

فلکسوالکتریسیته در مواد جامد: سازوکار، تئوری، ضرایب و کاربردها

سید امیرمحمد مناقب^۱، سعید ضیائی‌راد^۲، رضا تیکنی^۳ و*

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

^۲ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

^۳ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

*مسئول مکاتبات: r_tikani@cc.iut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

فلکسوالکتریسیته
کوپلینگ الکترومکانیکی
گرادیان کرنش
پیزوالکتریسیته
ضرایب فلکسوالکتریک
برداشت انرژی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۱۰
تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۲۴

فلکسوالکتریسیته را می‌توان یک اثر جفت‌شدگی الکترومکانیکی کلی بین قطبش الکتریکی و گرادیان کرنش و برعکس، گرادیان میدان الکتریکی و کرنش الاستیک توصیف نمود. این پدیده می‌تواند به‌عنوان یک اثر مرتبه بالاتر نسبت به پیزوالکتریسیته که پاسخ قطبش به کرنش می‌باشد؛ در نظر گرفته شود. به هر حال، در مقیاس نانو، که گرادیان‌های کرنش بزرگ انتظار می‌رود، اثر فلکسوالکتریک قابل توجه است. اثر اندازه‌مربوط به گرادیان نشان می‌دهد که اهمیت اثر فلکسوالکتریک در سیستم‌های میکرو و نانو، قابل مقایسه با پیزوالکتریسیته و حتی فراتر از آن است. به علاوه، فلکسوالکتریسیته برخلاف پیزوالکتریسیته در هر ماده با هر تقارنی یافت می‌شود. این بدان معناست که در مقایسه با پیزوالکتریسیته که در مواد با تقارن مرکزی، نامعتبر و غیرکاراست، آثار فلکسوالکتریسیته در تمامی مواد و سیستم‌های زیستی وجود دارد. این ویژگی‌ها سبب رشد فزاینده علاقه و تحقیقات به فلکسوالکتریسیته در دهه اخیر شده است. هم‌اکنون، در پژوهش‌هایی نقش فلکسوالکتریسیته در فیزیک دی‌الکتریک‌ها مورد بررسی قرار گرفته و برای کاربردهای عملی امیدوارکننده نشان داده است. از طرف دیگر، اختلاف نتایج تئوری و تجربی نشان از درک محدود در این زمینه دارد. این پژوهش به بررسی و مرور دانش فعلی در زمینه فلکسوالکتریسیته در جامدات می‌پردازد.

۱ مقدمه

الکترومکانیکی وابسته به اندازه، به دلیل وجود گرادیان‌های کرنش و میدان الکتریکی، معرفی می‌گردد و کاربردهای زیادی را در مسائل نانو الکترونیک (دارای گرادیان کرنش قوی) نوید می‌دهد [۴-۶]. همان‌طور که انتظار می‌رود اثر پیزوالکتریک در موتورها و حافظه‌های نانو کاربردهای مهمی را در آینده داشته باشد، اثر فلکسوالکتریک نیز ممکن است چنین نقش مهمی را در ساخت این ابزارها ایفا کند.

با وجود توجه بسیار به این موضوع طی سالیان اخیر، فلکسوالکتریسیته هنوز دارای سئوالات، ابهامات و مسائل حل نشده زیادی می‌باشد. در این پژوهش، ضمن معرفی و آشنایی کلی با اثر فلکسوالکتریسیته و روابط حاکم بر آن، بحث‌های تئوری و مطالعات تجربی صورت گرفته روی موضوع مرور می‌گردد. به‌طور مشخص، یک توضیح میکروسکوپی از این اثر ارائه و دلیل اهمیت آن در سیستم‌های کریستالی مقیاس نانو، بیان می‌گردد. پس از تشریح فیزیکی، روش‌های تجربی مهم مورد استفاده برای کمی‌سازی اثر، به لحاظ ضرایب فلکسوالکتریک، خصوصاً در مواد فروالکتریک معرفی می‌گردد. در انتها نیز کاربردهای بالقوه این اثر بیان و یکی از کاربردهای جالب توجه مکانیکی پدیده در برداشت انرژی از ارتعاشات تشریح می‌گردد.

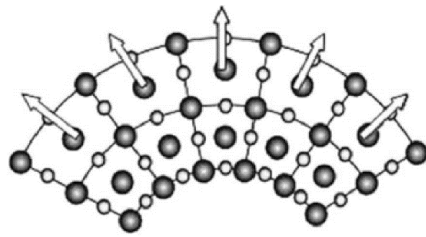
۲ فلکسوالکتریسیته و سازوکار آن در مواد سخت

همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، اثر پیزوالکتریک تنها در ۲۰ گروه نقطه‌ای

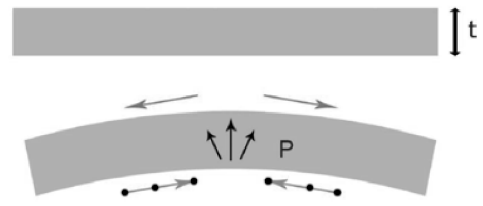
برای مطالعه اثر فلکسوالکتریک^۱ و شناسایی بهتر آن می‌توان از خانواده نزدیکش؛ یعنی اثر پیزوالکتریک^۲ بهره گرفت. در پیزوالکتریسیته به بیان ساده با فشردن یا کشیدگی مواد، میدان الکتریکی داخلی در آنها ایجاد می‌گردد. این اثر و کاربرد آن در بسیاری از مواد و ابزارها به چشم می‌خورد. با اینحال، در کنار این کاربردهای بسیار مفید، یک اشکال مهم نیز وجود دارد که این اثر تنها می‌تواند در حدود ۲۰ ساختار کریستالی با طبقه‌بندی تقارنی خاص وجود داشته باشد. این در حالی است که چنین محدودیتی برای اثر فلکسوالکتریک وجود ندارد و مواد با هر تقارنی قابلیت بروز چنین پدیده‌ای را دارند. این اثر می‌تواند بسیار قوی و مؤثر باشد؛ به‌گونه‌ای که شاید روزی بتوان از آن در نانو حسگرها^۳ یا عملگرهای^۴ نانومتری استفاده کرد. به عنوان توضیح مختصر از این اثر می‌توان اشاره نمود که با خم کردن یک کریستال، لایه‌های اتمی درون آن کشیده می‌شوند و واضح است که بیرونی‌ترین لایه بیشترین کشش را خواهد داشت. این اختلاف کشش در لایه‌های مختلف می‌تواند آن قدر سبب انتقال یون‌ها در کریستال شود که نهایتاً یک میدان الکتریکی در آن ایجاد کند؛ به عبارت دیگر، خم کردن برخی از مواد سبب ایجاد میدان الکتریکی می‌شود؛ پدیده‌ای که به آن اثر فلکسوالکتریک می‌گویند (شکل ۱).

این اثر در همه دی‌الکتریک‌های جامد، غشاهای نرم [۱، ۲] و رشته‌های زیستی [۳] وجود دارد. فلکسوالکتریسیته به‌عنوان اثر جفت‌شدگی

¹flexoelectric ²piezoelectric ³sensor ⁴actuator



(ب)



(الف)

شکل ۱: اثر فلکسوالکتریک: قطبش الکتریکی توسط گرادیان کرنش غیرصفر ایجاد می‌گردد [۷]. (الف) وقتی صفحه‌ای از مواد با ضخامت t خم می‌گردد، گرادیان کرنش غیرصفر به دلیل کرنش‌های فشاری (نقطه پیکان‌ها) و کششی (پیکان‌ها) ایجاد می‌شوند؛ (ب) برای کریستال یونی، یک گشتاور دوقطبی غیرصفر از مراکز چگالی یون‌های منفی و مثبت نتیجه می‌شود

ملاحظات وابسته به طرز استقرار اجزای اتم در فضا می‌باشد، قیاسی ابتدایی به نظر می‌رسد؛ اما با اینحال، به ایده بورسین^۲ و زایکوسکی^۳ [۱۲] نزدیک می‌باشد. آنها معتقدند باید یون Ti مرکزی در پروسکایت فروالکتریک باریم تیتانات^۴ در هنگام خمش به سمت بالا انتقال پیدا کند؛ و برعکس اینکه خمش بایستی به خاطر حضور یون Ti در بالای سلول واحد ظاهر گردد. البته این نکته باید اشاره شود که گرادیان کرنش فقط موقعیت یونی را متأثر نمی‌کند؛ بلکه یک توزیع مجدد و نامتقارن چگالی الکترون نیز اتفاق می‌افتد که در قطبش کل سهمیم است. برای مثال فلکسوالکتریک در گرافن، اغلب توسط این سازوکار کنترل می‌گردد؛ یعنی مؤلفه‌های الکترونی و یونی فلکسوالکتریک مکمل یکدیگرند. در گزارش حاضر از بررسی اثر فلکسوالکتریک در کریستال‌های مایع [۱۳] (در واقع زمینه‌ای که برای نخستین بار توسط ایندنبام و همکاران [۱۴] مطرح و بعداً برای دی‌الکتریک-های جامد پذیرفته شد) و مواد زیستی [۱۵] که از فیزیک‌های مختلف ناشی می‌شوند و کاربردهای مختلفی دارند [۱۶] چشم‌پوشی شده و به اثر فلکسوالکتریک در جامدات پرداخته می‌شود. حال این سؤال مطرح می‌شود که چرا باید به فلکسوالکتریسیت توجه گردد و اهمیت آن در چیست؟ در پاسخ می‌توان گفت خواص الکترومکانیکی نقش حیاتی در فیزیک جامدات و کاربردهای عملی آنها بازی می‌کند. تا دهه‌های اخیر، هنگام اشاره به خواص الکترومکانیکی، غالباً پیزوالکتریسیت^۵ (پاسخ خطی قطبش به کرنش و برعکس) و الکتروستریکشن^۶ (کوپلینگ کرنش و مربع قطبش (یا میدان الکتریکی)) مد نظر بود؛ در حالی که فلکسوالکتریسیت به واسطه ضعف نسبی آن به سختی یاد می‌شد. اما به چند دلیل، این نادیده‌گیری عادلانه نبوده و غیرموجه است؛ از جمله اینکه:

۱. فلکسوالکتریسیت در قیاس با پیزوالکتریسیت یک خاصیت فراگیر با هر تقارن ساختاری است و بنابراین انتخاب موادی که می‌توانند برای حسگرها و عملگرهای الکترومکانیکی استفاده گردند را وسیع می‌کند
۲. ابعاد کاهش یافته، گرادیان بزرگتری را نتیجه می‌دهد؛ بدین معنا که اختلاف کرنش در فاصله کوچک، گرادیان کرنش بزرگتر می‌دهد. مقیاس طول کوچک در فناوری نانو مطرح و بنابراین منجر به افزایش اثر فلکسوالکتریک می‌گردد که در مقیاس نانو ممکن است قابل رقابت با پیزوالکتریسیت باشد
۳. شماری از آزمایش‌ها، ثابت‌های کوپلینگ فلکسوالکتریک قوی را گزارش داده‌اند که چندین برابر بیش از برآوردهای نظری است.

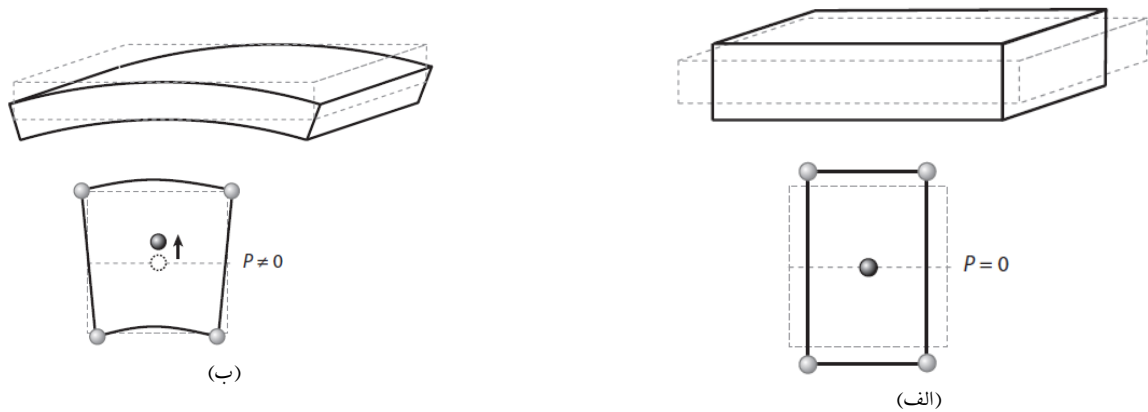
کریستالی با عدم تقارن مرکزی می‌تواند مشاهده شود، در حالی که اثر فلکسوالکتریک در تمامی ۳۲ گروه نقطه‌ای وجود دارد [۸]. با توجه به اینکه بدون ایجاد تغییر شکل پلاستیک دائمی در یک ماده، گرادیان‌های کرنش بزرگ در مقیاس ماکروسکوپی نمی‌تواند ایجاد شود و نیز اعمال تنش همگن به ماده نسبتاً ساده‌تر از تنش ناهمگن است، مشاهده پاسخ پیزوالکتریک آسان‌تر از پاسخ فلکسوالکتریک می‌باشد. با اینحال در شرایطی در نظرگیری این اثر ضرورت دارد که در ادامه به آن اشاره می‌گردد.

فلکسوالکتریسیت خاصیتی در تمام مواد عایق^۱ است که به وسیله این خاصیت، وقتی این مواد در معرض یک تغییر شکل ناهمگن قرار گیرند قطبی می‌شوند. طبق مدل یونی ارائه شده در مطالعات تاجانتسو، به طور کلی چندین عامل در پاسخ القایی مشارکت دارند که عبارت‌اند از فلکسوالکتریک بالک استاتیکی، فلکسوالکتریک بالک دینامیکی و فلکسوالکتریک سطحی. تاکنون، وجود سهم سطح در بلورهای پیچیده مبهم باقی مانده است؛ اما به طور تجربی رابطه مستقیم بین اثر فلکسوالکتریک با حساسیت دی‌الکتریک تأیید شده است [۹، ۱۰]. کوپل فلکسوالکتریک به جای قطبش و کرنش همگن، بین قطبش و گرادیان کرنش است. درک این تفاوت برای فهم مزایا و ویژگی‌های فلکسوالکتریسیت در مقایسه با خانواده نزدیکش؛ یعنی پیزوالکتریسیت حیاتی است. کرنش به خودی خود تقارن مرکزی را نمی‌شکند؛ بدین معنا که اگر ماده‌ای در آغاز دارای تقارن مرکزی است؛ همچنان تحت تغییر شکل همگن متقارن مرکزی می‌ماند. این امر کاملاً واضح است؛ وقتی صفحه‌ای از مواد متقارن مرکزی در معرض تغییر شکل همگن است (شکل ۲الف)؛ ظهور قطبش نمی‌تواند تفسیر و توجیه گردد. در مقابل، گرادیان کرنش تقارن مرکزی را می‌شکند. به عبارت دیگر تحت گرادیان کرنش (مثلاً منتج شده از خمش (شکل ۲ب) دیگر سطوح بالا و پایین معادل نیستند و بنابراین شاخصی از جهت برای بردار قطبش القاشده معرفی می‌گردد. از لحاظ ریاضی، اثر فلکسوالکتریک توسط یک تانسور مرتبه چهار بیان و در مواد با هر تقارنی پذیرفته می‌شود؛ در صورتی که پیزوالکتریسیت توسط تانسور مرتبه سه بیان شده که فقط در مواد غیرمتقارن مرکزی یافت می‌شود.

برای یک شبکه یونی ساده مانند نمونه رسم شده در شکل ۲ب، گرادیان کرنش (مثلاً ایجاد شده توسط خمش) ممکن است باعث گردد که کاتیون مرکزی به اجبار به سمت بالا رانده شود؛ در نتیجه، این امر تقارن مرکزی محلی را می‌شکند و قطبش القا می‌نماید. با توجه به اینکه این مقایسه صرفاً براساس

¹isolator ²bursian ³Zaikovskii ⁴BaTiO3 ⁵piezoelectricity

⁶electrostriction



شکل ۲: نمایش سازوکار میکروسکوپی فلکسوالکتریسیته [۱۱]: (الف) کرنش یکنواخت (مثلاً مربوط به فشار یک بعدی) تقارن مرکزی را نمی شکند و بنابراین در مواد متقارن مرکزی قطبش ایجاد نمی کند؛ (ب) یک گرادیان کرنش (مثلاً مربوط به خمش) تقارن مرکزی را می شکند و منجر به جابه جایی نسبی مراکز بارهای مثبت و منفی و ظهور قطبش در هر ماده ای می گردد

به طوری که در این رابطه E نماینده میدان الکتریکی است. در مدل فلکسوالکتریسیته، توصیف ماکروسکوپی پاسخ فلکسوالکتریک می تواند با تعمیم پتانسیل ترمودینامیکی مورد استفاده برای شرح پاسخ پیزوالکتریک بیان حاصل گردد. بدین منظور کوپلینگ خطی بین قطبش و گرادیان کرنش و برعکس معرفی می شود. در عمومی ترین شکل، چگالی پتانسیل ترمودینامیکی یا به نوعی چگالی آنالپی الکترومکانیکی مناسب برای چنین توصیفی به صورت زیر است [۲۲]:

$$H(\varepsilon_{ij}, E_i, \varepsilon_{jk,l}) = \frac{1}{2} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} - e_{ikl} E_i \varepsilon_{kl} - \mu_{ijkl} E_i \varepsilon_{jk,l} + \frac{1}{2} g_{ijklm} \varepsilon_{ij,k} \varepsilon_{lm,n} - \frac{1}{2} k_{ij} E_i E_j \quad (2)$$

که در آن E میدان الکتریکی است و به صورت $E_i = -\nabla \phi$ تعریف می گردد (ϕ پتانسیل الکتریکی است). نخستین عبارت، پتانسیل الاستیک می باشد که در آن C تانسور مرتبه چهار مدول الاستیک است. کوپلینگ پیزوالکتریک بین کرنش و میدان الکتریکی از طریق عبارت دوم و تانسور مرتبه سوم پیزوالکتریسیته e است. کوپلینگ فلکسوالکتریک بین گرادیان کرنش $\nabla \varepsilon$ و میدان الکتریکی از طریق عبارت سوم است؛ که در آن تانسور فلکسوالکتریک مرتبه چهار μ هر دو اثر فلکسوالکتریک مستقیم و معکوس را دربر دارد [۲۳، ۲۴]. عبارت چهارم پتانسیل الاستیک گرادیان کرنش است که در آن g تانسور الاستیسیته گرادیان کرنش مرتبه شش می باشد؛ g این ترم عموماً در نظر گرفته نمی شود، اما در حضور گرادیان های کرنش قوی با اهمیت است. آخرین عبارت پتانسیل الکتروستاتیکی است که در آن k تانسور مرتبه دوم دی الکتریک است. با صفرگذاشتن ضرایب ترم های گرادیان کرنش، معادلات حالت مواد توسط یک کمیته سازی ساده چگالی پتانسیل در معادله (۲) نسبت به میدان الکتریکی و کرنش حاصل می گردد. این کمیته سازی به معادلات استاندارد خطی الکترومکانیکی پیزوالکتریک منجر می گردد.

$$\hat{D} = -\frac{\partial H}{\partial E} \quad (3)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\partial H}{\partial \varepsilon}$$

این موضوع، با توجه به پیشرفت ها و توسعه های جدید رخ داده طی سال های اخیر، خصوصاً در مواد مقیاس نانو، در حال رشد سریع است. در ابتدا مقدمه کوتاهی درباره نخستین پژوهش های تئوری انجام شده روی فلکسوالکتریسیته ارائه و سپس به بررسی معادلات متشکله و ضرایب این اثر پرداخته می شود.

۳ تاریخچه و تئوری پدیدارشناسانه اثر فلکسوالکتریسیته

پژوهش های تئوری در حوزه فلکسوالکتریسیته به مقالات ابتدایی توسط ماشکویچ^۱ و تولپیکو^۲ برمی گردد [۱۷]، که نخستین بار این اثر را معرفی نمودند. در ادامه کگان^۳ اولین تئوری پدیدارشناسانه را فرمول بندی کرد [۱۸]. اثر فلکسوالکتریک ممکن است پدیده های فیزیکی مختلف را در مواد جامد مانند لایه مرده در خازن های فروالکتریک [۱۹]، پاسخ کوپلینگ الکترومکانیکی وابسته به اندازه نانو ساختارها [۲۰] و قطبش الکتریکی در فروالکتریک ها [۲۱] را توضیح دهد. پس از این توضیح، معادلات متشکله و توصیف پدیدارشناسانه اثر فلکسوالکتریسیته با تأکید بر اختلاف بین پیزوالکتریک و فلکسوالکتریک ارائه می گردد و ضرایب و کاربردهای این اثر تشریح می گردد.

۱.۳ معادلات متشکله

فرمول بندی فیزیکی بنیادی برای تئوری فلکسوالکتریسیته را در بسیاری از مقالات می توان یافت. این پژوهش ها توصیف ریاضی و فیزیکی فلکسوالکتریسیته را فراهم کردند. براساس این تئوری ها، اثر فلکسوالکتریک به عنوان پاسخ خطی قطبش p_i به گرادیان کرنش $\frac{\partial \varepsilon_{jk}}{\partial x_l}$ در غیاب میدان الکتریکی تعریف و با تانسور مرتبه چهار فلکسوالکتریک μ_{ijkl} بیان می شود [۱۱]:

$$\mu_{ijkl} = \left(\frac{\partial P_i}{\partial \left(\frac{\partial \varepsilon_{jk}}{\partial x_l} \right)} \right)_{E=0} \quad (1)$$

¹Mashkevich ²Tolpygo ³Kogan

نانو نمی‌تواند صرف نظر شود. همچنین در بررسی دیگری تیر یک سر گیردار PTZ پیژوالکتریک و BT پاراالکتریک مکعبی برای نمایش تأثیر وابستگی به اندازه اثر فلکسوالکتریسیته انتخاب شده است. وابستگی به اندازه در تیر یک سرگیردار در شکل ۳ ب نشان داده شده است. با وجود اینکه هر دو تیر یک سرگیردار PTZ و BT با کاهش ضخامت پاسخ افزایش یافته را نشان می‌دهد، بهبود و افزایش در تیر یک سرگیردار BT مشهودتر می‌باشد.

۳.۳ ضرایب فلکسوالکتریسیته

کوانگ و همکاران [۲۹] با استفاده از تجزیه هارمونیک و تجزیه کارتان تئوری گروه‌ها، مسئله تعداد و نوع همه تقارن‌های چرخشی تانسور فلکسوالکتریک را بررسی نموده که در جدول ۱ نشان داده شده است. در میان این گروه‌های تقارنی، مواد مکعبی از جذاب‌ترین موارد در کاربردهای عملی است که انتخاب‌های بیشتر مواد در گستره دمایی وسیعی را فراهم می‌نماید.

۴.۳ محاسبه تئوری ضرایب فلکسوالکتریک

گروه شارما با تحقیقاتی در زمینه پیش‌بینی ضرایب فلکسوالکتریک برای کریستال‌های غیرفروالکتریک (KCl, NaCl, ZnS, GaP, GaAs) و کریستال‌های فروالکتریک (STO و BT) به لحاظ تئوری، در این امر پیشگام بوده‌اند [۳۱]. برای کریستال‌های غیرفروالکتریک، ضرایب فلکسوالکتریک حدوداً در بازه $10^{-11} \frac{C}{m} - 10^{-12} \frac{C}{m}$ محاسبه و برای مواد فروالکتریک، نتایج محاسبه حدود $10^{-8} \frac{C}{m} - 10^{-9} \frac{C}{m}$ ملاحظه گردید. تا به حال ضرایب فلکسوالکتریک به صورت تجربی و آزمایشگاهی بسیار اندک اندازه‌گیری شده‌اند. از مشکلات اندازه‌گیری ضرایب فلکسوالکتریک دی الکتریک‌ها، اندازه‌گیری سیگنال‌های الکتریکی کوچک تولیدشده در دی الکتریک‌های بالک یا نیاز به تکنیک‌های ردیابی و بازرسی جدید برای دی الکتریک-های مقیاس نانو می‌توان نام برد. در سال ۱۹۸۶ براساس تئوری دینامیک شبکه، تاجانستو عبارت صریحی برای ضرایب فلکسوالکتریک ارائه داد [۲۸]:

$$\mu_{ijkl} = \chi_{ij} \Upsilon_{kl} \frac{e}{a} \quad (6)$$

که در آن χ حساسیت دی الکتریک، Υ ثابت پارامتر مواد، e بار الکترون و a پارامتر شبکه است. معادله (۶) به‌طور صریح نشان می‌دهد که ضریب فلکسوالکتریک μ به‌طور خطی متناسب با حساسیت دی الکتریک مواد است و این موضوع به این نکته اشاره دارد که پاسخ فلکسوالکتریک بایستی در مواد با ثابت دی الکتریک بالا مانند فروالکتریک‌ها افزایش یابد.

اندازه‌گیری‌های پاسخ فلکسوالکتریک به‌صورت تابع دما مقیاس‌بندی مورد انتظار μ با χ را تأیید می‌کند. با توجه به شکل ۴ برای فاز پاراالکتریک ترکیبات پروسکایت مختلف این امر مشهود بوده، اما برای برخی مواد دیگر همواره برقرار نیست (شکل ۴ ب). براساس پژوهش تاجانستو، استفاده از مواد فروالکتریک برای نشان دادن اثر فلکسوالکتریک این مزیت را دارد که گذردهی الکتریکی ماده بزرگ بوده و وابستگی دمایی قوی حول دمای کوری انتقال فاز نشان می‌دهد. این گذردهی وابسته به دما، مکانیزمی را برای تست وابستگی گذردهی پیشنهادی ضریب فلکسوالکتریک فراهم می‌کند. شکل

با در نظرگیری ترم‌های گرادیان کرنش در چگالی پتانسیل ترمودینامیکی و کمینه‌سازی این پتانسیل، یعنی اعمال معادلات اوپلر، معادلات الکترومکانیکی متشکله بدون اثر پیژوالکتریسیته به‌صورت زیر حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned} \hat{D} &= -\frac{\partial H}{\partial E} \\ \bar{\sigma} &= \frac{\partial H}{\partial \nabla \varepsilon} \end{aligned} \quad (4)$$

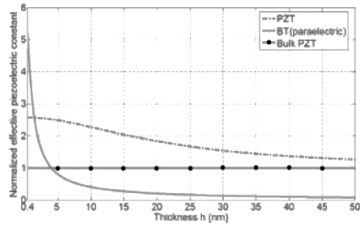
با توجه به توضیحات بالا روابط متشکله کلی با در نظرگیری آثار پیژوالکتریسیته و فلکسوالکتریسیته را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) نوشت:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k + \mu_{lijk} E_{l,k} - g_{ijklmn} \varepsilon_{lm,nk} \\ P_i &= \chi_{ij} E_j + e_{ikl} \varepsilon_{kl} + \mu_{ijk} \varepsilon_{jk,l} \end{aligned} \quad (5)$$

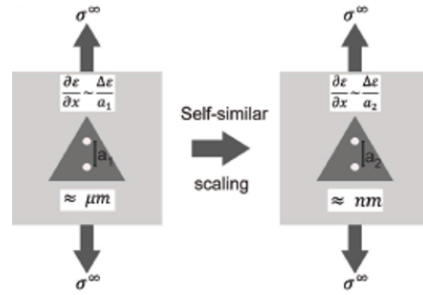
در نخستین معادله از معادلات (۵)، اولین عبارت سمت راست معادله، قانون هوک با ثابت الاستیک C در قطبش ثابت و عبارت دوم پاسخ پیژوالکتریک را نشان می‌دهد. سومین عبارت نشان‌دهنده پاسخ فلکسوالکتریک است. عبارت آخر نیز پاسخ الاستیک گرادیان کرنش را مطرح می‌نماید. در معادله دوم (۵)، عبارت اول پاسخ دی الکتریک با حساسیت دی الکتریک χ ، و عبارات دوم و سوم نیز به ترتیب پاسخ پیژوالکتریک و فلکسوالکتریک مستقیم را توصیف می‌کند. همان‌گونه که از معادله (۵) واضح است؛ عبارت $\mu_{ijk} \varepsilon_{jk,l}$ اثر مشابهی مانند میدان الکتریکی خارجی E روی قطبش دارد؛ به همین دلیل گاهی اوقات آن را میدان فلکسوالکتریک نیز می‌نامند. اثر فلکسوالکتریک به‌صورت $\mu_{klis} = \chi_{is} f_{klsj}$ معرفی می‌گردد [۲۵] که در آن تانسورهای فلکسوالکتریک و کوپلینگ فلکسوالکتریک مرتبط می‌شوند.

۲.۳ مقیاس‌بندی اندازه اثر فلکسوالکتریسیته

اثر مقیاس یا به عبارت دیگر اثر اندازه، پدیده‌های فیزیکی متنوعی را ایجاد می‌کند که در کاربردهای دامنه میکرو و نانو جذاب‌تر و با اهمیت‌تر است. این اثر، رابطه بین پارامترهای فیزیکی و اندازه ویژگی‌های ساختاری را توضیح می‌دهد و بیان می‌دارد که چگونه فیزیک در اندازه‌های مختلف تأثیرگذار است. مثلاً نیروی الکترواستاتیک در مقیاس ماکرو در مقابل سایر نیروها مثل گرانش صرف نظر می‌شود؛ اما با کاهش ابعاد به میکرومتر این نیرو اهمیت می‌یابد. به همین صورت فلکسوالکتریک نیز چنین اثر مقیاس مورد توجهی را هنگام کاهش اندازه از خود نشان می‌دهد، که این امر به دلیل ماهیت وابسته به مقیاس گرادیان کرنش مکانیکی یا گرادیان میدان الکتریکی است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که در سیستم‌های مقیاس نانو، گرادیان کرنش بزرگ می‌باشد و بنابراین اثر فلکسوالکتریسیته بزرگتری را نمایش می‌دهند [۲۶-۲۸]. بحث و بررسی درباره وابستگی به مقیاس اندازه گرادیان کرنش توسط مجدوب و همکاران [۲۷] در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۳ الف مشخص است که دو جزء مثلثی تعبیه‌شده در معرض تنش در دو مقیاس طول مختلف اما با نسبت ابعاد مشابه هستند. واضح است که برای میدان کرنش داده شده، گرادیان کرنش‌ها (و بنابراین اثر فلکسوالکتریک) به‌طور معکوس متناسب با فاصله a_i بین دو نقطه داخل جزء است. این امر بیان می‌دارد که گرادیان کرنش و قطبش ناشی از فلکسوالکتریسیته در مقیاس



(ب)



(الف)

شکل ۳: مقیاس بندی اندازه فلکسوالکتریسیته [۷]؛ الف) تحت تنش مشابه، دو جزء مثالی با مقیاس طول متفاوت، اما با نسبت ابعاد یکسان گرادیان‌های کرنشی ب) ثابت پیزوالکتریک مؤثر تیر یک سرگیردار PTZ و BT. ثابت‌های پیزوالکتریک این دو تیر نسبت به مقدار PZT بالک (خط نقطه) نرمالیزه شده‌اند

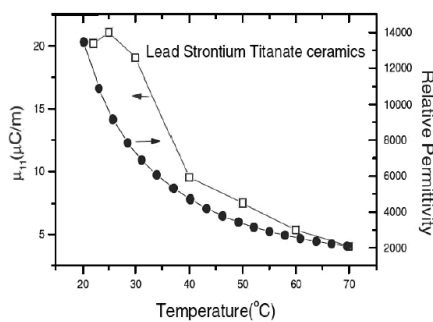
جدول ۱: تعداد مؤلفه‌های مستقل غیرصفر ضرایب فلکسوالکتریک برای مواد جامد در گروه‌های کوری و نقطه‌ای مختلف [۲۹، ۳۰]

گروه‌های نقطه‌ای و کوری	تعداد مؤلفه‌های مستقل μ_{ijkl}
۱ و ۱	۵۴
۲ و m	۲۸ $2/m$
۲۲۲ و mmm و $mm2$	۱۵
۳ و ۳	۱۸
۳۲ و $3m$ و $\bar{3}m$	۱۰
۴ و $\bar{4}m$ و $4/m$	۱۴
$4mm$ و $\bar{4}2m$ و 422 و $4/mmm$	۸
6 و $\bar{6}$ و $6/m$ و ∞ و ∞/m	۱۳
m و ∞/mm و 622 و $6m2$ و $6/mmm$ و $\infty 2$ و ∞	۷
23 و $m3$	۵

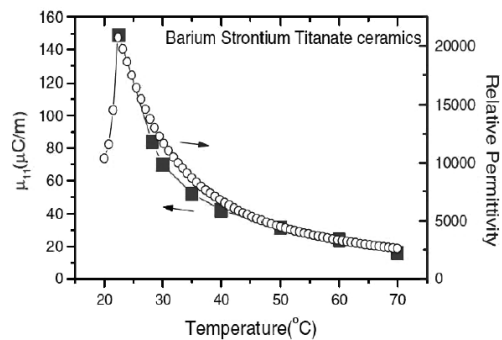
دارد، نتایج مشاهده شده به طور دقیق با توجه به دو ناحیه خطی و غیرخطی قابل انتظار و پیش‌بینی نیست. همچنین برای ناحیه خطی، شیب بزرگتر از مقدار انتظار می‌رود، که در شکل ۵ ج توسط خط نقطه نشان داده شده است. این امر نشان می‌دهد که علاوه بر گذردگی، یک فاکتور مقیاس اضافی که قبلاً نیز به آن اشاره شد، وجود دارد که نیازمند در نظرگیری برای تعیین ضریب فلکسوالکتریک است. به لحاظ تئوری، در مورد پلیمرها، اثر فلکسوالکتریک در موادی مانند PVDF شبیه کریستال‌های مایع و پیچیده‌تر از کریستال‌های جامد می‌باشد. به هر حال، سازوکار اثر فلکسوالکتریک در پلیمرها به طور کامل درک نشده است و هنوز راه طولانی برای عبور از تئوری به کاربردهای مهندسی، با توجه به مشکلات و دشواری‌ها در پژوهش‌های تئوری و تجربی وجود دارد. به طور کلی ضرایب فلکسوالکتریک سرامیک‌ها توسط اندازه دانه،

الف رفتار دی‌الکتریک وابسته به حرارت حول دمای گذار فروالکتریک به پارالکتریک در فروالکتریک‌ها مانند BET را نشان می‌دهد.

در نمونه BET دمای انتقال فاز ۲۱ درجه سانتی‌گراد بوده و واضح است که گذردگی طبق قانون کوری و ایس [۸] به یک مقدار بیشینه در این دما می‌رسد. همان‌گونه که در شکل ۵ ب نشان داده شده، برای یک گرادیان کرنش ثابت، قطبش فلکسوالکتریک القاشده به‌گونه نزدیکی الگوی وابستگی دمایی گذردگی را دنبال می‌کند. باید توجه شود اگرچه یک کوپلینگ خطی بین قطبش القایی و گرادیان کرنش اعمالی مختلف توسط ما و کراس [۹] تأیید شده است، با اینحال نمونه‌های سرامیک مطالعه شده، مشکلاتی را در تفسیر و شرح ضرایب فلکسوالکتریک مربوطه بیان می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۵ ج نشان داده شده است؛ با وجودی که ضریب فلکسوالکتریک با گذردگی رابطه

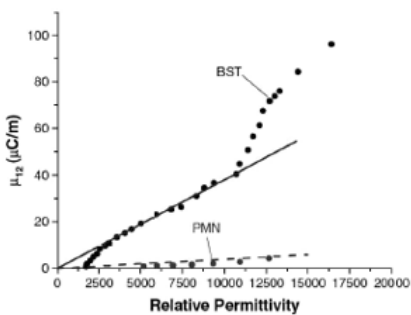


(ب)

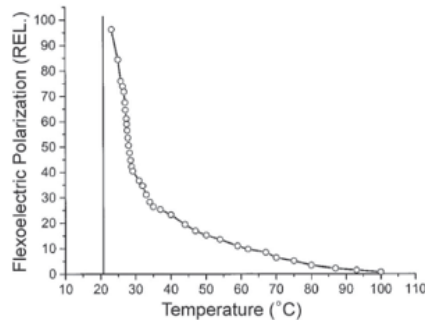


(الف)

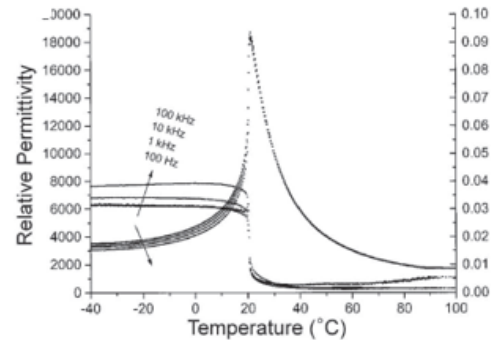
شکل ۴: تکامل دمایی ضریب فلکسوالکتریک طولی مؤثر و رابطه با گذردگی دی‌الکتریک [۱۱] الف) $(Ba,Sr)TiO_3$ ، ب) $(Pb,Sr)TiO_3$ بالای دما کوری



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۵: خواص وابسته به دمای نمونه سرامیک BET [۷]؛ الف) گذردهی نسبی و اتلاف دی الکتریک به صورت تابع دمای سرامیک BET. ب) رسم قطبش فلکسوالکتریک نسبی به صورت تابع دما، ج) ضریب فلکسوالکتریک عرضی مؤثر به صورت تابع گذردهی دی الکتریک نسبی برای PMN و BaSrTiO3 رسم شده است

است. همان‌طور که اشاره شد، برای فهم فلکسوالکتریسیته، اندازه‌گیری ضرایب فلکسوالکتریک دی الکتریک‌ها، عموماً برای دی الکتریک‌های با ثابت دی الکتریک بالا که توسط تئوری دینامیک شبکه پیشنهاد شده است انجام می‌گیرد. با کشش یا فشار یک نمونه هرم ناقص، ضریب فلکسوالکتریک μ_{11} اندازه‌گیری شده است [۳]. ضریب فلکسوالکتریک μ_{12} نیز برای یک سری از فروالکتریک‌های غیرقطبیده توسط خمش نمونه تیر یک سر گیردار اندازه‌گیری شده است [۳۳، ۳۴]. روش خمش چهار نقطه نیز برای اندازه‌گیری ضریب فلکسوالکتریک μ_{12} به کار گرفته شده است [۳۵]. در این پژوهش‌ها، ضرایب فلکسوالکتریک بزرگی که ۴ تا ۵ مرتبه بزرگتر از پیش‌بینی‌های دینامیک شبکه است مشاهده شده است. در ادامه این روش‌ها تشریح می‌شود. در دهه‌های اخیر، انجام آزمایش روی یک سری فروالکتریک‌ها با الهام از ویژگی ذاتی فلکسوالکتریسیته منجر به اطلاعات مناسبی در این زمینه شده است. برای مثال، اثر فلکسوالکتریک در سرامیک‌های پروسکایت مختلف همچون باریوم تیتانات^۱ پارالکتریک و فروالکتریک [۳۴]، باریوم استرانسیم تیتانات^۲ [۹]، سرب منیزم نبوات^۳ [۳۶] و سرب زیرکونات تیتانات^۴ [۳۵] بررسی، مطالعه و اندازه‌گیری شده است. وابستگی دمایی ضرایب فلکسوالکتریک نیز در سرامیک‌های پروسکایت بررسی شده است و این نکته دریافت می‌شود که ضریب فلکسوالکتریک به اوج خود در نقطه انتقال فاز میل می‌کند [۳۴].

۵ اندازه‌گیری ضریب فلکسوالکتریک جانبی

در شکل ۶ شماتیک آزمایشگاهی رایج برای اندازه‌گیری ضریب فلکسوالکتریک جانبی نمایش داده شده است. آزمایش‌ها در دمای بالاتر از دمای کوری انجام شده است که در این حالت مواد در فاز پارا الکتریک هستند و بنابراین اثر پیزوالکتریک حذف می‌گردد. برای مطالعات آزمایشگاهی، مواد بالک به صورت تیر یک سرگیردار ماشینکاری شده و یک بلندگوی صدا یا یک عملگر برای تحریک تیر در انتهای آزاد قرار داده می‌شود. هنگامی که تیر خم می‌شود، توزیع خطی کرنش محوری در طول ضخامت، باعث القای قطبش الکتریکی می‌شود که می‌تواند با اتصال الکترودها جمع‌آوری گردد. سیم به الکترودهای روی سطح نمونه برای آشکارسازی جریان متصل می‌شود و

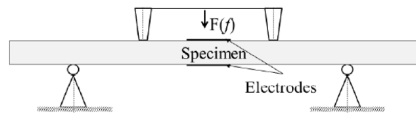
دما و فرکانس بار تحت تأثیر قرار می‌گیرد و بررسی‌های قاعده‌مند برای تحلیل این عوامل نیاز است.

۴ اندازه‌گیری تجربی ضرایب فلکسوالکتریک مواد فروالکتریک

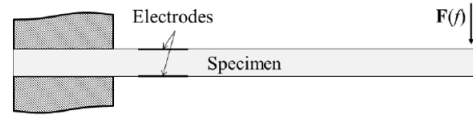
به منظور تخمین اندازه و مقدار اثر فلکسوالکتریک در یک ماده، نخست نیاز به شناسایی مقدار ضرایب فلکسوالکتریک است. از جمله مسائل بحث برانگیز در این زمینه مربوط به مقدار ضرایب فلکسوالکتریک اندازه‌گیری شده به صورت تجربی است که از تخمین‌های تئوری تا حد زیادی فراتر است و پراکندگی گسترده‌ای در میان اندازه‌گیری‌های تجربی وجود دارد. به عبارت دیگر گرچه دینامیک شبکه مقادیر خیلی کوچک ضرایب فلکسوالکتریک را پیش‌بینی می‌کند؛ تحلیل‌ها این موضوع را نشان داده‌اند که فلکسوالکتریسیته به خصوص در جایی که گرادیان‌های کرنش قوی وجود دارد؛ نقش مهمی در افزایش اثر کوپلینگ الکترومکانیکی بازی می‌کند [۲۷، ۳۷].

گذشته از این با برخی تحلیل‌های تجربی مانند تکنیک‌های دینامیک فرکانس کم یا شبه‌استاتیک به همراه پیکربندی خمش چهار نقطه برای اندازه‌گیری ضرایب فلکسوالکتریک موادی چون باریوم تیتانات، این نکته دریافت می‌شود که ضریب فلکسوالکتریک می‌تواند به $10^{-4} \frac{C}{m}$ برسد که ۴ تا ۵ مرتبه بزرگتر از پیش‌بینی‌های دینامیک شبکه یعنی حدود $10^{-10} \frac{C}{m}$ است. در این بخش، خلاصه‌ای از پژوهش‌های تجربی به منظور کشف و کاوش ضرایب فلکسوالکتریک مواد با گذردهی دی الکتریک بالا ارائه می‌گردد. همان‌گونه که ذکر شد، ممکن است هر دو اثر فلکسوالکتریک و پیزوالکتریک در تولید قطبش الکتریکی مشارکت کنند. بنابراین نخست نیاز است به مطالعه مواد غیرپیزوالکتریک (مفقارن مرکزی) به منظور مشاهده قطبش القاشده منحصراً توسط اثر فلکسوالکتریک پرداخته شود. در میان ۱۲ گروه نقطه‌ای مقفاران مرکزی، گروه‌های مورد توجه خاص برای مطالعه اثر فلکسوالکتریک، انواع مواد دارای شبکه‌های کریستالی مکعبی هستند (دسته $m\bar{3}m$ و $4\bar{3}2$). در این مواد، تانسور ضرایب فلکسوالکتریک مربوطه از ساده‌ترین حالات بوده و دارای سه مؤلفه غیرصفر طولی، عرضی و برشی

¹BT ²BST ³PMN ⁴PZT



(ب)



(الف)

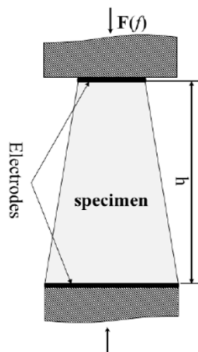
شکل ۶: شماتیک اندازه‌گیری تجربی ضریب فلکسو الکتریک $\mu_{۱۲}$ با روش‌های خمش [۳۸]: (الف) روش خمش تیر یک سر گیردار (ب) روش خمش چهار نقطه

ضرایب فلکسو الکتریک و پارامترهای مواد برخی سرامیک‌های مختلف برای نمونه در جدول ۲ آورده شده است. این پژوهش‌ها علاوه بر اثبات اثر فلکسو الکتریک به وسیله آزمایش، نشان می‌دهد که ضریب فلکسو الکتریک برای سرامیک‌های ثابت دی الکتریک بالا، ۴ تا ۵ مرتبه بزرگتر از پیش‌بینی‌ها توسط تئوری دینامیک شبکه است. همچنین ضرایب فلکسو الکتریک در سرامیک‌ها با حساسیت دی الکتریک بالا افزایش می‌یابد، که این مورد با پیش‌بینی‌های تئوری دینامیک شبکه مطابقت خوبی دارد. با الهام از پژوهش‌های کراس و پیش‌بینی دینامیک شبکه، مواد مرکب فرو الکتریک با حساسیت دی الکتریک بالا ساخته شده است. ضرایب فلکسو الکتریک بزرگی در این مواد مرکب مشاهده می‌شود [۴۰].

با وجود تلاش‌های بسیاری که روی اندازه‌گیری ضریب فلکسو الکتریک فرو الکتریک‌ها انجام شده است؛ هنوز پژوهش‌چندانی در زمینه اندازه‌گیری ضریب $\mu_{۲۴}$ صورت نگرفته است.

۷ کاربردهای بالقوه و مزایای فلکسو الکتریسیته

تاکنون کاربردهای بالقوه متعددی براساس اثر فلکسو الکتریک پیشنهاد شده است که در ادامه به یکی از کاربردهای جذاب پدیده در ارتعاشات؛ یعنی برداشت انرژی اشاره و کاربردهای دیگر به اجمال بیان می‌گردد.



شکل ۷: شماتیک اندازه‌گیری تجربی ضریب فلکسو الکتریک $\mu_{۱۱}$ با روش فشردن سازی نمونه هرم ناقص [۳۸]

جدول ۲: ضریب فلکسو الکتریک مواد مختلف در دمای اتاق [۳۸]

ماده	ضریب فلکسو الکتریک $(10^{-6} C/m)$	پارامتر ماده (γ)	حساسیت دی الکتریک نسبی (χ/ϵ_0)
PMN	$\mu_{۱۲} = 4$	۰/۶۵	≈ 13000
BST	$\mu_{۱۲} = 100$	۹/۳	≈ 20000
PZT	$\mu_{۱۲} = 2$	۰/۵۷	≈ 2200
BT	$\mu_{۱۲} = 5$	۱۱/۴	≈ 10000
BST	$\mu_{۱۱} = 120$	۹/۳	≈ 20000

جابه‌جایی نمونه با یک مبدل جابه‌جایی رصد می‌گردد. ضریب فلکسو الکتریک $\mu_{۱۲}$ با روش‌های خمش تیر برای سرامیک‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. ارتباط بین قطبش القایی و جریان در مدار الکتریکی خارجی با رابطه $P_i = i/2\pi f A$ محاسبه می‌شود، که در آن i جریان الکتریکی اندازه‌گیری شده، f فرکانس محرک بار اعمالی توسط بلندگو و A سطح الکترودهای سطوح بالا و پایین می‌باشد [۳۷]. اثر فلکسو الکتریک نمونه به صورت رابطه (۷) ساده می‌شود:

$$P_f = \mu_{۱۲} \frac{\partial \epsilon_{۱۱}}{\partial x_3} \quad (7)$$

به طوری که در این رابطه $\mu_{۱۲}$ ضریب فلکسو الکتریک عرضی است. با توجه به توضیحات داده شده، ضریب فلکسو الکتریک نمونه می‌تواند از گرادیان کرنش اعمالی و جریان مشاهده شده به صورت رابطه (۸) تخمین زده شود:

$$\begin{aligned} \mu_{۱۲} &= \frac{i}{2\pi f A} \left(\frac{\partial \epsilon_{۱۱}}{\partial x_3} \right)^{-1} \\ &= P_f \left(\frac{\partial \epsilon_{۱۱}}{\partial x_3} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

۶ اندازه‌گیری ضریب فلکسو الکتریک طولی

ضریب فلکسو الکتریک $\mu_{۱۱}$ نیز برای سرامیک‌های مختلف با کشش یا فشار نمونه‌های هرم ناقص اندازه‌گیری شده است. شکل ۷ شماتیک مجموعه برای انجام آزمایش را نشان می‌دهد. این شکل هندسی مخصوص به منظور تولید گرادیان کرنش هنگام اعمال تنش طراحی شده است. گرادیان کرنش متوسط از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$\left. \frac{\partial \epsilon_{۱۱}}{\partial x_1} \right|_{av} = \frac{\Delta \epsilon_{۱۱}}{\Delta x_1} \Big|_{av} = \frac{\epsilon_{۱۱}^u - \epsilon_{۱۱}^l}{h} \quad (9)$$

قطبش الکتریکی با استفاده از جریان الکتریکی اندازه‌گیری شده در مدار الکتریکی خارجی طبق رابطه قبل محاسبه می‌شود. با توجه به تعریف اثر فلکسو الکتریسیته می‌توان نوشت:

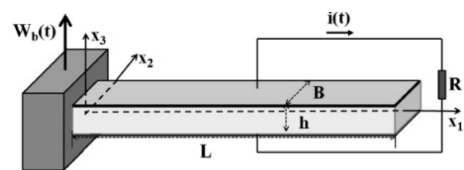
$$P_l = \mu_{۱۱} \frac{\partial \epsilon_{۱۱}}{\partial x_1} \quad (10)$$

به طوری که $\mu_{۱۱}$ ضریب فلکسو الکتریک طولی است. پس از اندازه‌گیری جریان الکتریکی و محاسبه گرادیان کرنش متوسط، ضریب فلکسو الکتریک به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\mu_{۱۱} = \frac{P_l}{\left. \frac{\partial \epsilon_{۱۱}}{\partial x_1} \right|_{av}} \quad (11)$$

۱.۷ برداشت انرژی

بررسی اثر فلکسوآلکتریسیته با هدف برداشت انرژی^۱ از ارتعاشات مکانیکی برای وسایل میکرو و نانو یکی از موارد مورد علاقه پژوهشگران و راهی جذاب برای تأمین منابع وسایل میکرو و نانو خودتوان می‌باشد. در مقیاس نانو، خواص مواد مقیاس‌بندی قوی با اندازه نشان می‌دهد. دنگ و ارتورک به بررسی تئوری و محاسباتی برداشت انرژی فلکسوآلکتریک تحت تحریک هارمونیک در تیر اویلر برنولی پرداختند. پژوهش آنها براساس چارچوبی ریاضی برای کوپلینگ دوطرفه فلکسوآلکتریک انجام شده است. در این مطالعه قانون متشکله خطی برای توصیف رفتار الاستیک، دی‌الکتریک و فلکسوآلکتریک در ماده استفاده شده است. استخراج معادلات اویلر لاگرانژ برای فلکسوآلکتریک با اصل حساب تغییرات در پژوهش آنها صورت پذیرفته و در نهایت حل معادلات حاکم و شبیه‌سازی پاسخ فرکانسی با روش مودهای فرضی انجام شده است [۴۱]. پژوهش آنها نشان می‌دهد که به‌طور کلی چگالی توان خروجی و بازده تبدیل وقتی که ضخامت لایه از مقیاس میکرو به سمت نانو کاهش داده شود، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، بازده تبدیل در مبدل فلکسوآلکتریک در سطوح ضخامت زیر میکرون، افزایش دو اردر مقداری در برابر کاهش یک اردر مقداری ضخامت را نشان داد. با توجه به توضیحات، برداشت انرژی فلکسوآلکتریک به‌عنوان جایگزین مناسب برای پیروآلکتریک در مقیاس نانو مطرح شده است.



شکل ۸: شماتیک برداشت‌گر انرژی فلکسوآلکتریک [۴۱]

در پژوهشی دیگر وانگ و همکاران [۴۲] مدل تحلیلی برای برداشت‌گر انرژی پیروآلکتریک اویلر - برنولی تک شکل شامل اثر فلکسوآلکتریک را توسعه دادند. پژوهش آنها در مقیاس نانو با طول و موقعیت دلخواه لایه پیروآلکتریک و اتصال جرم به نوک تیر انجام شد. حل بسته تقریبی برای بررسی ولتاژ خروجی، توان و مقاومت بار بهینه به‌دست آورده شده است. نتایج نشان داد که تأثیر اثر فلکسوآلکتریک روی خروجی ولتاژ و خروجی توان برای ضخامت کوچک لایه پیروآلکتریک مهم است. در برخی موارد، خروجی توان بیشینه مدل با اثر فلکسوآلکتریک تقریباً دوازده برابر مدل کلاسیک که تنها دارای اثر پیروآلکتریک است می‌باشد. همچنین در این پژوهش راه‌کارهایی برای افزایش بازده مجموعه مانند جرم نوک، طول مناسب لایه و موارد دیگر پیشنهاد شده است. این پژوهش راهنمای مناسبی برای تحلیل نانوتیر فلکسوآلکتریک فراهم آورده و نیز برای فهم پاسخ الکترومکانیکی در مقیاس نانو و طراحی وسایل دی‌الکتریک مفید است.

وانگ و همکاران [۴۳]، در پژوهش دیگری مدل تئوری شامل تغییرشکل غیرخطی هندسی و اثر دمپینگ را برای برداشت انرژی فلکسوآلکتریک توسعه دادند. این مدل می‌تواند رفتار الکترومکانیکی برداشت‌گر انرژی را دقیق‌تر پیش‌بینی نماید. دو نوع برداشت‌گر انرژی یک‌سر گیردار عمومی‌تر یعنی

برداشت‌گر تک‌لایه و تک شکل استخراج و مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه پژوهش آنها نشان داد که در برخی موارد، خروجی ولتاژ ناشی از اثر فلکسوآلکتریک به‌شدت (مثلاً ۵ برابر) بزرگتر از اثر پیروآلکتریک به‌تنهایی است. استفاده از این پدیده در کاربرد برداشت انرژی به‌دلایل زیر قابل توجه است:

۱. پیروآلکتریک فقط در مواد خاصی وجود دارد و در دماهای بالا عملکرد آن به خطر می‌افتد؛ اما در فلکسوآلکتریک امکان برداشت انرژی در دمای بالا برخلاف پیروآلکتریک وجود دارد؛ و مقاومت این اثر در دماهای بالاتر از دمای کوری برای فروآلکتریک‌های دارای کوپلینگ الکترومکانیکی بالا مناسب است
 ۲. این پدیده در تأمین انرژی وسایل میکرو و نانو بسیار مناسب و چگالی توان بالایی را ارائه می‌دهد
 ۳. امکان برداشت انرژی از تیر تک‌لایه با مقطع متقارن با استفاده از این اثر وجود دارد که در پیروآلکتریک این امکان وجود ندارد و لازم است تیر با لایه‌های نامتقارن باشد
 ۴. وسعت انتخاب مواد و کاربرد در همه‌دی‌الکتریک‌ها از جمله مواد آمورف یا مواد زیستی نرم با اهمیت است
- با توجه به موارد مطرح‌شده می‌توان نتیجه گرفت برداشت انرژی بر پایه اثر فلکسوآلکتریسیته مزایای زیادی دارد و می‌تواند در آینده رقیبی برای برداشت‌گرهای نانویروآلکتریک محسوب گردد. از دیگر کاربردهای این پدیده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. مهندسی گرایان کرنش و کاربرد بالقوه در حافظه‌های فروآلکتریک
۲. تغییر قطبش مکانیکی
۳. نانومولد فلکسوآلکتریک
۴. کاربردهای حسگری و عملگری مانند شتاب‌سنج‌های میکرو و نانو و میکروعملگرها
۵. کاربردهای زیستی

براساس این موارد مشاهده می‌شود که کاربردهای بالقوه متعددی براساس اثر فلکسوآلکتریک مانند بازرسی و اکتشاف انحاء توسط حسگرها و عملگرهای فلکسوآلکتریک وجود دارد [۴۴-۴۶]. پایش وضعیت و سلامت سازه‌ها در ساختارهای مکانیکی، عمران و شهرسازی، کشتی‌سازی، حمل‌ونقل هوایی و هواپیمایی نکته مهمی است. عیوب سیستم مانند ترک‌ها می‌تواند باعث خرابی شوند.

فناوری عیب‌یابی موجود زمان‌بر، گران و کم‌دقت می‌باشند، لذا محققان و سرمایه‌گذاران همواره در پی راندمان بالا و سیستم‌های پایش سلامت سازه‌های کم‌هزینه هستند. توزیع گرایان کرنش به‌طور ناگهانی در مجاورت ترک‌ها به‌خاطر تمرکز تنش تغییر می‌کند. گرایان کرنش در مجاورت ترک می‌تواند براساس اثر فلکسوآلکتریک اندازه‌گیری شود. روش جدیدی بر اساس اثر فلکسوآلکتریک برای پایش سلامت سازه‌ها و بازرسی ترک توسط هوانگ و همکاران [۴۷] با اتصال حسگرهای گرایان کرنش در همسایگی ترک و اندازه‌گیری بار تولیدشده بر اثر فلکسوآلکتریک برای پیش‌بینی موقعیت ترک پیشنهاد شده است.

¹energy harvesting

۸ نتیجه‌گیری

فلکسوالکتریسیته به‌عنوان اثر کوپلینگ الکترومکانیکی کلی، توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است و از لحاظ پدیدارشناسی کوپلینگ بین قطبش الکتریکی و گرادیان کرنش و گرادیان میدان الکتریکی و تنش را توصیف می‌کند. فلکسوالکتریسیته نقش مهمی در تعیین پاسخ الکتروالاستیک ساختارهای مقیاس نانو بازی می‌کند. در این مرور، ضمن تشریح کلیات مربوط به پدیده فلکسوالکتریسیته، به تشریح سازوکار اثر فلکسوالکتریکی و ایجاد قطبش توسط گرادیان کرنش پرداخته شد. پس از آن به ارائه دلائلی در خصوص لزوم در نظرگیری این اثر خصوصاً در مقیاس نانو اشاره شد. در ادامه تاریخچه مختصری از نخستین پژوهش‌های تئوری انجام‌شده در این زمینه ذکر و معادلات متشکله الکترومکانیکی حاکم بر مواد فلکسوالکتریکی بیان گردید. آشنایی با ضرایب فلکسوالکتریسیته، انواع آن و روش‌های تئوری و تجربی جهت اندازه‌گیری این ضرایب از دیگر موارد مطرح شده در این پژوهش بود. نکته قابل توجه مقادیر بسیار بزرگتر (۴ تا ۵ مرتبه در برخی مواد) برخی ضرایب اندازه‌گیری شده توسط آزمایش‌های تجربی نسبت به تخمین‌های تئوری برای ضرایب فلکسوالکتریکی بود. با توجه به توضیحات، فلکسوالکتریسیته نه تنها جایگزینی برای پیزوالکتریسیته در مقیاس نانو است؛ که ویژگی‌های الکترومکانیکی اضافی را ممکن می‌سازد که در غیر این صورت در دسترس نیست. در نهایت برخی کاربردهای بالقوه و مزایای این اثر در حسگرها، عملگرهای فلکسوالکتریکی، پایش وضعیت، بازرسی ترک و برداشت انرژی بیان گردید.

مراجع

- [9] W. Ma, L. E. Cross, Flexoelectric polarization of barium strontium titanate in the paraelectric state, *Applied Physics Letters*, Vol. 81, pp. 3440-3442, 2002.
- [10] P. Zubko, G. Catalan, A. Buckley, P. Welche, J. Scott, Strain-gradient-induced polarization in SrTiO₃ single crystals, *Physical Review Letters*, Vol. 99, p. 167601, 2007.
- [11] P. Zubko, G. Catalan, A. K. Tagantsev, Flexoelectric effect in solids, *Annual Review of Materials Research*, Vol. 43, pp. 387-421, 2013.
- [12] E. Bursian, Z. Oi, Changes in curvature of a ferroelectric film due to polarization, *Soviet Physics Solid State*, Vol. 10, pp. 1121-1124, 1968.
- [13] R. B. Meyer, Piezoelectric effects in liquid crystals, *Physical Review Letters*, Vol. 22, p. 918, 1969.
- [14] V. Indenbom, E. Loginov, M. Osipov, Flexoelectric effect and crystal-structure, *Kristallografiya*, Vol. 26, pp. 1157-1162, 1981.
- [15] A. G. Petrov, Electricity and mechanics of biomembrane systems: flexoelectricity in living membranes, *Analytica Chimica Acta*, Vol. 568, pp. 70-83, 2006.
- [16] A. Buka, N. Éber, *Flexoelectricity in Liquid Crystals: Theory, Experiments and Applications*, World Scientific, 2012.
- [17] V. Mashkevich, K. Tolpygo, Electrical, Optical and Elastic Properties of Diamond Type Crystal. 1, *Soviet Physics Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol. 5, pp. 435-439, 1957.
- [18] S. M. Kogan, Piezoelectric effect during inhomogeneous deformation and acoustic scattering of carriers in crystals, *Soviet Physics-Solid State*, Vol. 5, pp. 2069-2070, 1964.
- [19] R. Maranganti, M. Majdoub, P. Sharma, Flexoelectricity in nanostructures and ramifications for the dead-layer effect in nanocapacitors and giant piezoelectricity, *American Physical Society March Meeting Abstracts*, 2009.
- [20] X. Liang, S. Hu, S. Shen, Effects of surface and flexoelectricity on a piezoelectric nanobeam, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, p. 35020, 2014.
- [21] G. Catalan, A. Lubk, A. Vlooswijk, E. Snoeck, C. Magen, A. Janssens, et al., Flexoelectric rotation of polarization in ferroelectric thin films, *Nature Materials*, Vol. 10, pp. 963-967, 2011.
- [22] A. Abdollahi, C. Peco, D. Millán, M. Arroyo, G. Catalan, I. Arias, Fracture toughening and toughness asymmetry induced by flexoelectricity, *Physical Review B*, Vol. 92, p. 94101, 2015.
- [23] N. Sharma, C. Landis, P. Sharma, Piezoelectric thin-film superlattices without using piezoelectric materials, *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, p. 24304, 2010.
- [24] N. Sharma, C. Landis, P. Sharma, Erratum: Piezoelectric thin-film super-lattices without using piezoelectric materials, *Journal of Applied Physics*, Vol. 111, p. 59901, 2012.
- [25] P. Yudin, A. Tagantsev, Fundamentals of flexoelectricity in solids, *Nanotechnology*, Vol. 24, p. 432001, 2013.
- [26] W. Ma, Flexoelectric charge separation and size dependent piezoelectricity in dielectric solids, *Physica Status Solidi (b)*, Vol. 247, pp. 213-218, 2010.
- [1] Q. Deng, L. Liu, P. Sharma, Flexoelectricity in soft materials and biological membranes, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 62, pp. 209-227, 2014.
- [2] A. G. Petrov, Flexoelectricity of model and living membranes, *Biochimica et Biophysica Acta-Biomembranes*, Vol. 1561, pp. 1-25, 2002.
- [3] J. Y. Fu, W. Zhu, N. Li, L. E. Cross, Experimental studies of the converse flexoelectric effect induced by inhomogeneous electric field in a barium strontium titanate composition, *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, p. 24112, 2006.
- [4] Q. Fu, Z. Y. Zhang, L. Kou, P. Wu, X. Han, X. Zhu, et al., Linear strain-gradient effect on the energy bandgap in bent CdS nanowires, *Nano Research*, Vol. 4, pp. 308-314, 2011.
- [5] D. Lee, S. M. Yang, J.-G. Yoon, T. W. Noh, Flexoelectric rectification of charge transport in strain-graded dielectrics, *Nano Letters*, Vol. 12, pp. 6436-6440, 2012.
- [6] M. Majdoub, R. Maranganti, P. Sharma, Understanding the origins of the intrinsic dead layer effect in nanocapacitors, *Physical Review B*, Vol. 79, p. 115412, 2009.
- [7] T. D. Nguyen, S. Mao, Y. W. Yeh, P. K. Purohit, M. C. McAlpine, *Nanoscale flexoelectricity*, *Advanced Materials*, Vol. 25, pp. 946-974, 2013.
- [8] F. Jona, G. Shirane, *Ferroelectric Crystals*, Pergamon Press, 1963.

- [44] S. Hu, H. Li, H. Tzou, Static nano-control of cantilever beams using the inverse flexoelectric effect, ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Denver, Colorado, USA November 11-17, 2011.
- [45] S. R. Kwon, W. Huang, S. Zhang, F. G. Yuan, X. Jiang, Flexoelectric sensing using a multilayered barium strontium titanate structure, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, p. 115017, 2013.
- [46] X. Yan, W. Huang, S. R. Kwon, S. Yang, X. Jiang, F.-G. Yuan, A sensor for the direct measurement of curvature based on flexoelectricity, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, p. 85016, 2013.
- [47] W. Huang, S. Yang, N. Zhang, F.-G. Yuan, X. Jiang, Cracks monitoring and characterization using Ba_{0.64}Sr_{0.36}TiO₃ flexoelectric strain gradient sensors, Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, California, USA, March 8-9, 2014.
- [27] M. Majdoub, P. Sharma, T. Cagin, Enhanced size-dependent piezoelectricity and elasticity in nanostructures due to the flexoelectric effect, *Physical Review B*, Vol. 77, p. 125424, 2008.
- [28] A. Tagantsev, Piezoelectricity and flexoelectricity in crystalline dielectrics, *Physical Review B*, Vol. 34, p. 5883, 1986.
- [29] H. Le Quang, Q.-C. He, The number and types of all possible rotational symmetries for flexoelectric tensors, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, London, 2011.
- [30] L. Shu, X. Wei, T. Pang, X. Yao, C. Wang, Symmetry of flexoelectric coefficients in crystalline medium, *Journal of Applied Physics*, Vol. 110, p. 104106, 2011.
- [31] R. Maranganti, P. Sharma, Atomistic determination of flexoelectric properties of crystalline dielectrics, *Physical Review B*, Vol. 80, p. 54109, 2009.
- [32] R. Maranganti, N. Sharma, P. Sharma, Electromechanical coupling in nonpiezoelectric materials due to nanoscale non-local size effects: Green's function solutions and embedded inclusions, *Physical Review B*, Vol. 74, p. 14110, 2006.
- [33] W. Ma, L. E. Cross, Flexoelectric effect in ceramic lead zirconate titanate, *Applied Physics Letters*, Vol. 86, p. 72905, 2005.
- [34] W. Ma, L. E. Cross, Flexoelectricity of barium titanate, *Applied Physics Letters*, Vol. 88, p. 2902, 2006.
- [35] W. Ma, L. E. Cross, Strain-gradient-induced electric polarization in lead zirconate titanate ceramics, *Applied Physics Letters*, Vol. 82, pp. 3293-3295, 2003.
- [36] W. Ma, L. E. Cross, Observation of the flexoelectric effect in relaxor Pb (Mg_{1/3}Nb_{2/3}) O₃ ceramics, *Applied Physics Letters*, Vol. 78, pp. 2920-2921, 2001.
- [37] L. E. Cross, Flexoelectric effects: Charge separation in insulating solids subjected to elastic strain gradients, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 53-63, 2006.
- [38] J. Lu, X. Liang, S. Hu, Flexoelectricity in solid dielectrics: from theory to applications, CMC: Computers, *Materials & Continua*, Vol. 45, pp. 145-162, 2015.
- [39] Y. Li, L. Shu, Y. Zhou, J. Guo, F. Xiang, L. He, et al., Enhanced flexoelectric effect in a non-ferroelectric composite, *Applied Physics Letters*, Vol. 103, p. 142909, 2013.
- [40] L. Shu, F. Li, W. Huang, X. Wei, X. Yao, X. Jiang, Relationship between direct and converse flexoelectric coefficients, *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, p. 144105, 2014.
- [41] Q. Deng, M. Kammoun, A. Erturk, P. Sharma, Nanoscale flexoelectric energy harvesting, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, pp. 3218-3225, 2014.
- [42] K. Wang, B. Wang, An analytical model for nanoscale unimorph piezoelectric energy harvesters with flexoelectric effect, *Composite Structures*, Vol. 153, pp. 253-261, 2016.
- [43] K. Wang, B. Wang, Non-linear flexoelectricity in energy harvesting, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 116, pp. 88-103, 2017.