

طراحی سازه های فضا کار پاشامی هوشمند و تاثیر متقابل آن بر معماری

سلوی کی نژاد¹؛ دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز،

۰۴۱۱-۵۵۳۹۲۰۷، salva_kd@yahoo.com

یاسر شهبازی²؛ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز،

۰۴۱۲-۳۴۴۴۳۴۴، y_shahbazi@sut.ac.ir

محمدرضا چناقلو³؛ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز،

۰۴۱۲-۳۳۲۴۹۵۷، mrchenaghrou@sut.ac.ir

چکیده

امروزه سازه های فضا کار پاشامی (Membrane Space Structures) کاربرد وسیعی در پوشش دهانه های بزرگ و پروژه های معماری پیدا کرده است. یکی از محدودیت های این سازه ها، که می تواند عملکرد آنها را تحت تاثیر قرار دهد انعطاف پذیری بیش از انتظار در مقابل نیرو ها و عوامل موثر به ویژه تحت اثر نیروی باد می باشد. این تحقیق مفهوم نوین سازه های هوشمند که پتانسیل بزرگی در تولید سازه های فضا کار کنترلی یا تغییر فرم پذیر دارند را معرفی می نماید. هدف این تحقیق بیان این پتانسیل در حوزه های سازه های پاشامی مرکب هوشمند و کاربردهای آن در معماری است.

سازه های پاشامی مرکب هوشمند تغییر فرم پذیر شامل یک سازه ی سبک متداول میزبان از قبیل سازه های پارچه ای، و یا پلیمرهای سنتزی P. V. C بوده که توسط دو لایه ی پایینی و بالایی پیزوالکتریک پوشانده شده است. این مدل هر دو نقش باربری و مکانیسم های محرک/ سنسور را ایفا می کند. مکانیسم تحرک این سازه، مکانیسم های محوری است که سازه ی میزبان هسته بین دو لایه فعال خارجی پلاریزه شده عرضی، ساندویچ شده است. با اعمال یک میدان الکتریکی موازی با راستای پلاریزاسیون به این لایه ها می توان انبساط و انقباض در کل سیستم ایجاد نمود. این مکانیسم محرک می تواند به نحوی اعمال شود که سازه به شکل های مختلف مورد نظر تبدیل شود. در این مقاله تلاش شده است قابلیت سازه های فضا کار پاشامی هوشمند در معماری مورد بررسی و کنکاش قرار گیرد و ظرفیت قابل توجه آن ارائه و معرفی گردد.

واژه های کلیدی: سازه های غشایی، سازه های پاشامی، سازه های هوشمند، معماری

Abstract

Nowadays, membrane space structures have possessed wide application for large span and architectural projects. Reducing the weight bears advantages which lead to lower manufacturing and operational costs and less required raw materials. However, light-weight structures tend to be more sensitive to static as well as dynamic instabilities. A solution to this problem without drastically changing the structural weight seems to be the implementation of smart materials to sense as well as to control the instabilities. An option which has been extensively investigated in recent years is the integration of piezoelectric patches in these mostly plate- or shell-like structures. This paper shows the ability of smart piezoelectric material in smart membrane structures and its applications in architecture.

The smart composite membrane structures are made of an elastic host layer which sandwiched between two external polyvinylidene fluoride layers (PVDF) with piezoelectricity effects. The smart composite membrane structures have considered as cylindrical membrane with circular shape of cross section. The actuation mechanism is applied in piezoelectricity relations. For this aim, polarization vector is parallel to the applied electric field intensity vector both parallel to the diagonal directions. This actuation mechanism can be produced desirable extension or contraction so that the structures change to arbitrary and target shapes.

Keywords: Membrane Structures, Space Structures, Smart Structures, Architecture

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد تکنولوژی معماری دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز، salva_kd@yahoo.com, 0411-5539207

² دانشجوی دکتری مهندسی سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز، y_shahbazi@sut.ac.ir, 0412-3324957

³ دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز، mrchenaghrou@sut.ac.ir, 0412-3324957

مقدمه

در دورانی که معماری مدرن با تجویز راهکارهای طراحی برای معماری خوب، با طرح های همسان و سطوح بتنی یکنواخت عرصه معماری را تسخیر کرده بود ظهور سازه های پاشامی تحولی عظیم در سیر معماری به شمار می رفت. این سازه ها که برگرفته از سازه های کهن الگو چون سیاه چادرهای ایرانی، یورت⁴ های بخش شرقی آسیا و چادرهای سرخ پوستان آمریکایی لیکن با مصالح و طراحی نوین بودند؛ به سرعت توانستند جایگاه خود را در معماری دوران مدرن و پست مدرن پیدا کنند. این نوع سازه ها به علت برخورداری از یک هندسه فضایی سه بعدی به خانواده سازه های فضاکار تعلق دارند و همزمان به خاطر سبکی وزن در گروه سازه های سبک قرار می گیرند. [1] سیستم سازه پاشامی بیش از هر سیستم دیگری پیوند میان سازه و معماری را در یک طرح به نمایش می گذارد.

در نخستین گام های بازگشت مجدد به این سازه ها در دهه 1960 معمارانی چون فرای اوتو با شیوه آزمون و خطا و استفاده از فرم های قابل لمس چون کف صابون و کابل آویخته توانست طرح هایی برای احیای سازه های پاشامی ارائه دهد. بعدها در دهه 70 میلادی استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری در تحلیل این سازه ها عرصه را برای گسترش طراحی سازه های بهینه تر و پیچیده تر فراهم کرد. پروژه ترمینال حجاج بندر جدّه در کشور عربستان کار شرکت معماری اس.او.ام در زمره اولین پروژه های بزرگ می باشد که در آن از برنامه های رایانه ای استفاده شد.

گرچه این سازه ها زمانی که در قالب جدید شکل گرفتند با مشکلات زیادی چون عدم صرفه اقتصادی، دوام و عمر کوتاه پاشام های به کار رفته، ضعف در آتش سوزی و... مواجه بودند اما امروزه با پیشرفت سیستم های طراحی و ساخت و مصالح مقاوم در برابر کشش و آتش سوزی این مشکلات نیز مرتفع گشته است.

آنچه که در خصوص استفاده از سازه های پاشامی حائز اهمیت است، ذکر این نکته است که این سازه ها همواره می بایست تحت نیروی کششی قرار گیرند. در غیر این صورت با وارد شدن نیرویی چون نیروی باد، پاشام دچار چین شده و سازه کارایی خود را از دست خواهد داد. ظهور هرگونه چین و چروک در سطح پاشام نشانگر عدم کشش کامل و ایجاد پارگی حاکی از کشش بیش از حد است. مهمترین نیروی وارد بر این سازه ها نیروی باد است که از تاثیر آن در طول برپایی سازه ها و تثبیت وضعیت پایداری نهایی نباید غافل شد. فرم تکامل یافته این سازه ها به جهت سبکی، شفافیت و انعطاف در خلق فرم های زیبا و بدیع در سازه هایی با کاربری های گوناگون مورد استفاده است.

سازه های پاشامی

انواع و ویژگی ها

با گسترش مصالح مدرن انعطاف پذیر و سبک-مشتق از مواد پلیمری- از دهه 1960 معماران توانستند به ایده سازه های چادری کهن، جامه ای نو پوشانده و سازه های پاشامی را در طراحی های خود مورد استفاده قرار دهند. سازه های پاشامی گونه ای از سازه های کششی، مرکب از المان هایی هستند که صرفاً بار کششی را تحمل می کنند بی آنکه نیازی به مقاومت در برابر نیروهای فشاری یا خمشی داشته باشند. کشش خالص تقریباً موثرترین روش استفاده از یک عضو سازه ای نازک و لاغر -چون سازه های پاشامی- می باشد. اکثر سازه های پاشامی نیازمند پشتیبانی اعضای خمشی و فشاری ضمیمه مانند دکل ها، حلقه های فشاری و تیرها هستند تا بتوانند نیروهای وارده را به زمین انتقال دهند. این سازه ها با مفاهیمی چون بازگشت به طبیعت و فرم های برگرفته از طبیعت -به عنوان اثر معمار بزرگ- که در معماری امروز نیز بیش از هر زمان دیگر به آن پرداخت می شود؛ سازگاری دارند.

سازه های پاشامی را از منظر هندسی می توان به دوگونه سازه های با سطوح سین کلاستیک (تک انحنایی) و آنتی کلاستیک (با انحنای مضاعف) تقسیم کرد. سازه های سین کلاستیک به آن قسم از سازه ها اطلاق می شود که در آن جهت انحنای سطوح در یکسو قرار میگیرد مانند گنبدها؛ و سازه های آنتی کلاستیک مانند سطوح زین اسبی سازه هایی را گویند که دارای انحنا در دو یا چند جهت مختلف هستند. از حیث اجرایی نیز سازه های پاشامی به سه دسته سازه های زین اسبی⁵، تکیه گاه های نقطه ای⁶ و گرده-دره⁷ تقسیم میشوند.

سازه های پاشامی به جهت مشخصاتی چون سبک وزن بودن، مقاومت بالا، قابلیت عبور نور- بسته به جنس مصالح به کار رفته- جلوه نمادین و پوشش دهندگی فضایی، مورد توجه مهندسان و طراحان قرار گرفته است. نسبت شاخص مقاومت به وزن آن در قیاس با سازه های متداول چندین برابر بوده و امکان پوشش دهانه های وسیع تر را میسر می دارد. همچنین اهمیت سبک وزنی آن در مناطقی که خطر زلزله در آنها

⁴ Yurts

⁵ Saddles

⁶ Point Supported

⁷ Ridge & Valley

وجود دارد درجه بیشتری به خود می گیرد. چنین سازه هایی بسته به مصالح به کار رفته می توانند قابلیت نورگذرانی از 0 تا 100 را داشته باشند. از منظر زیبایی شناسی نیز این سازه ها علاوه بر تحریک حس تعلق در انسان جوامع مدرن می تواند نمایشگر جلوه ای نمادین باشد.

شرایط طراحی، ساخت و نگهداری

طراحی، ساخت و نصب سازه های پاشامی نیازمند آنالیزهای سازه ای دقیق تری خواهد بود. عموماً محاسبات این سازه ها بر اساس سازه پشتیبان و سازه پاشامی غیر پیش تنیده بر روی مدل های نرم افزاری ساخته شده صورت می گیرد. در شبیه سازی نیروهای وارد به سازه توجه به نیروی بالابرنده باد به ویژه در هنگام نصب سازه، از جمله نکاتی است که باید مورد توجه قرار گیرد.

در مرحله اجرا و ساخت نیز پس از تعبیه فونداسیون عملیات ساخت و نصب سازه های پشتیبان، برش بخش پاشامی سازه و نهایتاً اتصال این دو بخش به هم صورت می گیرد. سازه پشتیبان می تواند هر یک از عناصر مرکب از میله ها و پروفیل های توپر یا توخالی و کابل های تابیده باشد. برای ساخت پوشش پاشامی سازه از مترپال هایی چون پارچه های PVC، Kevlar، PTFE، ETFE به ترتیب از مات به شفاف استفاده می شود.

در هنگام برش مفاصل در سازه های پاشامی می بایست به نکاتی چون انحنای سطوح، عرض پارچه مورد استفاده، چگونگی قرارگیری درزها و ظاهر نهایی کار توجه نشان داد. ابتدا می بایست انحنای هر سطح با توجه به نرم افزار مدل سازی استخراج گردد. چنانچه انحنای سطوح همجوار متفاوت باشند در این صورت باید انحراف و اعوجاج سطح را جدی گرفت. در چنین شرایطی درز در محل تغییر دو انحنا قرار داده می شود و تغییرات انحنا به صورت تقریبی در قالب مسیره های ژئودزیک⁸ مشخص می گردد. همچنین در روند پیدا کردن فرم بهینه که طی آن یک صفحه مش بندی شده در نرم افزار تحت اثر متغیرهای پارامتریک تغییر پیدا می کند نباید از عرض مترپالی که از آن برای ساخت سازه نهایی استفاده خواهیم کرد غافل باشیم. در یک طرح بهینه بهتر است مدول های طراحی از عرض پارچه و ضرایب آن پیروی کنند. در نهایت درزهای شکل گرفته در پارچه را به سه شیوه اتصالات دوخته، اتصالات جوش حرارتی و اتصالات مکانیکی به هم پیوند می دهیم. اتصالات دوخته محکم ترین نوع اتصالات بوده ولی نخ مصرفی برای آن مستعد پوسیدگی است. دوخت پلی استر با رویه ی PVC زمانی مناسب است که این دوخت به منظور دستیابی به حداکثر مقاومت با درزبندی حرارتی همراه باشد و در فضاهای بیرونی، اتصال باید با پوشش PVC محافظت گردد. دوختن فایبر گلاس با رویه ی PTFE به دلیل شکنندگی الیاف توصیه نمی شود.

در اتصال جوش حرارتی با گرم کردن درزها تا دما بالای نقطه ذوب پارچه و سپس روی هم آوردن درزها ضمن انجام عمل خنک کردن و اعمال فشار انجام میشود. اتصال جوش حرارتی هم برای پلی استر با رویه PVC و هم پارچه فایبر گلاس PTFE و ETFE مناسب است. در حالت دوم باید یک لایه میانی از جنس متفاوت بکار برد، چرا که ماده ی PTFE به تنهایی ذوب نمی شود.

اتصالات مکانیکی را برخلاف دو اتصال پیشین که بهتر است در کارگاه دوخته و جوش شوند، می توان در محل انجام داد. سه نوع اتصال مکانیکی متداول عبارت است از شیوه لبه طناب پیچ شده که در آن می بایست دو روی پارچه بین دو صفحه محکم شوند و صفحات باید ناپیوسته باشند تا امکان حرکت صفحات روی یکدیگر وجود داشته باشد. شیوه دوم استفاده از تسمه شیاردار است که در این روش دو رویه ی پارچه در یک تسمه شیاردار دایره ای دوطرفه ساخته شده از پروفیل آلومینیومی نگهداری می شوند. این شیوه در قیاس با شیوه قبل خاصیت آب بندی ضعیف تری دارد. در این حالت هم ورق های اتصال باید ناپیوسته باشند. ولی ساده ترین روش اتصال، ایجاد یک سری دالبرهای کم عمق در فواصل تکراری به وسیله قلاب است. این نوع اتصال در محل به سهولت و سرعت انجام می شود ولی حاصل کار، ضدآب نخواهد بود.

سازه های پاشامی نیز همچون سایر سازه ها در گذر زمان دچار آسیب شده و از این رو نیازمند نگهداری و تعمیر هستند. نخستین مسئله پیش رو در نگهداری سازه های پاشامی بحث نظافت و تمیزی سازه است. همان گونه که پیشتر نیز گفته شد مصالح اصلی برای پوشش پاشام این سازه ها از جنس پلیمری هستند. پلیمرهای PVC به طور ذاتی تمایل به جذب آلودگی دارند. از این رو چنانچه پاشام در فضاهای شهری با میزان آلاینده های بالا یا در سایر محیط های آلوده مورد استفاده قرار گرفت؛ می بایست مرتباً مورد نظافت قرار گیرد تا از شفافیت و جلوه آن کاسته نشود. اما نکته اینجاست که این سطوح هرچه بیشتر مورد نظافت قرار گیرند بر اثر تماس حلال ها و مواد شوینده ترد و شکننده تر خواهند شد. اندودهای PTFE و ETFE از این حیث مشکل کمتری دارند چرا که ذرات گرد و غبار به آن ها نمی چسبند و با بارش باران نیز شسته خواهد شد.

در بحث پارگی موضعی سازه، نیز چنانچه پارگی و آسیب وارده کوچک باشد می تواند در محل تعمیر شود. پارگی های بزرگ در سازه عموماً به شرکت سازنده ارجاع داده می شوند و گاه حتی لازم است که سازه از حالت نصب خارج شود. مسئله دیگر نیاز به کشش مجدد در سازه های پاشامی است که نصاب ملزم است 6 ماه پس از نصب و به تناوب آن را مورد بررسی قرار دهد. کابل هایی که در معرض هوای آزاد و خوردگی هستند نیز چنانچه ضدزنگ نباشند باید مورد توجه قرار گیرند.

⁸ Geodesic Directions

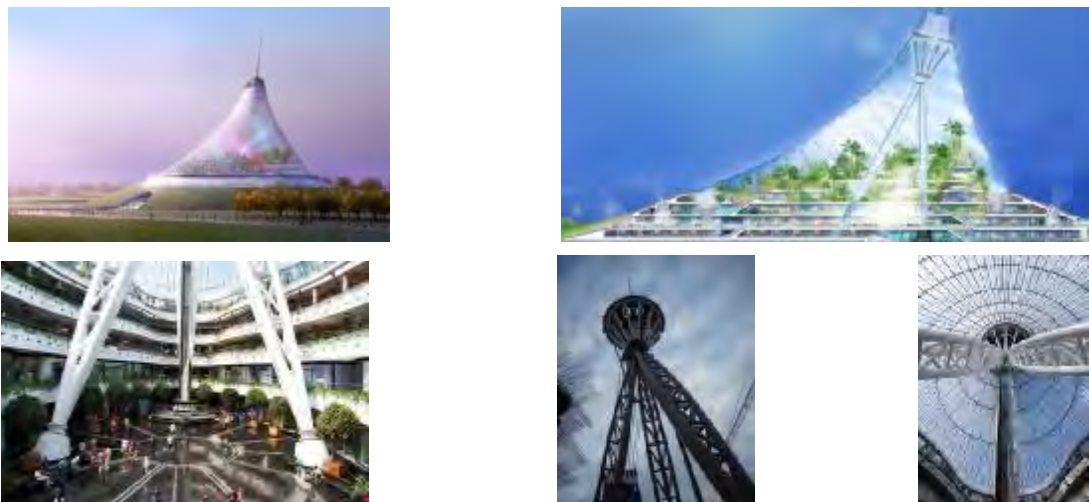
نمونه‌های اجرا شده از سازه پاشامی

در ادامه به بررسی دو نمونه جدید ساخته شده از سازه های پاشامی در داخل و خارج از کشورمان می پردازیم. نخستین مثال موردی ساخته شده، سازه پوشش دهنده آمفی تئاتر پارک آب و آتش تهران کار شرکت سازه های پارچه ای دیبا است (شکل 1). مجموعه پارک با مساحتی در حدود 24000 مترمربع در شمال مجموعه تفریحی اراضی عباس آباد واقع است. این بوستان دارای چهار برج آتش به همراه کف خیس بوده و سازه پاشامی 700 مترمربعی آن وظیفه پوشش گرادانی 750 نفری را دارد که بخش آمفی تئاتر این بوستان را تشکیل می دهد. آمفی تئاتر آب و آتش نمونه ای است که ترکیب سازه و معماری در آن، اساس طرح را تشکیل می دهد. جایگاه بتنی تماشاچیان خود به عنوان فونداسیون سازه های خرابایی پشتی عمل میکند. پارچه با اتصالات مفصلی از پشت آمفی تئاتر به این خرپاهای فلزی به صورت قله و دره واز جلو به خرابای کابلی که به دوستون جلویی منتهی میشود متصل است. هرکدام از این دو ستون نیز از پشت با چهار کابل کشیده می شود. در لبه های پارچه و همچنین زیر و روی آن کابلهایی است که نیروی پیش تنیدگی را در پارچه ایجاد کرده و آن را پایدار می سازد. ارتفاع ستون اصلی 16 متر و طول دهانه سازه حداقل 18 و حداکثر 24 متر است. [2] این سازه بر اساس محاسبات جهت تامین شرایط آسایش در فصول مختلف سال و مقاوم در برابر بار برف 150 دکانیوتن بر مترمربعی و باد با سرعت 100 کیلومتر در ساعت است.



شکل 1- پروژه پارک آب و آتش تهران کار شرکت سازه های پارچه ای دیبا

نمونه موردی بعدی پروژه خان شاتیر⁹ بزرگترین سازه پاشامی در جهان است (شکل 2). این پروژه که توسط دفتر معماری نورمن فاستر طراحی شده است به سال 2010 میلادی افتتاح گردید. این مجموعه عملکرد یک مرکز بزرگ تفریحی و فرهنگی در آستانه، پایتخت کشور قزاقستان را دارد. سازه پاشامی با پوشش سه لایه ETFE با 150 متر ارتفاع معادل یک سازه 50 طبقه پوشش دهنده صد هزار مترمربع، از نوع سازه پاشامی با تکیه گاه های نقطه ای است که توسط سه پایه هریک به ارتفاع تقریبی 147 متر تعبیه شده در مرکز و مهار لبه های بیرونی سازه در حلقه فشاری پیرامونی پشتیبانی می شود. [3]



شکل 2- پروژه خان شاتیر بزرگترین سازه پاشامی در جهان

⁹ Khan Shatir Project

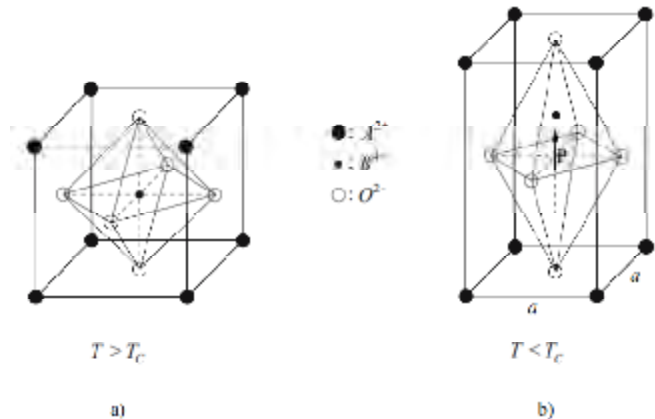
سازه های فضا کار پاشامی هوشمند

سازه های هوشمند پیزوالکتریک

در مهندسی سازه و معماری نوین، تلاش های زیادی جهت کاهش وزن سازه ها صورت گرفته است. کاهش وزن سازه های مزایای زیادی با خود به همراه داشته که از جمله ی آن ها می توان به کاهش هزینه های تولید و اجرا و مواد مصرفی اشاره نمود. با این وجود، سازه های سبک در برابر ناپایداری های استاتیکی و دینامیکی حساس تر می باشند. یکی از راه حل ها در برابر این مشکل بدون تغییرات در وزن سازه، استفاده از مواد هوشمند برای اندازه گیری و کنترل ناپایداری ها است. این ایده، استفاده از مواد هوشمند، در سال های اخیر مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته و تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی گسترده ای را در زمینه ی مدلسازی این دسته از مواد در منابع علمی معتبر می توان جستجو کرد. در این زمینه، مواد پیزوالکتریک یکی از مواد هوشمندی است که بسیار مورد ارزیابی قرار گرفته است. [4]

در سال 1880 خاصیت پیزوالکتریسیته توسط P. Curie و J. Curie کشف شد. برادران Curie ابتدا اثر مستقیم پیزوالکتریک را در کریستال های تورمالین کشف کردند. آنها تشخیص دادند که تغییر شکل مکانیکی در جهت های خاص، سبب ایجاد بارهای سطحی الکتریکی در جوهه مقابل کریستال شده که متناسب با تغییر شکل مکانیکی است. این اثر که بعداً در کوارتز و سایر کریستال هایی بدون مرکز تقارن پیدا شد، اثر مستقیم پیزوالکتریک، اثر سنسوری، نامیده می شود. اثر معکوس پیزوالکتریک، اثر محرکی، توسط لیمپن بر مبنای ملاحظات ترمودینامیکی ارائه و بعداً توسط برادران کوری نیز به طور آزمایشگاهی تأیید شد. اثر پیزوالکتریک در ساختار کریستال هایی پیدا شد که مرکز تقارن وابسته به یونهای مثبت و منفی شبکه ی کریستالی نداشتند. بنابراین می توان دریافت که شرایط اصلی برای وقوع اثر پیزوالکتریک، وجود محورهای قطبی میان ساختار کریستالی است. قطبی بودن به این معنی است که یک گشتاور غیرقطبی الکتریکی در جهت های محور توزیع بار الکتریکی در پیوند شیمیایی ایجاد می شود. [5]

امروزه سرامیک های پلی کریستالین مثل تیتانیم - باریم و تیتانیت - زیرکونات - روی، جزء متداول ترین مواد پیزوالکتریک مورد استفاده می باشند. چرا که آنها نسبت به پیزوالکتریک های پلی کریستالین منفرد دارای قیمت تولید کم و امکان شکل دهی دلخواه بیشتری می باشند. تیتانیت - زیرکونات - روی، PZT، در ساختار پروسکیت کریستال فروالکتریک از نوع ABO_3 پیدا شده است. در ساختار پروسکیت، A بیانگر یون دوبار مثبت روی، B و O به ترتیب بیانگر یون چهار بار مثبت تیتانیم و یون دو بار منفی اکسیژن می باشد. در دمایی بالاتر از دمای خاص T_c ، که دمای کوری¹⁰ نامیده می شود، شبکه ی پایه ی PZT یک ساختار مکعبی تولید می کند (شکل 3-a). در این ساختار کریستالی به دلیل وجود مرکز تقارن، هیچ خاصیت پیزوالکتریکی ایجاد نمی شود. با نزول به زیر دمای کوری، بافت مکعبی شبکه ی کریستالی به دلایل انرژی، خود به خود به ساختار چهار وجهی تبدیل می شود. به موجب آن، یون اکسیژن در حالت چهار وجهی به سمت محور C کریستالوگرافیک جابجا می شود. در همان زمان، یک تغییر مکان یون مثبت شبکه به سمت جهت مخالف رخ می دهد. این جابجایی یونی منجر به یک انبساط پایه ای شبکه ای به سمت محور C شده در حالی که یک انقباض به طور همزمان به طرف دو محور a نشان داده در شکل (3-b) رخ می دهد. اغتشاش ایجاد شده در اثر انتقال فاز پارا الکتریک به فاز فروالکتریک، تغییر شکل خود به خودی نامیده می شود.



شکل 3- ساختار پروسکیت کریستال های نوع ABO_3

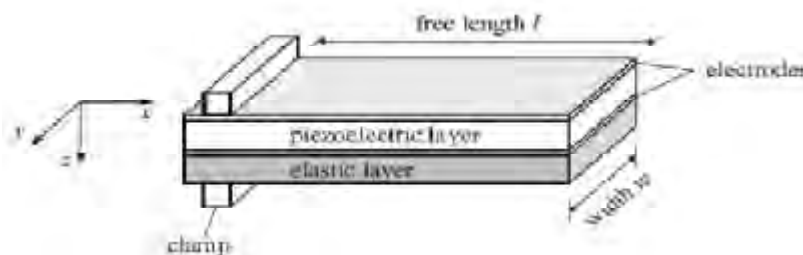
(a) بافت مکعبی بالای دمای کوری (b) بافت چهار وجهی زیر دمای کوری

¹⁰ Curie Temperature

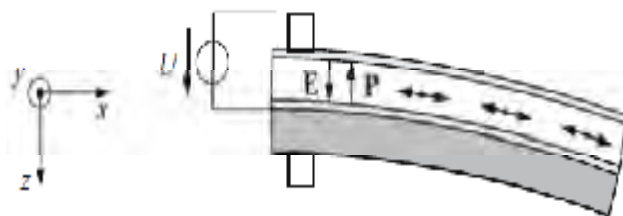
با تغییر شکل خود به خودی از مرکز تقارن شبکه‌ی پایه‌ی چهار وجهی، یک گشتاور دو قطبی مناسب ایجاد می‌شود. مقدار گشتاور دو قطبی به حجم واحد شبکه وابسته است که پلاریزاسیون خود به خودی P_s نامیده می‌شود. این پلاریزاسیون موازی یا غیر موازی با محور C می‌باشد. در نتیجه، انتقال ساختار مکعبی به ساختار چهار وجهی به ترتیب، سه جهت برای انبساط خود به خودی و شش جهت برای پلاریزاسیون خود به خودی را میسر می‌سازد. با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی، به دلیل نیروی فشاری روی مراکز بار موجود در شبکه پایه‌ی هرمی، انحراف در بارها و در نتیجه پلاریزاسیون تولید شده اضافی و اثرات تغییر شکل ایجاد می‌شود. درجات بیشتر توازی میان جهت‌های پلاریزاسیون با تغییر شکل خود به خودی از یک طرف و توازی با راستای میدان الکتریکی خارجی از طرف دیگر، موجب القاء پلاریزاسیون‌ها و تغییر شکل‌های بیشتری می‌شود (اثر معکوس پیزوالکتریک). مراکز بارهای شبکه‌ی پایه با اعمال بار مکانیکی خارجی که منجر به یک میدان تنش مکانیکی تجمعی می‌شوند، تغییر می‌کند.

محرك‌های پیزوالکتریک

انواع مختلف محرك‌های پیزوالکتریک، از اثر معکوس پیزوالکتریک استفاده می‌کنند. با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی به ماده‌ی پیزوالکتریک، بسته به جهت‌یایی مربوط به ساختار کریستالی مواد تک کریستالی یا پلاریزاسیون باقیمانده سرامیک‌های فروالکتریک، انبساط و انقباض رخ می‌دهد. با استفاده از اثر پیزوالکتریک طولی و ایجاد تغییرات طولی در یک ماده پیزوالکتریک می‌توان محرك‌های خطی ایجاد نمود. از جمله مشخصات این نوع میدل‌ها توسط محرك‌های پیزوالکتریک خطی، تغییر شکل‌های کوچک و نیروهای زیاد است که در زمینه‌های کاربردی متفاوت به کار گرفته شده‌اند. تغییر شکل خیلی کوچک در ولتاژهای الکتریکی بالا برای این نوع محرك‌ها به صرفه نیست. با این وجود، می‌توان این تغییرات کوچک را به‌طور مکانیکی در سیستم‌هایی مانند سازه‌ی مونومرف یا بایمرف انتقال داد. یک سازه‌ی مونومرف شامل یک پیزوسرامیک فعال و یک لایه‌ی الاستیک غیرفعال است (شکل 4). اگر قسمت پیزوسرامیک از یک لایه‌ی منفرد تشکیل شده باشد به تکنولوژی تک لایه اشاره دارد. اگر جزء پیزوسرامیک شامل چندین لایه‌ی فعال با الکترودهای میان آنها باشد، به تکنولوژی چند لایه اشاره دارد. حرکت جزء پیزوسرامیک در نتیجه‌ی انبساط و انقباض، توسط قسمت الاستیک غیرفعال مقید شده است. در نتیجه، یک اثر گشتاور داخلی پیزوالکتریک، تغییر شکل سازه‌ی مونومرف را همان‌طوری که در شکل (5) نشان داده شده است، زیاد می‌کند.

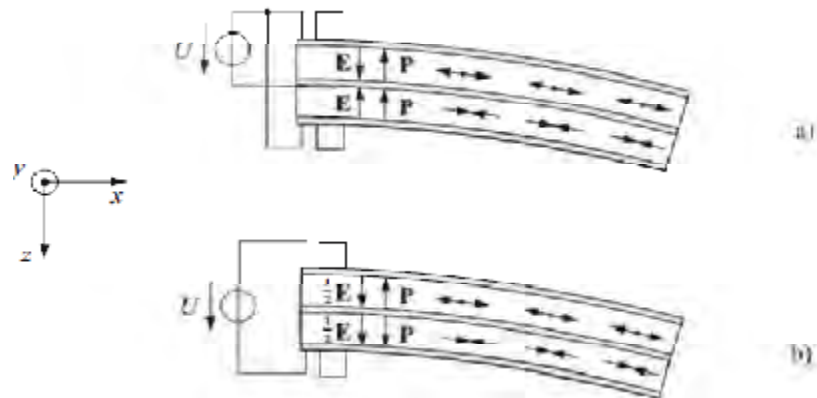


شکل 4- ردیف لایه‌های یک مونومرف



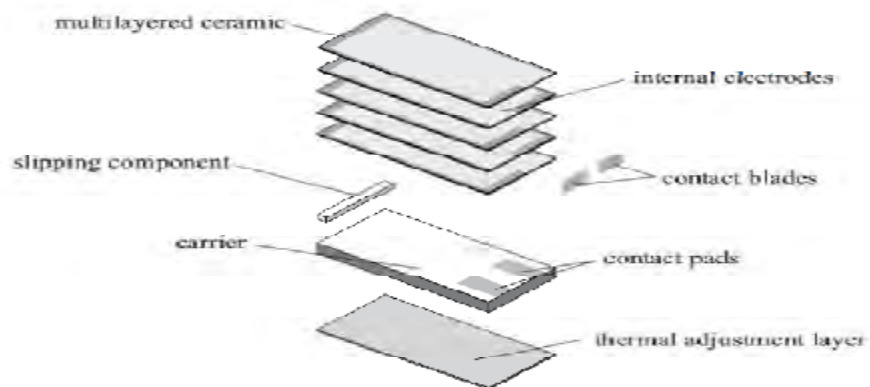
شکل 5- رفتار یک مونومرف در معرض ولتاژ

انحراف کلی در جهت Z بزرگتر از تغییر شکل قسمت پیزوالکتریک در جهت X است. به دلیل انتقال مکانیکی تغییرات طولی کوچک قسمت پیزوسرامیک به یک تغییر شکل خمشی، امکان ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در راستای Z، وقتی که محرک با ولتاژهای الکتریکی راه‌اندازی شود، وجود دارد. به منظور افزایش انحراف محرک تیر خمشی، قسمت الاستیک غیرفعال می‌تواند با یک قطعه‌ی پیزوسرامیک فعال ثانویه جایگزین شود. این سازه‌ی محرک اصطلاحاً بایمرف نامیده می‌شود. اگر راستاهای پلاریزاسیون هر دو لایه معین و در یک اتصال موازی الکتریکی راه‌اندازی شوند، سازه در اصطلاح بایمرف موازی نامیده می‌شود. اگر راستاهای پلاریزاسیون دو لایه در مقابل هم قرار گرفته و آنها در یک اتصال سری الکتریکی راه‌اندازی شوند، سازه در اصطلاح بایمرف سری نامیده می‌شود (شکل 6).



شکل 6- رفتار یک بایمرف در معرض ولتاژ الکتریکی. (a) بایمرف موازی (b) بایمرف سری

اگرچه میان یک لایه‌ی تکی، مقدار میدان الکتریکی تقریباً نصف اندازه‌ی بایمرف موازی است، اما اتصال سری این مزیت را دارد که هیچ اتصالی مجبور نیست با الکتروود داخلی ایجاد شود. در شکل (7) یک محرک تیر خمشی مونومرف شامل قطعه پیزوسرامیک با تکنولوژی چند لایه نشان داده شده است.



شکل 7- ساختار یک محرک تیر خمشی مونومرف در تکنولوژی چند لایه

مدلسازی سازه‌های پاشامی هوشمند

در این قسمت مدلسازی یک پوسته‌ی استوانه‌ای با رفتار غشایی ارائه شده است. اثر مستقیم و معکوس پیزوالکتریک خطی را می‌توان به صورت رابطه‌ی (1) نوشت:

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j + d_{mi}E_m \quad \text{اثر معکوس پیزوالکتریک} \quad (1)$$

$$D_m = d_{mi}\sigma_i + \epsilon_{mk}^T E_k \quad \text{اثر مستقیم پیزوالکتریک}$$

میدان حرکتی یک نقطه‌ی دلخواه به فاصله‌ی Z از صفحه‌ی میانی سازه‌ی پاشامی استوانه‌ای را می‌توان بر حسب سه مؤلفه‌ی حرکتی میان صفحه‌ی آن به صورت زیر نوشت:

$$(2)$$

همچنین، میدان کرنش غشایی هر نقطه را می‌توان بر حسب کرنش‌های غشایی صفحه‌ی میانی بیان نمود:

$$\varepsilon_{xx}^z = \varepsilon_x^0 + z\chi_x\varepsilon_{\theta\theta}^z = \varepsilon_{\theta}^0 + z\chi_{\theta}\gamma_{x\theta}^z = \gamma_{x\theta}^0 + z\chi_{x\theta} \quad (3)$$

که در آن،

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u}{\partial x} \varepsilon_\theta^0 = \frac{\partial v}{R \partial \theta} - \frac{w}{R} \gamma_{x\theta}^0 = \frac{\partial u}{R \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \chi_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \chi_\theta = -\frac{\partial^2 w}{R^2 \partial \theta^2} \chi_{x\theta} = -2 \frac{\partial^2 w}{R \partial x \partial \theta}\end{aligned}\quad (4)$$

و با جایگذاری روابط (3) و (4) در روابط (2) می‌توان میدان کرنش در هر نقطه را بر حسب مؤلفه‌های حرکتی صفحه‌ی میانی نوشت:

$$(5)$$

با توجه میدان کرنش و تنش در غشاء‌ها، رابطه معکوس پیزوالکتریسیته (1) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{x\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{26} \\ S_{61} & S_{62} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \tau_{x\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_\theta \\ E_z \end{bmatrix}\quad (6)$$

با توجه به اینکه اعمال ولتاژ فقط در راستای ضخامت در نظر گرفته شده است، $E_x = E_\theta = 0$ و $E_z = E_0$ ، با پیش ضرب Q در رابطه‌ی (6) و مرتب نمودن آن داریم:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \tau_{x\theta} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{bmatrix} + z [Q] \begin{bmatrix} \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{bmatrix} - [Q] \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ d_{33} \end{bmatrix} [E_z]\quad (7)$$

مراحل فوق را برای رابطه مستقیم پیزوالکتریسیته (1) انجام داده که در زیر نتیجه‌ی نهایی ارائه شده است:

$$(8)$$

در یک سازه‌ی پاشامی چند لایه، نیروهای داخلی غشایی را می‌توان در واحد طول سازه به صورت زیر بدست آورد:

$$\begin{bmatrix} \bar{N}_x \\ \bar{N}_\theta \\ \bar{N}_{x\theta} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{-\frac{h_k}{2}}^{\frac{h_k}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_x^k \\ \sigma_\theta^k \\ \tau_{x\theta}^k \end{bmatrix} dz\quad (9)$$

با استفاده از روابط (7) و (8) و جایگذاری در رابطه (9) خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \bar{N}_x \\ \bar{N}_\theta \\ \bar{N}_{x\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \mathbf{0} \\ A_{21} & A_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \mathbf{0} \\ B_{21} & B_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_x \\ P_\theta \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}\quad (10)$$

که در روابط فوق، پارامترهای A_{ij} ، B_{ij} ، C_{ij} و P_i به صورت زیر می‌باشند:

$$(A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} (1, z, z^2) [Q_{ij}]_k dz \quad i, j = 1, 2, 6\quad (11)$$

رابطه‌ی (10) اثرات کنترلی مواد پیزوالکتریک بر روی نیروهای داخلی سازه‌های پاشامی استوانه‌ای چند لایه را به صورت کاهش $\begin{bmatrix} P_x \\ P_\theta \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$ از کل نیروها نشان می‌دهد.

در این مقاله، معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سازه‌های پاشامی استوانه‌ای با استفاده از اصل هامیلتون برای محیط پیوسته چند لایه به صورت زیر محاسبه شده است:

$$(13)$$

در رابطه‌ی فوق، \mathbf{T} ، \mathbf{U} و \mathbf{W} به ترتیب انرژی جنبشی، پتانسیل و بارهای خارجی اعمالی بر روی سازه بوده و عملگر \mathbf{Q} بر حساب تغییرات دلالت دارد. انرژی‌های جنبشی، پتانسیل و بارهای خارجی اعمالی بر روی سازه با وردش آن‌ها به صورت روابط (14)، (15) و (16) محاسبه شده‌اند:

(۱۴)

(۱۵)

اگر \mathbf{T}_x ، \mathbf{T}_θ و \mathbf{T}_z به ترتیب مؤلفه‌های واحد سطح بار گسترده در راستاهای x ، θ و z باشند (که در اکثر کاربردهای عملی این بارها در سطح خارجی ترین لایه‌ها اعمال می‌گردد)، داریم:

(۱۶)

با جایگذاری وردش انرژی‌های کرنشی، جنبشی و کار خارجی روابط (14)، (15) و (16) در رابطه (13) داریم:

(۱۷)

با توجه به انتگرال دوگانه‌ی سطر سوم می‌توان شرایط صفر شدن آن را به صورت صفر شدن همزمان پیرانهایی دانست که قبل از تغییرات تغییر مکانی $\delta \mathbf{u}$ ، $\delta \mathbf{v}$ و $\delta \mathbf{w}$ ظاهر شده‌اند. برای دستیابی به معادلات حرکت غشاء‌ها فرضیات اصلی را $(\mathbf{M}_x = \mathbf{M}_{x\theta} = \mathbf{M}_\theta = \mathbf{0})$ اعمال نموده و با مرتب‌سازی آن، معادلات حرکتی سیستم چندلایه‌ی پوسته و با عملکرد غشایی بدست می‌آید:

(۱۸)

با جایگذاری روابط (2)، (5) و (11) و توجه به این مطلب که در حالت تعداد و مشخصات مکانیکی یکسان برای لایه‌ها در دو طرف صفحه‌ی میانی ماتریس \mathbf{B} برابر صفر می‌باشد، معادلات دینامیک حرکتی را می‌توان به صورت مؤلفه‌های حرکتی \mathbf{u} ، \mathbf{v} و \mathbf{w} زیر نوشت:

(۱۹)

از آنجا که نیروهای فعال با میدان الکتریکی \mathbf{E}_z تغییر می‌کند، اگر الکترودهای فعال‌ساز دارای توزیعی بین $[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2]$ و $[\theta_1, \theta_2]$ قرار داشته باشند، میدان الکتریکی \mathbf{E}_z را می‌توان به صورت $[\mathbf{H}(\theta - \theta_1) - \mathbf{H}(\theta - \theta_2)] \times [\mathbf{H}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) - \mathbf{H}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_2)]$ و $\mathbf{E}_z(\mathbf{x}, \theta, t) = \pm E_0 \mathbf{G}(t)$ نوشت که در آن \mathbf{H} تابع هویساید، \mathbf{E}_0 و $\mathbf{G}(t)$ به ترتیب اندازه و تابع متغیر با زمان میدان الکتریکی اعمالی به مواد پیزوالکتریک است.

آنالیز عددی الکترواستاتیک سازه‌ی پاشامی هوشمند

در این قسمت آنالیز الکترواستاتیک سازه‌ی پاشامی هوشمند سه لایه با شرایط مرزی مفصلی با حرکت مقید متناظر در لبه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

این شرایط در زیر آورده شده است:

(۲۰)

می‌توان بردارهای تغییر مکان را که شرایط مرزی فوق را ارضاء نماید، به صورت زیر بیان نمود:

(۲۱)

که $\theta_0 = \theta_{out} - \theta_{in}$ و $\beta_n = \frac{n\pi}{\theta_0}$ $n = 1, 2, 3, \dots$ $\alpha_m = \frac{m\pi}{L}$ $m = 1, 2, 3, \dots$ $\phi_{mn}(x, \theta) = \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n(\theta - \theta_{in}))$ می باشند. با ضرب طرفین روابط (21) در $\sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n(\theta - \theta_{in}))$ انتگرال گیری در محدوده $x = 0$ and L و $\theta = \theta_{in}$ and θ_{out} در نظر گرفتن خاصیت تعامد توابع مثلثاتی به دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه‌ی دوم خطی زیر خواهیم رسید:

(۲۲)

که در رابطه‌ی فوق پارامترهای زیر وجود دارند:

(۲۳)

نیروهای کنترلی غشاییدر هر مود در راستاهای x ، θ و z که به ترتیب با $PU_{mn}^m(t)$ ، $PV_{mn}^m(t)$ و $PW_{mn}^m(t)$ نشان داده شده‌اند عبارتند از:

(۲۴)

با حل معادلات دیفرانسیل مرتبه‌ی دوم خطی (22) به روش تبدیل لاپلاس و با استفاده از رابطه‌ی انتگرال کانولوشن می‌توان ضرایب متغیر با زمان هر مود را در راستاهای x ، θ و z که به ترتیب با $X_{mn}(t)$ ، $Y_{mn}(t)$ و $Z_{mn}(t)$ نشان داده شده‌اند و در نهایت، مؤلفه‌های تغییر مکانی v ، u و w را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\begin{aligned} u(x, \theta, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ X_{mn}(0) \cos\left(\sqrt{\frac{\mathcal{H}_{mn}}{\rho}} t\right) + X'_{mn}(0) \sin\left(\sqrt{\frac{\mathcal{H}_{mn}}{\rho}} t\right) \pm \int_0^t \sqrt{\frac{\rho}{\mathcal{H}_{mn}}} \frac{PU_{mn}^m(\tau)}{\rho} \sin\left(\sqrt{\frac{\rho}{\mathcal{H}_{mn}}} (t - \tau)\right) d\tau \right\} \phi_{mn}(x, \theta) \\ v(x, \theta, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ Y_{mn}(0) \cos\left(\sqrt{\frac{\mathcal{M}_{mn}}{\rho}} t\right) + Y'_{mn}(0) \sin\left(\sqrt{\frac{\mathcal{M}_{mn}}{\rho}} t\right) \pm \int_0^t \sqrt{\frac{\rho}{\mathcal{M}_{mn}}} \frac{PV_{mn}^m(\tau)}{\rho} \sin\left(\sqrt{\frac{\rho}{\mathcal{M}_{mn}}} (t - \tau)\right) d\tau \right\} \phi_{mn}(x, \theta) \quad (25) \\ w(x, \theta, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ Z_{mn}(0) \cos\left(\sqrt{\frac{\mathcal{K}_{mn}}{\rho}} t\right) + Z'_{mn}(0) \sin\left(\sqrt{\frac{\mathcal{K}_{mn}}{\rho}} t\right) \pm \int_0^t \sqrt{\frac{\rho}{\mathcal{K}_{mn}}} \frac{PW_{mn}^m(\tau)}{\rho} \sin\left(\sqrt{\frac{\rho}{\mathcal{K}_{mn}}} (t - \tau)\right) d\tau \right\} \phi_{mn}(x, \theta) \end{aligned}$$

در نهایت، دو آنالیز الکترواستاتیک زیر صورت گرفته و مؤلفه‌ی تغییر مکان قائم w محاسبه شده است:

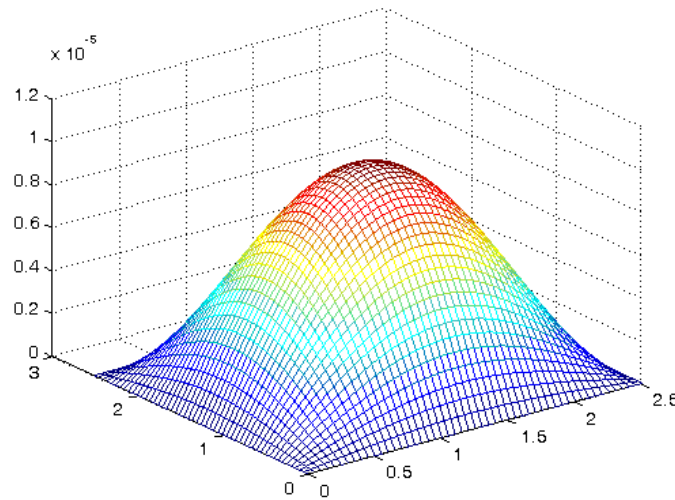
الف) اعمال میدان الکتریکی ثابت $+100V$ به سرتاسر سازه‌ی پاشامی هوشمند

ب) پلاریزاسیون معکوس در هر نیمه و اعمال میدان الکتریکی ثابت $\pm 100V$ به هر نیمه از سازه‌ی پاشامی هوشمند

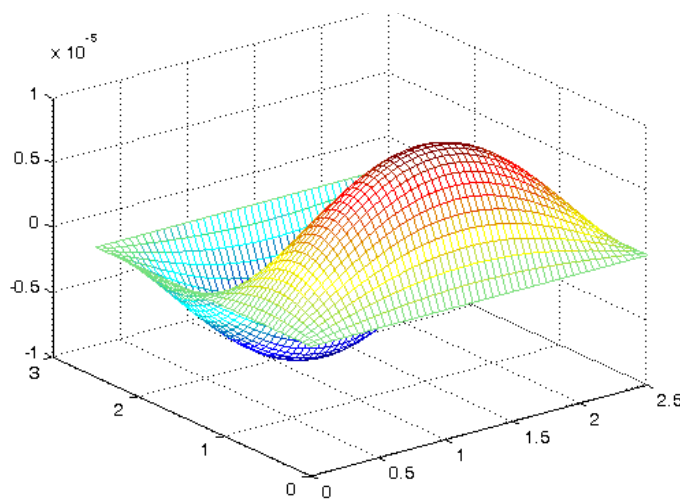
در این شبیه‌سازی‌ها سازه‌ی پاشامی هوشمند به صورت دو لایه‌ی فعال پیزوالکتریک در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات هندسی و مصالح سازه‌ی پاشامی استوانه‌ای هوشمند در جدول 1 ارائه شده است. همچنین اشکال (8) و (9) مؤلفه‌ی تغییرمکان قائم w تحت آنالیزهای الکترواستاتیک (الف) و (ب) فوق را نشان می‌دهد.

جدول 1- مشخصات هندسی و مصالح سازه‌ی پاشامی هوشمند

پارامتر	طول	شعاع	زاویه‌ی ورودی	زاویه‌ی خروجی	مدول الاستیسیته پیزوالکتریک
علامت ریاضی در فرمول نویسی مقاله	L	R	q_{in}	q_{out}	E_p
مقدار	2.50(m)	2.5(m)	60(degree)	120(degree)	128(GPa)



شکل 8- مؤلفه‌ی تغییرمکان قائم w تحت میدان الکتریکی ثابت $+100V$ در سرتاسر سازه‌ی پاشامی هوشمند



شکل 9- مؤلفه‌ی تغییرمکان قائم w تحت پلاریزاسیون معکوس و اعمال میدان الکتریکی ثابت $\pm 100V$ به هر نیمه از سازه‌ی پاشامی هوشمند

قابلیت سازه های فضاکار هوشمند در معماری

ایده و مدلسازی سازه های پاشامی هوشمند توسط پیزو الکترونیک که توسط مولف دوم و در بخشی از پایان نامه دکتری صورت گرفته است نشان می دهد که نه تنها می توان کنترل فرم سازه را تحت نیرو های خارجی انجام داد بلکه می توان فرمهای دلخواه را نیز ایجاد کرد. اگر چه این کار در مراحل آغازین خود می باشد اما نشان گر افقی وسیع در آینده می تواند باشد. تلفیق ایده فوق با بندواره های¹¹ مکانیکی و یا الکترومکانیکی می تواند قابلیت این سازه ها را دو چندان نماید، برای مثال سازه پاشامی در مسجد النبی شکل (شکل 10) نمونه ساده ای از این سیستم ها در تلفیق با سازه پاشامی است که در صورت استفاده از سیستم پیزوالکترونیک می تواند قابلیت های مضاعفی را به خود بگیرد.



شکل 10- سازه های پاشامی حیاط مسجد النبی

ترکیب روشهای فوق با سیستم های کنترلی هوشمند و به کار گیری استراتژی های تصمیم گیری می تواند این سازه ها را در تطبیق پذیری با شرایط گوناگون محیطی از قبیل آب و هوا، تابش نور خورشید و موارد دیگر از نقطه نظر معماری و عملکرد کارا تر سازد و دامنه کاربرد این سازه ها را گسترده تر نماید.

نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا معرفی مختصری در مورد سازه های پاشامی و کاربرد آن ها به عنوان یکی از آیتم های نوین در طراحی های معماری و سازه بیان شده است. سپس با در نظر گرفتن مشکل عمده ای این نوع سازه های سبک در برابر ناپایداری های استاتیکی و دینامیکی راه حل استفاده از مواد هوشمند برای کنترل ناپایداری ها و تغییر مکان ها معرفی شده است. بدین منظور، مدلسازی سازه های پاشامی هوشمند با در نظر گرفتن خاصیت معکوس پیزوالکترونیک ارائه شده است. با در نظر گرفتن میدان غشایی، معادلات الکترو دینامیک سازه پاشامی استوانه ای چند لایه ی هوشمند با استفاده از مکانیک هامیلتونی محاسبه شده است. در معادلات دینامیک حرکت، نیروهای کنترلی ناشی از اعمال میدان الکتریکی در راستاهای غشایی بر حسب توزیع الکترودهای فعال بر حسب تابع هویساید ارائه شده است. از آنجاییکه نیروهای کنترلی به نوع پلاریزاسیون لایه ها بستگی دارد، یک آنالیز الکترواستاتیک با پلاریزاسیون مشابه برای لایه های فوقانی و تحتانی سازه ی پاشامی هوشمند تحت ولتاژ ثابت انجام شده است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که مواد پیزوالکترونیک به صورت توزیع چند لایه قادر به کنترل تغییر مکان های کوچک

¹¹ Mechanism

استاتیکی، در محدوده‌ی تغییر مکان‌های خطی، را دارد. ضمناً تلفیق ایده استفاده از مواد هوشمند با بندواره های مکانیکی و یا الکترومکانیکی و استراتژی های هوشمند تصمیم گیری سازه های کارا در گستره معماری را فراهم می سازد.

مراجع :

[1]. ماریز وندنبرگ، فرزاد پوررحیمیان، محمدرضا میلانی، **سایبان های سبک**، چاپ اول، انتشارات دانشگاه هنر اسلامی تبریز، 1386.

[2]. "گلستان آب و آتش"، **خبرنامه دیبا-معماری و سازه**، شماره دوم، آذرماه 1388.

[3]. David Lindaya, "Khan Shatyr Entertainment Centre" , **Specifier Magazine**, Issue 92, 2008.

[4]. Christopher H.M. Jenkins, Umesh A. Korde, "Membrane vibration experiments: An historical review and recent results", **Journal of Sound and Vibration**, 295, 2006.

[5]. Preumont, A. , "*Mechatronics Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems materials*", ©Springer, Printed in the Netherlands, 2008.