصار پی. وی. دی. اف.[71] نوعی پلیمر با مقاومت کششی و ثبات فرم نسبتاً بالاست [۴۴]. جالب است بدانیم که خاصیت پیزوالکتریک موجود در این پلیمر خاص چند برابر بیشتر از کریستال‌های کوارتز است و برخلاف سرامیک‌ها، که ساختار کریستالی ماده سبب ظهور و بروز اثر پیزوالکتریک درون آن می‌شود، در این مادهٔ پلیمری، زنجیره‌های درهم تنیده و بلند ملکولی عامل پیدایش خاصیت پیزوالکتریک می‌باشد [۴۵].

## ۷. کاربردها

با گسترش روزافزون دانش و فناوری، استفاده و بهره‌برداری از مواد پیزوالکتریک نیز رشد چشم‌گیری پیدا کرده است. از جمله صنایعی که به بازار قابل توجهی برای استفاده از این مواد مبدل شده است، صنعت خودروسازی می‌باشد. همچنین صنایع طراحی و ساخت تجهیزات و ادوات پزشکی و صنعت ارتباطات و فناوری اطلاعات نیز به نوبهٔ خود از جمله صنایعی هستند که به بستری مساعد برای رشد روزافزون استفاده از ادوات و تجهیزات پیزوالکتریک مبدل شده‌اند [۴۶].

در سال ۲۰۱۰ م، تقاضای جهانی برای ادوات پیزوالکتریک، تقریباً درآمدی بالغ بر ۱۴/۸ میلیارد دلار داشته است [۴۷]. در این بازار پررونق، پیزوکریستال‌ها بزرگترین و پرمصرف‌ترین گروه از مواد پیزوالکتریک بوده‌اند. پلیمرهای پیزوالکتریک نیز در ردهٔ دوم قرار داشته‌اند و امروزه، به‌دلیل ویژگی‌های متمایزی چون وزن کم و اندازهٔ کوچک، روز به‌روز کاربرد بیشتری پیدا می‌کنند. امروزه مواد پیزوالکتریک بلورین موارد مصرف بیشماری دارند که در ادامه به پاره‌ای از آنها اشاره می‌شود.

### ۷-۱. تولید منبع جریان الکتریکی

همان‌گونه که می‌دانید، به‌کمک خاصیت پیزوالکتریک موجود در موادی چون کوارتز می‌توان اختلاف پتانسیل‌هایی تا هزاران ولت تولید کرد [۴۸]. معروف‌ترین کاربرد مواد پیزوالکتریک، استفاده در فندک‌های الکتریکی است [۴۹]. در این وسائل، با فشردن دکمه‌ای کوچک،

چکشی خاص به قطعه‌ای از یک مادهٔ پیزوالکتریک ضربه می‌زند و در نتیجهٔ این ضربه، جریان الکتریکی تولید می‌شود و نهایتاً احتراق رخ می‌دهد. امروزه بسیاری از فندک‌های کوچک و اجاق‌ها و خوراک‌پزهای قابل حمل با استفاده از فندک‌های پیزو کار می‌کنند.

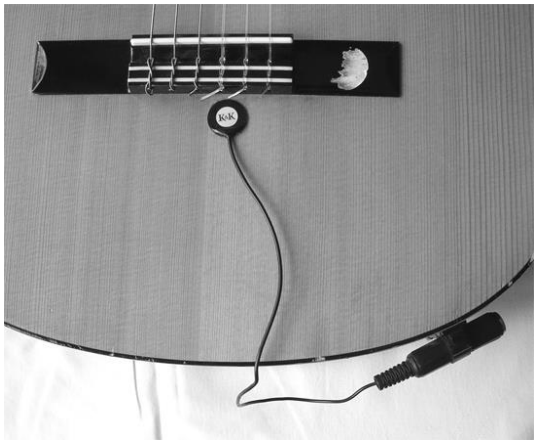
از دیگر موارد کاربرد مواد پیزوالکتریک می‌توان به پژوهشی که در سازمان پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفتهٔ دفاعی[۷۲] وابسته به ایالات متحدهٔ امریکا با عنوان برداشت انرژی[۷۳] انجام شده است، اشاره کرد [۵۰]. ایدهٔ اصلی این پروژهٔ تحقیقاتی استحصال یا برداشت انرژی الکتریکی از ژنراتورهای پیزوالکتریک کوچکی بود که در چکمهٔ سربازان جاسازی می‌شد. البته ناگفته نماند که این طرح در همان مراحل اولیهٔ خود متوقف شد؛ زیرا وجود چنین تجهیزاتی در چکمه‌های نظامی، سبب ایجاد محدودیت‌هایی برای سربازان می‌شد و از کارآیی آنها می‌کاست [۵۱].

از دیگر پروژه‌هایی که با هدف استحصال انرژی الکتریکی مطرح شده است، می‌توان به برداشت انرژی الکتریکی از رفت‌وآمد مسافران در اماکن عمومی همچون ایستگاه‌های مترو، و یا استحصال انرژی الکتریکی از لرزش‌ها و نوسانات ماشین‌آلات و ادوات صنعتی به‌کمک مواد پیزوالکتریک، با هدف شارژ باتری‌هایی برای منابع انرژی پشتیبان اشاره کرد [۵۲].

یک ترانسفورماتور پیزوالکتریک[۷۴] نوعی تقویت‌کنندهٔ جریان متناوب است. برخلاف ترانسفورماتورهای معمولی، که معمولاً از یک کوپلینگ مغناطیسی میان ورودی و خروجی استفاده می‌کنند، ترانسفورماتورهای پیزوالکتریک از یک کوپلینگ آکوستیک استفاده می‌کنند [۵۳]. امروزه ترانسفورماتورهای پیزوالکتریک از جمله متراکم‌ترین منابع ولتاژ بالا به‌شمار می‌روند [۵۴].

## ۷-۲. حسگرهای پیزوالکتریک

از کاربردهای معمول مواد پیزوالکتریک، استفاده از آنها در ساخت انواع حسگرها و مبدل‌هاست. عملکرد این دسته از حسگرها براساس خاصیت پیزوالکتریک استوار است. بدین معنا که با اعمال نیروی مکانیکی به حسگر، شاهد شارژ الکتریکی در خروجی آن خواهیم بود. امروزه طرح‌های متنوعی از حسگرهای پیزوالکتریک در بازار وجود دارد. حسگرهای پیزوالکتریک طولی[۷۵]، عرضی[۷۶] و برشی[۷۷] از این دسته‌اند. از جمله کاربردهای معمول این حسگرها، بررسی و اندازه‌گیری تغییرات فشار به شکل صداست. میکروفون‌های پیزوالکتریک[۷۸]، که در آنها امواج‌های صوتی سبب تغییر شکل در مواد پیزوالکتریک شده و به‌دنبال آن یک تغییر ولتاژ ایجاد می‌شود و یا پیکاپ‌های پیزوالکتریک مورد استفاده در ادواتی چون گیتار الکترواکوستیک[۷۹] از جمله نمونه‌های بارز این دسته از حسگرهاست [۵۵].



شکل ۳. نمونه‌ای از یک پیکاپ پیزوالکتریک
که در یک گیتار الکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرد

از دیگر موارد کاربرد حسگرهای پیزوالکتریک می‌توان به استفاده از آنها در ساخت مبدل‌های فراصوت[۸۰] به‌منظور استفاده در فن تصویربرداری پزشکی و یا استفاده در روش‌های متداول آزمون‌های غیرمخرب[۸۱] همچون روش آزمون فراصوت[۸۲] و رادیوگرافی[۸۳] اشاره کرد [۵۶].

برای بسیاری از فناوری‌های اندازه‌گیری، حسگرها می‌توانند به‌عنوان حسگر یا عملگر عمل کنند. هنگامی‌که این ادوات در ظرفیت دوگانهٔ خود استفاده می‌شوند؛ یعنی هم به‌عنوان حسگر و هم به‌عنوان عملگر به‌کار می‌روند، به‌جاست تا

برای آنها از واژهٔ مبدل یا ترانسدیوسر استفاده کنیم. ناگفته نماند که بسیاری از حسگرهای پیزوالکتریک در ظرفیت دوگانهٔ خود به‌کار می‌روند و از همین‌رو می‌توان واژهٔ مبدل را برای آنها به‌کار برد. مثلاً مبدل‌های فراصوت[۸۴] می‌توانند امواج فراصوت را به‌درون بدن انسان بتابانند و امواج بازگشتی را دریافت و به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل کنند.

علاوه بر مواردی تا بدین‌جا به آنها اشاره شد، از دیگر کاربردهای حسگرهای پیزوالکتریک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. استفاده از قطعات پیزوالکتریک در ایجاد و بررسی امواج سونار
۲. استفاده از مواد پیزوالکتریک در انواع حسگرهای اندازه‌گیری تک‌محوره[۸۵] و دومحوره[۸۶]
۳. پایش مقدار نیرو در کاربردهایی چون پزشکی، آواشیمی[۸۷] و فرایندهای صنعتی [۵۷]
۴. تولید و ساخت انواع کرنش‌سنج[۸۸]
۵. کاربرد مواد پیزوالکتریک در جنگ‌افزارهایی چون آر. پی. جی. ۷ به‌عنوان فیوز انفجار [۵۸]
۶. معمولاً از مواد پیزوالکتریک در واحد کنترل الکترونیک موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود [۵۹]. این حسگر خاص، که گاه با نام تخصصی حسگر کوبش[۸۹] نیز شناخته می‌شود، حرکات ارتعاشی ناشی از بروز پدیدهٔ کوبش موتور[۹۰] در موتور احتراق داخلی را اندازه‌گیری می‌کند [۶۰]. از کاربردهای دیگر حسگرهای پیزوالکتریک در موتورهای احتراق داخلی، استفاده از این مواد در سامانهٔ پاشش سوخت[۹۱] است [۶۱]. در این سامانه، از مبدل‌های پیزوالکتریک برای اندازه‌گیری فشار مطلق منیفولد[۹۲] و به‌دنبال آن، مشخص‌کردن بار وارده بر موتور و نهایتاً تنظیم مدت زمان پاشش مخلوط سوخت و هوا توسط سامانهٔ پاشش سوخت استفاده می‌شود [۶۱].
۷. معمولاً از حسگرهای فراصوت پیزوالکتریک[۹۳] در ادوات مورد نیاز برای انجام آزمون انتشار امواج صوتی[۹۴] استفاده می‌شود [۶۲].
۸. امروزه در مدل‌های گوناگون حسگرهای ارتعاشی از مواد پیزوالکتریک استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان به حسگر اندازه‌گیری شتاب اشاره کرد که در آن از قطعهٔ پیزوالکتریک استفاده می‌شود تا به کمک آن بتوان مقدار شتاب حرکات ارتعاشی را به‌راحتی اندازه‌گیری کرد.

شکل ۴. استفاده از مواد پیزوالکتریک به‌عنوان فیوز انفجار در جنگ‌افزار آر. پی. جی. ۷ [۵۸]

و کاربردهای فراوان دیگری از این دست که اشاره به تمامی آنها در این مجال نمی‌گنجد. برای مطالعهٔ بیشتر در این‌باره و کسب اطلاعات غنی‌تر دربارهٔ کاربردهای متنوع حسگرهای پیزوالکتریک در دنیای علم و فناوری می‌توانید به منابع [۲۹] مراجعه کنید.

## ۷-۳. عملگرهای پیزوالکتریک

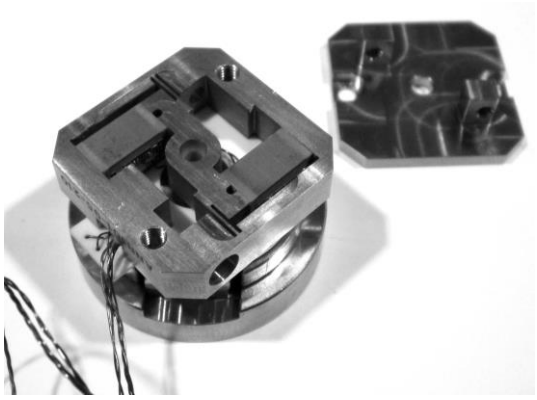
هنگامی‌که میدان‌های الکتریکی بسیار بزرگی تنها در اثر تغییر کوچکی در پهنای یک کریستال پیزو به‌وجود می‌آید، می‌توان از این خاصیت استفاده و ادواتی را طراحی کرد که به‌کمک آنها موقعیت اجسام گوناگون را در محل دلخواه تنظیم و تثبیت نمود. اصطلاحاً به چنین ادواتی عملگر پیزوالکتریک گفته می‌شود. عملگر اصطلاحاً به وسیله‌ای اطلاق می‌شود که وظیفهٔ حرکت‌دادن یا کنترل یک

سازوکار یا سیستم مکانیکی، هیدرولیکی، پنوماتیکی و یا الکتریکی خاص را برعهده داشته باشد [۶۳].

امروزه از سرامیک‌های چندلایه، که از چندین لایهٔ نازک سرامیک به ضخامت حدوداً ۱۰۰ میکرومتر تشکیل شده‌اند، برای دستیابی به میدان‌های الکتریکی با ولتاژ پایین‌تر از ۱۵۰ ولت استفاده می‌شود. معمولاً از این دسته از سرامیک‌ها برای ساخت دو نوع عملگر استفاده می‌شود: عملگرهای پیزوالکتریک مستقیم[۹۵] و عملگرهای پیزوالکتریک تقویت‌شده[۹۶]. معمولاً ضربهٔ عملگرهای نوع اول کمتر از ۱۰۰ میکرومتر است، اما ضربهٔ حاصل از عملگرهای نوع دوم به حدود یک میلی‌متر نیز می‌رسد. به‌عنوان مثالی دیگر از این ادوات می‌توان به انواع بلندگو اشاره کرد. در بلندگوها جریان الکتریکی به حرکت مکانیکی بسیار ظریف یک لایهٔ نازک از مادهٔ پلیمری پیزوالکتریک مبدل می‌شود و در اثر همین حرکت صدایی خاص تولید می‌گردد. موتورهای پیزوالکتریک نیز نمونهٔ دیگری از انواع عملگرهای پیزو می‌باشند. امروزه از این موتورها به‌عنوان جایگزین مناسبی برای موتورهای دی. سی. براشلس[۹۷] استفاده می‌شود.

از دیگر موارد کاربرد عملگرهای پیزوالکتریک می‌توان به استفاده از این ادوات در انواع میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ تونلی روبشی اشاره کرد. در این ادوات بسیار دقیق و حساس، از خاصیت معکوس پیزوالکتریک استفاده می‌شود تا سوزن میکروسکوپ نزدیک نمونه نگاه داشته شود. چاپگرهای جوهرافشان نیز نمونه‌ای دیگر از کاربرد عملگرهای پیزوالکتریک‌اند. در این دسته از لوازم اداری، از قطعه‌ای کریستال پیزوالکتریک برای هدایت و کنترل نحوهٔ تزریق جوهر توسط نازل برروی کاغذ استفاده می‌شود.

امروزه در موتورهای دیزل نیز از افشانهٔ سوخت پیزوالکتریک استفاده می‌شود. در این نوع از موتورها، در پایهٔ سوخت‌پاش[۹۸] موتور دیزل از افشانه‌های سوخت پیزوالکتریک استفاده می‌شود. این طرح، نخستین‌بار توسط شرکت بوش آلمان[۹۹] طراحی و تولید شد و استفاده از آن به‌جای شیرهای برقی معمولی[۱۰۰] مطرح گشت.



شکل ۵. نمونه‌ی از یک موتور پیزوالکتریک
در این نمای خاص از موتور، دو کریستال پیزوالکتریک
به‌منظور ایجاد گشتاور مکانیکی به‌خوبی دیده می‌شوند

از دیگر موارد کاربردهای عملگرهای پیزوالکتریک طی سالیان اخیر، استفاده از این دسته از ادوات در فن کنترل فعال ارتعاشات است. بحث دربارهٔ موارد کاربرد ابزارهای پیزو در فن اندازه‌گیری، پایش و کنترل ارتعاشات بسیار فراتر از این مجال است. برای کسب اطلاعات بیشتر و دقیق‌تر در اینباره می‌توان به منبع [۶۴] مراجعه کرد.

## ۸. جمع‌بندی

بدون‌شک رشد و بالندگی صنعت در هر کشور، متکی به استفاده از دانش و فناوری به‌روز و پیشرفته در رشته‌ها و شاخه‌های گوناگون است. از جمله فناوری‌های به‌روز، که سالیانی است در صنایع فناورمحور همچون صنعت نفت، گاز و پتروشیمی، صنایع هوافضا، صنایع نیروگاهی، خودروسازی، طراحی و تولید انواع جنگ‌افزار و مواردی دیگر از این دست، مورد اقبال قرار گرفته است، فن استفاده از ادواتی است که در آنها به‌نوعی از قطعات پیزو استفاده می‌شود. این دسته از مواد خاص، با توجه به ویژگی‌های منحصر به‌فرد خود، زمینهٔ رشد و بالندگی هر شاخه از دانش و فناوری را فراهم کرده‌اند. با توجه به کاربردهای فراوان

این مواد، بجاست تا زیرساخت‌های لازم جهت بومی‌سازی این فناوری در کشور نهادینه شود، تا متحمل پرداخت هزینه‌های هنگفت برای تأمین ادوات و قطعات خاص پیزو نباشیم. در این مقاله سعی شد تا با ارائهٔ گزارشی نسبتاً جامع از پیدایش مفهوم پیزوالکتریک و تحولات این شاخه از دانش مهندسی مواد طی جنگ‌های جهانی اول و دوم، تاریخچهٔ کاملی از پیدایش این مواد ذکر شود. سپس موارد کاربرد این مواد در صنایع گوناگون معرفی شد تا ظرفیت‌های فراروی این شاخه از دانش فنی آشکارتر گردد.

## ۹. قدردانی

در پایان بجاست تا از جناب آقای حمید مهدیقلی، دانشیار محترم دانشکدهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، تشکر و قدردانی کنم. ایشان متن را با دقت مطالعه و نکاتی را یادآور شدند که در پختگی و فخامت کار بسیار اثرگذار بود. همچنین از خانم فاطمه نیک‌سخن به‌سبب زحماتی که در ترجمهٔ پاره‌ای از متون و نصوص دقیقه متحمل شدند، تشکر و قردانی می‌کنم.

## ۱۰. مآخذ

[۱] فرهنگستان زبان و ادب فارسی. *فرهنگ واژه‌های مصوب فرهنگستان*، تهران: نشر آثار، ۱۳۸۶، ص. ۸.

[2] Skoog, Douglas A., F. James Holler, Stanley R. Crouch. *Principles of Instrumental Analysis*, 6th ed., Cengage Learning, 2007, p. 9.

[3] Manbachi, A., R. S. C. Cobbold. "Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection." *Ultrasound* 19, 2011(4): 187–196.

[4] Harper, Douglas. "Piezoelectric", *Online Etymology Dictionary*, http://www.etymonline.com (accessed May 14, 2014)

[5] Gautschi, G. *Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers*, Springer, 2002.

[6] Krautkrämer, J., H. Krautkrämer. *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer, 1990.

[7] Bai, Chunli. *Scanning Tunneling Microscopy and Its Application*, 2nd edition, Springer, 2000, p. 68.

[8] Ballou, Glen. *Handbook for Sound Engineers*, 4th edition, Focal Press, 2008, p. 1030.

[9] Katzir, Shaul. *The Beginnings of Piezoelectricity: A Study in Mundane Physics*, Springer, 2006, p. 24.

[10] Tichý, Jan, Jirí Erhart, Erwin Kittinger, Jana Prívratská. *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials*, Springer; 2010, p. 4.

[۱۱] رامین، علی، کامران فانی، محمدعلی سادات. *دانشنامهٔ دانش‌گستر*، "نمک روشل"، ۱۳۸۹، جلد ۱۷، ص. ۳۱.

[12] Webster, John G., Halit Eren. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*, CRC Press, 2014, p. 26-4.

[13] Lippmann, G. "Principe de la conservation de l'électricité." *Annales de chimie et de physique* (in French), 1881, 24: 145.

[14] Voigt, Woldemar. *Lehrbuch der Kristallphysik*, Berlin, Germany: B. G. Teubner, 1910.

[15] Mehra, Jagdish, Helmut Rechenberg. *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer, 1982, p. 118.

[16] Buchanan, Relva C. *Ceramic Materials for Electronics*, 3rd Edition, CRC Press, 2004, p. 300.

[17] Worden, K., W.A. Bullough, Jonathan Haywood. *Smart Technologies*, World Scientific, 2003, p. 149.

[18] Hempstead, Colin, William Worthington. *Encyclopedia of 20th-Century Technology*, Routledge, 1st edition, 2004, p. 726.

[19] Katzir, S. "Who knew piezoelectricity? Rutherford and Langevin on submarine detection and the invention of sonar". Notes Rec. R. Soc., 2012, 66 (2): 141–157.

[20] Chen, Dong, Sanjay K. Sharma, Ackmez Mudhoo. *Handbook on Applications of Ultrasound: Sonochemistry for Sustainability*, CRC Press, 2011, p. 25.

[21] Tucker, Spencer, Priscilla Mary Roberts. *World War I: A Student Encyclopedia*, ABC-CLIO, 2005, p. 235.

[22] Brook, R.J. *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, Pergamon, 1991, p. 124.

[23] Moheimani, S. O. Reza, Andrew J. Fleming. *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*, Springer, 2006, p. 10.

[24] Chopra, Inderjit, Jayant Sirohi. *Smart Structures Theory*, Cambridge University, 2013, p. 12.

[25] Gonzalo, Julio A., Basilio Jiménez. *Ferroelectricity: The Fundamentals Collection*, Wiley-VCH, 2005, p. 157.

[26] Carter, C. Barry, M. Grant Norton. *Ceramic Materials: Science and Engineering*, Springer; 2007, p. 508.

[27] Lechuga, L. M., F. P. Milanovich, P. Skladal, O. Ignatov and T. R. Austin. *Commercial and Pre-Commercial Cell Detection Technologies for Defense against Bioterror: Technology, Market and Society (Nato Science for Peace and Security Series: Human and Societal Dynamics)*, IOS Press, 2008, p. 62.

[28] Qin, Qing-Hua. *Fracture Mechanics of Piezoelectric Materials (Advances in Damage Mechanics)*, WIT Press, 2001, p. 2.

[29] Vives, Antonio Arnau. *Piezoelectric Transducers and Applications*, Springer, 2010.

[30] Cheeke, J. David N. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, 2nd edition, CRC Press, 2012, p. 4.

[31] Pinch, Trevor, Karin Bijsterveld. *The Oxford Handbook of Sound Studies*, Oxford University Press, 2013, p. 120.

[32] Hayes, David. "A Study into the Harvesting of Energy from the Movement of Pedestrians", *submitted in fulfillment of requirements for the civil engineering technology degree*, Dublin Institute of Technology, 2011, p. 14.

[33] Machine Design website, "Sensor Sense: Piezoelectric Force Sensors", http://machinedesign.com (accessed June 14, 2014)

[34] Vijaya, M.S. *Piezoelectric Materials and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*, CRC Press, 2012, p. 49-50.

[35] Behari, Jitendra. *Biophysical Bone Behaviour: Principles and Applications*, Wiley, 2009, p. 64.

[36] Fukada, Eiichi, Iwao Yasuda. "On the Piezoelectric Effect of Bone." *Journal of the Physical Society of Japan*, 1957, 12 (10), 1158-1162.

[37] Minary-Jolandan, Majid, Min-Feng Yu. "Nanoscale characterization of isolated individual type I collagen fibrils: Polarization and piezoelectricity". *Nanotechnology* 20 (2009):085706.

[38] Becker, Robert O., Andrew A. Marino. "Chapter 4: Electrical Properties of Biological Tissue (Piezoelectricity)".*Electromagnetism & Life*, Albany, New York: State University of New York Press, 1982.

[39] C. Andrew L. Bassett M. D. "Biologic significance of piezoelectricity", *Calcified Tissue Research*, 1967/68, Volume 1, Issue 1, pp 252-272.

[40] Lee, BY, J. Zhang, C. Zueger, WJ. Chung, SY. Yoo, E. Wang, J. Meyer, R. Ramesh, SW. Lee. "Virus-based piezoelectric energy generation." *Nature nanotechnology* 7, 2012(6): 351–6.

[41] Rosen, Carol Zwick, Basavaraj V. Hiremath, Robert Newnham. *Piezoelectricity*, New York: American Institute of Physics, 1992, p. 169.

[42] Nair, K. M., Ruyan Guo, Amar S. Bhalla, S.-I. Hirano, D. Suvorov. *Developments in Dielectric Materials and Electronic Devices: Proceedings of the 106th Annual Meeting of The American Ceramic Society*, Indianapolis, ... Transactions (Ceramic Transactions Series), Wiley-American Ceramic Society, 2005, p. 213.

[43] Saito, Yasuyoshi, Hisaaki Takao, Toshihiko Tani, Tatsuhiko Nonoyama, Kazumasa Takatori, Takahiko Homma, Toshiatsu Nagaya and Masaya Nakamura. "Lead-free piezoceramics." *Nature* 432, 2004(7013): 81–87.

[44] Zhang, Q.M., V. Bharti, G. Kavarnos, M. Schwartz. "Poly (Vinylidene Fluoride) (PVDF) and its Copolymers." *Encyclopedia of Smart Materials, Volumes 1–2*, John Wiley & Sons, 2002, p. 807–825.

[45] Kalantar-zadeh, Kourosh. *Sensors: An Introductory Course*, Springer; 2013, p. 52.

[46] Heywang, Walter, Karl Lubitz, Wolfram Wersing. *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*, Springer, 2008.

[47] "Market Report: Global Piezoelectric Device Market", Acmite Market Intelligence, June 2014.

[48] Ruben, Samuel. *The electronics of materials*, Bobbs-Merrill, 1964, p. 48.

[49] Neeraj, Mehta. *Applied Physics for Engineers*, Prentice-Hall of India, 2001, p. 644.

[50] Committee of Soldier Power/Energy Systems, Board on Army Science and Technology, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council. *Meeting the Energy Needs of Future Warriors*, National Academies Press, 2004, p. 112.

[51] Srivastava, R. K. *Proceedings of All India Seminar on Advances in Product Development*, New Age International, 2006.

[52] Richard, Michael Graham. "Japan: Producing Electricity from Train Station Ticket Gates", Discovery Communications, 2006.

[53] Ni, Yi-Qing, Xiao-Wei Ye. *Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways: Volume 2 (Lecture Notes in Electrical Engineering)*, Springer, 2012, p. 330.

[54] IEEE Industry Applications Society. *Conference record of the 2001 IEEE industry applications conference*, 2001, p. 524.

[۵۵] شینکلر، یان. *سنسورها و ترانسدیوسرها*، ترجمهٔ محمد طلوع خراسانیان، تهران: طراح، ۱۳۸۹.

[55] Lähdevaara, Jarmo. *The Science of Electric Guitars and Guitar Electronics*, Books On Demand 2012.

[56] Liu, Charles. *Integrity Testing for Low-pressure Membranes*, American Water Works Association, 2011, p. 143.

[57] Ensminger, Dale, Leonard J. Bond. *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications*, Third Edition, CRC Press, 2011, p. 563.

[58] How stuff works website, "How Rocket-Propelled Grenades Work", http://science.howstuffworks.com/rpg3.htm (accessed Jun 8, 2014)

[59] Denton, Tom. *Advanced Automotive Fault Diagnosis*, Butterworth-Heinemann Ltd, 3rd revised edition, 2011, p. 83.

[60] Robert Bosch GmbH. *Gasoline Engine Management*, Wiley, 3rd edition, 2006, p. 7.

[61] Nunney, Malcolm. *Light and Heavy Vehicle Technology*, Routledge, 4th edition, 2006, p. 219.

[62] Grosse, Christian U., Masayasu Ohtsu. *Acoustic Emission Testing*, Springer, 2008, p. 40.

[63] Janocha, Hartmut. *Actuators: Basics and Applications*, Springer, 2004.

[64] Randall, Robert Bond. *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, Wiley, 1st edition, 2011.

## پی‌نوشت

1. transducers
2. piezoelectric actuators
3. piezoelectric
4. deoxyribonucleic acid (DNA)
5. electric charge
6. piezo or piezein (πιέζειν)
7. electric or electron (ήλεκτρον)

۸. اصطلاحاً به صمغ فسیل‌شدهٔ درختان کهربا گفته می‌شود. معمولاً از این ماده، به‌دلیل رنگ زیبایش، در ساخت انواع جواهرآلات و ادوات زینتی استفاده می‌شود. عمدهٔ کهربای موجود جهان عمری بین سی تا نود میلیون سال دارد. گاهی در داخل کهربا حشرات و حتی پستانداران کوچک به‌دام افتاده از روزگاران پیش از تاریخ نیز یافت می‌شود. کهربا در لغت از دو واژهٔ کاه و ربا ساخته شده و به‌معنای رباینده کاه است. این معنا بدین دلیل برای این ماده به‌کار می‌رود که به‌هنگام مالیدن آن به یک پارچه یا نظیر آن، در سطح کهربا الکتریسیتهٔ ساکن القاء می‌شود و این الکتریسیتهٔ ساکن سبب ربایش کاه می‌گردد. واژهٔ عربی کَهرَبا معرب واژهٔ فارسی کَهرُبـاست که امروزه در زبان عربی به‌معنای الکتریسیته می‌باشد [ویراستار].

9. Paul-Jacques Curie (1856 – 1941)
10. University of Montpellier
11. Pierre Curie (1859 – 1906)
12. crystallography
13. radioactivity
14. lead zirconium titanate
15 direct piezoelectric effect
16. inverse piezoelectric effect
17. ultrasonic sound waves

۱۸. میکروسکوپ پراب پویشی از یک پراب، که روی نمونه حرکت می‌کند، برای بررسی سطح نمونه استفاده می‌کند. با استفاده از این میکروسکوپ علاوه بر توپوگرافی سطح، می‌توان دربارهٔ اصطکاک، خواص مغناطیسی، حرارتی و الاستیسیتهٔ سطح نیز اطلاعاتی به‌دست آورد؛ اطلاعاتی که با استفاده از روش‌های دیگر قابل دستیابی نیستند [ویراستار].

۱۹. میکروسکوپ تونلی روبشی گونه‌ای میکروسکوپ پراب روبشی است که براساس روبش سطح رسانا به‌وسیلهٔ نوک بسیار باریک (در حد چند نانومتر) و تغییر در میزان جریان عبوری برحسب فاصله کار می‌کند. با این میکروسکوپ می‌توان نحوهٔ آرایش اتم‌ها در سطح شبکه را به تصویر کشید. به‌عبارت دیگر تصویر ایجادشده نشان‌دهندهٔ آرایش فضایی نوار رسانش فلز یا نیمه هادی است [ویراستار].

۲۰. میکروسکوپ نیـروی اتمی یا همان میکروسکوپ نیروی پویشی در سال ۱۹۸۶ م اختراع شد. مانند دیگر میکروسکوپ‌های پراب پویشی، میکروسکوپ نیروی اتمی نیز از یک پراب تیز که روی سطح نمونهٔ تحت بررسی حرکت می‌کند، استفاده می‌کند. روی اهرم این میکروسکوپ، یک قطعهٔ بسیار ظریف و حساس وجود دارد که در اثر اعمال نیرو خم می‌شود. با خم‌شدن اهرم، انعکاس نور لیزر روی آشکارساز نوری جابه‌جا می‌شود. بدین ترتیب می‌توان جابه‌جایی نوک اهرم را اندازه‌گیری کرد. چون اهرم در جابه‌جایی‌های کوچک از قانون هوک پیروی می‌کند، از روی جابه‌جایی آن می‌توان نیروی برهم‌کنش نوک و سطح نمونه را به‌دست آورد و با توجه به نیروی بین اتم‌های سطح نمونه و پراب، فاصلهٔ میان نوک اهرم و سطح نمونه، یا همان ارتفاع آن قسمت از نمونه را به‌دست آورد. اصولاً حرکت پراب روی نمونه توسط دستگاه موقعیت‌یاب بسیار دقیقی انجام می‌شود که از سرامیک‌های پیزوالکتریک ساخته می‌شود. این پویشگر توانایی حرکت در مقیاس زیر آنگستروم را دارد [ویراستار].

۲۱. میکروسکوپ نوری روبش میدان نزدیک نوعی میکروسکوپ پراب پویشی است که برای بررسی ساختارهای نانومتری به‌کار می‌رود. اصولاً مطالعهٔ مواد و ساختارها در ابعاد میکرو و نانو به میکروسکوپ‌هایی با قدرت تفکیک بالا نیاز دارد، که به‌دلیل محدودیت پراش حاکم بر میکروسکوپ‌های کلاسیک، دستیابی به این تفکیک با استفاده از این نسل از میکروسکوپ‌ها امکان‌پذیر نیست. در راستای نیل به این هدف میکروسکوپ‌های نوری روبش میدان نزدیک ساخته شدند، که در آنها با بررسی نقطه به نقطهٔ جسم و یا سطح مورد نظر و جمع‌آوری اطلاعات و تحلیل داده‌ها می‌توان به مورفولوژی و خواص سطح نمونهٔ مورد نظر دست یافت. کاربرد عمدهٔ این نسل از میکروسکوپ‌ها مطالعهٔ نمونه‌های زنده است [ویراستار].

22. microthermal analysis
23. Sound Navigation And Ranging (SONAR)

۲۴. پیکاپ یا زخمه‌گاه نام قطعه‌ای از سازهای الکتریکی زهی است که ارتعاشات ایجادشده از سیم‌ها را دریافت و به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند تا از طریق تقویت‌کننده‌های صوتی و بلندگو پخش و یا توسط دستگاه‌های ضبط صدا ذخیره شود. پیکاپ، که معمولاً در آلاتی چون گیتار الکتریک، گیتار بیس و یا ویلون الکتریک استفاده می‌شود، در بخش مرکزی کاسهٔ ساز و اغلب در زیر سیم‌ها (پاره‌ای اوقات در نزدیکی سیم‌ها) نصب می‌شود. پیکاپ‌های متداول امروزی از لحاظ عملکرد، مورد استفاده و جنس صدایی که تولید می‌کنند به دسته‌های مغناطیسی، پیزوالکتریک، مبدل چندگانهٔ انرژی، اپتیکال یا نوری، فعال و غیرفعال دسته‌بندی می‌شوند [ویراستار].

25. pyroelectric effect
26. Carl Linnaeus or Carl von Linné (1707 – 1778)
27. Franz Ulrich Theodor Aepinus (1724 – 1802)
28. René Just Haüy (1743 – 1822)
29. Antoine César Becquerel (1788 – 1878)
30. luminescence
31. Tourmaline

۳۲. کوارتز یا در کوهی از جمله پلی‌مورف‌های سیلیس (اکسید سیلیسیوم) با ساختار بلوری لوزی‌پهلو است. آب‌های داغ دارای محلول‌های $SiO_2$ در شکاف‌ها و درزها سرد می‌شوند و رسوب $SiO_2$ در این مکان‌ها بلورهای زیبای کوارتز را به‌وجود می‌آورند. کوارتز تورمالینی یکی از انواع بسیار جالب و زیبای کوارتز است که رشته‌های تورمالین را در بلور زیبا و شش‌وجهی خود جای داده است. محلول‌های دارای $SiO_2$ می‌توانند در شکاف مرکزی سنگ‌ها رسوب کنند که زمین‌شناسان آنها را ژئود کوارتز می‌نامند. کوارتز به‌خوبی در برابر هوازدگی از خود مقاومت نشان می‌دهد و در دمای تقریبی ۱۶۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد ذوب می‌شود [ویراستار].

۳۳. زبرجد هندی، زمرد شرقی یا توپاز از جمله سنگ‌های قیمتی است. واژهٔ توپاز از واژهٔ یونانی توپازیوس یا توپازیون - که نام جزیرهٔ سنت‌جان در دریای سرخ بوده است - گرفته شده است. معادن این سنگ در این جزیره وجود داشته است. واژهٔ توپاز با کلمهٔ سانسکریت تاپاس به‌معنای آتش یا گرما ارتباط دارد [ویراستار].

۳۴. نمک روشل، یا همان سدیم پتاسیم تتراهیدرات تارترات، نمک بلورین بی‌رنگی است که از آن به‌سبب خواص پیزوالکتریکی‌اش استفاده می‌کنند [۱۱].

35. Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann (1845 – 1921)
36. Woldemar Voigt (1850 – 1919)
37. *Textbook on Crystal Physics*

38. piezoelectric constant
39. Paul Langevin (1872 – 1946)
40. ultrasonic submarine detector
41. Transducer
42. hydrophone
43. ultrasonic transducers
44. Ferroelectric
45. Ferroelectricity
46. Barium titanate
47. Lead zirconium titanate

۴۸. آزمایشگاه‌های بل از جمله مراکز آزمایشی تحقیقاتی مهم و باسابقهٔ ایالات متحدهٔ امریکاست. این مجموعه در سال ۱۹۲۵ م تأسیس شده است. امروزه این آزمایشگاه یکی از بخش‌های مهم تحقیقاتی مؤسسهٔ آلکاتل - لوسنت محسوب می‌شود. آزمایشگاه‌های بل در موری‌هیل، واقع در ایالت نیوجرسی امریکا واقع شده است [ویراستار].

49. quartz crystals
50. piezoceramic filters
51. audio transducers
52. echolocation device
53. electric dipole moment
54. Weiss domains

۵۵. این ماده، که اصطلاحاً برلینیت نیز نامیده می‌شود، ماده‌ای نایاب و از نظر ساختاری، تقریباً شبیه به کوارتز است [ویراستار].

۵۶. این ماده ترکیبی آلی با طعم و مزهٔ شیرین است. به شکل پودری سفیدرنگ و بدون بو است و نقش بسیار مهمی در تغذیهٔ انسان و تأمین انرژی مورد نیاز موجودات زنده دارد. ساکارز در نیشکر و چغندر قند یافت می‌شود [ویراستار].

۵۷. این دسته از مواد معدنی از مجموعهٔ کانی‌ها هستند و انتهای شبکهٔ بلورین آنها در اثر حرارت شارژ الکتریکی تولید می‌کند [ویراستار].

58. Collagen
59. bioelectric
60. biosensor
61. University of Pennsylvania, http://www.upenn.edu (accessed June 8, 2014)

۶۲. باکتری‌خوارها یا همان باکتریوفاژها، که به اختصار فاژ نیز نامیده می‌شوند، اصطلاحاً ویروس‌هایی هستند که به باکتری‌ها حمله می‌کنند و آنها را از بین می‌برند [ویراستار].

63. M13 bacteriophage
64. liquid-Crystal Display (LCD)
65. Lanthanum gallium silicate
66. perovskite structure
67. Sodium tungstate
68. Restriction of Hazardous Substances Directive 2002/95/EC (RoHS)
69. Yasuyoshi Saito
70. Polyvinylidene fluoride
71. PVDF

۷۲. سازمان پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفتهٔ دفاعی یا به اختصار دارپا، تأسیس سال ۱۹۵۸ م، یک سازمان تحقیقاتی زیر نظر وزارت دفاع ایالات متحدهٔ امریکاست. این سازمان مسئولیت توسعهٔ فناوری‌های نوین را برای استفادهٔ ارتش ایالات متحده برعهده دارد. از سال ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۵ م، بیشترین تأکید دارپا بر مسائل مهم ملی همچون فضا و پرتاب موشک‌های بالستیک دفاعی، همچنین تشخیص آزمایش‌های هسته‌ای بوده است. در طول سال ۱۹۶۰ دارپا برنامه‌های فضایی غیرنظامی خود را به ناسا واگذار کرد و برنامه‌های نظامی را در دستور کار خود قرار داد. در سال ۱۹۶۰ م، پس از واگذاری برنامه‌های غیرنظامی، دارپا نقش و زمینهٔ فعالیت خود را بر مجموعهٔ متنوعی از برنامه‌های تحقیقاتی نسبتاً کوچک و اکتشافی متمرکز کرد و در اوائل ۱۹۷۰ م تأکید کرد که برنامه‌های مستقیم انرژی، پردازش اطلاعات و فناوری‌های تاکتیکی را در پیش می‌گیرد. در سال ۱۹۸۰، توجه آژانس در پردازش اطلاعات و برنامه‌های مربوط به هواپیما متمرکز شد [ویراستار].

73. Energy harvesting (also known as power harvesting or energy scavenging)
74. Piezoelectric transformer
75. longitudinal
76. transversal
77. shear
78. Piezoelectric microphones

۷۹. گیتار الکترواکوستیک در ظاهر بسیار به گیتار اکوستیک شباهت دارد، و در واقع تفاوت اصلی آنها در صدای تولیدشدهٔ آنهاست. این تفاوت نیز به‌دلیل ساختار پیشرفته‌تر گیتار الکترواکوستیک نسبت به گیتار اکوستیک است که در داخل آن از مدارهای الکترونیکی استفاده می‌شود. در واقع، قسمت عمدهٔ این تفاوت مربوط به داخل گیتارهای الکترواکوستیک است که در آن از پیکاپ استفاده می‌شود که به‌موجب آن می‌توان از پردازش صدای خام گیتار اکوستیک توسط اجزای دیگر بهره برد [ویراستار].

80. Ultrasonic transducers

81. Nondestructive testing or Non-destructive testing (NDT)

۸۲. آزمون فراصوت از جمله روش‌های متداول آزمون‌های غیرمخرب است. در این روش امواج فراصوت با فرکانس بالا و دامنهٔ کم به‌درون قطعه فرستاده می‌شوند. امواج فراصوت معمولاً امواجی ارتعاشی‌اند که توسط مبدل‌های پیزوالکتریک ایجاد می‌شوند. فرکانس آنها نیز بین ۰/۱ مگاهرتز تا ۵۰ مگاهرتز است. این امواج پس از برخورد به هر گسستگی بازتابیده می‌شوند، قسمتی از آنها به‌سمت حسگر می‌رود و حسگر آن را دریافت می‌کند. از روی دامنه و زمان بازگشت این امواج می‌توان به ویژگی‌های این گسستگی پی برد. از جمله کاربردهای این روش می‌توان به اندازه‌گیری ضخامت و تشخیص عیوب موجود در قطعات اشاره کرد. یکی از امتیازات مهم این روش توانایی آن در تشخیص عیوب بسیار کوچک به‌علت استفاده از فرکانس بالا و در نتیجه طول موج بسیار کوچک است [ویراستار].

۸۳. آزمون رادیوگرافی از جمله آزمون‌های غیرمخرب است. این آزمون اصطلاحاً به استفاده از امواج گاما و ایکس برای بررسی مواد و تشخیص عیوب محصولات گفته می‌شود. در این روش، اشعهٔ ایکس یا رادیواکتیو به‌سمت قطعه هدایت و پس از عبور از آن روی فیلم خاصی منعکس می‌شود. ضخامت و مشخصه‌های داخلی سبب می‌شود تا نقاطی در فیلم تاریک‌تر یا روشن‌تر دیده شوند و از این رهگذر عیوب احتمالی موجود در مواد قابل تشخیص و ردیابی خواهند بود [ویراستار].

84. Ultrasonic transducers
85. single-axis tilt sensing
86. dual-axes tilt sensing

۸۷. آواشیمی به شاخه‌ای از علم شیمی گفته می‌شود که در آن به ویژگی‌های امواج صوتی و برهم‌کنش میان آن امواج و سیستم‌های شیمیایی می‌پردازد [ویراستار].

88. Strain gauge
89. Knock Sensor (KS)
90. knocking or engine knock
91. fuel injection systems
92. manifold absolute pressure
93. Ultrasonic piezo sensors

۹۴. آزمون انتشار امواج صوتی از جمله آزمون‌های غیرمخرب است. هنگامی‌که ماده‌ای جامد تحت تنش قرار می‌گیرد، عیب‌های موجود در آن سبب ایجاد امواج صوتی با فرکانس بالا می‌شوند. این امواج در ماده منتشر می‌شوند و می‌توان توسط حسگرهای خاصی آنها را دریافت کرد و پس از تجزیه و تحلیل، نوع عیب، مکان و شدت آن را تعیین نمود [ویراستار].

95. direct piezo actuators
96. Amplified piezoelectric actuators
97. Brushless DC electric motor
98. Common rail
99. Robert Bosch GmbH, http://bosch.com (accessed June 10, 2014)
100. solenoid valve