



تحلیل میکرومکانیکی پاسخ الکتروالاستیک کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف فازی حاوی نانولوله‌ی کربنی

مجتبی حقگو¹، رضا انصاری خلخالی^{2*}، محمدکاظم حسن‌زاده اقدم³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

*رشت، صندوق پستی 3756، r_ansari@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: 96/9/28	در این مقاله رفتار الکترومکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت‌شده با فیبر فازی حاوی نانولوله‌ی کربنی بررسی می‌شود. از یک مدل میکرومکانیکی سلول واحد و روابط ساختاری کوپل الکترومکانیکی برای به دست آوردن ثابت‌های الاستیک و الکتریکی کامپوزیت هیبریدی استفاده می‌شوند. این کامپوزیت‌های هیبریدی از فیبر پیزوالکتریک و نانولوله‌ی کربنی به عنوان فاز تقویت و زمینه پلیمری ساخته شده است. فیبرهای پیزوالکتریک با نانولوله‌های کربنی که در جهت شعاعی هم‌راستا شده‌اند پوشانده می‌شوند. یک ناحیه فاز میانی بین نانولوله‌ی کربنی و پلیمر به علت فعل و انفعالات بین نانولوله و زمینه پلیمری در نظر گرفته می‌شود. تاثیرات درصد حجمی و اندازه نانولوله‌ی کربنی بر خواص نهایی کامپوزیت هیبریدی بررسی شده است. این تاثیرات در جهت عرضی به علت هم‌راستا شدن نانولوله‌های کربنی در جهت شعاعی فیبر کربن قابل توجه است. با در نظر گرفتن PZT-7A به عنوان فیبر پیزوالکتریک تقویت‌کننده، مطالعه‌ای بر روی خواص استحکام‌بخشی آن در مقایسه با PZT-5A انجام شده است تا یک کامپوزیت بهتری ساخته شود. با مقایسه مدل حاضر با یک مدل میکرومکانیکی دیگر، اعتبارسنجی مدل بررسی شده است. تطابق خوبی بین نتایج دو مدل میکرومکانیکی وجود دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که برای خواص الکترومکانیکی عرضی بهتر، استفاده کردن از نانولوله‌ی کربنی با قطر کمتر پیشنهاد می‌شود.
تاریخ پذیرش: 97/1/24	
کلیدواژگان: میکرومکانیک نانولوله کربن الکتروالاستیک فیبر فازی پیزوالکتریک	

Micromechanical analysis of electro-elastic response of polymer composites reinforced with fuzzy fiber containing CNTs

Mojtaba Haghighi, Reza Ansari Khalkhali*, Mohammad Kazem Hassanzadeh-Aghdam

Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

* P.O.B. 3756, Rasht, Guilan, Iran, r_ansari@guilan.ac.ir

Keywords

Micromechanics
Carbon nanotube
Electro-elastic
Fuzzy fiber
Piezoelectric

Abstract

In this paper the electromechanical behavior of fuzzy fiber reinforcement hybrid composites containing carbon nanotubes (CNTs) is investigated. A unit cell micromechanical model and electromechanical coupled constitutive equations are used to obtain the elastic and electrical coefficients of the hybrid composites. This hybrid composite is made up of piezoelectric fiber and CNT as reinforcement and polymer matrix. The piezoelectric fibers are coated with radially aligned CNTs. An interphase region is considered due to the interaction between CNT and matrix. The effect of volume fraction and size of CNT on the overall hybrid composite properties is investigated. These effects are remarkable in the transverse direction due to the aligned CNTs in the fiber radial direction. Considering PZT-7A as reinforcement piezoelectric fiber, study of its mechanical strength compared to PZT-5A was implemented in order to make a better composite. By comparing the proposed model with another micromechanical model, the validation of the proposed model is studied. Generally, a good agreement is observed between the results of these two models. The results also reveal that for the improved transverse electromechanical properties, using a CNT with a lower diameter is suggested.

1- مقدمه

الاستیک کامپوزیت تقویت‌شده با نانولوله توسط توسدنسن و چو مورد مطالعه قرار گرفته است [1]، هان و الیوت اثرات درصد حجمی نانولوله‌های تک‌جداره بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها را بررسی کردند [2]. آن‌ها دریافتند که برای قوی بودن برهم‌کنش بین نانولوله‌های کربنی و زمینه، بایستی اثرات فاز

به دلیل خواص مکانیکی خوب نانولوله‌های کربنی، از آن‌ها به طور گسترده به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. این خواص مکانیکی خوب منجر به انجام مطالعات زیادی بر روی نانولوله‌های کربنی شده است. مدول

Please cite this article using:

Haghighi, M. Ansari Khalkhali, R. and Hassanzadeh-Aghdam, M. K., "Micromechanical Analysis of Electro-Elastic Response of Polymer Composites Reinforced With Fuzzy Fiber Containing CNTs", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 485-498, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

رای تأثیرات موجی بودن نانولوله کربن و فازمیانی را بر خواص موثر کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف فیبر فازی بررسی کردند [16].

چاترگوجیو و همکاران رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با فیبر کربن پوشیده شده با نانولوله را مطالعه کردند. آن‌ها با استفاده از روش استوان‌های^۲ به مطالعه تنسورهای تنش و کرنش و مدول‌های نرمال و برشی پرداختند [17].

مواد پیزوالکتریکی برای استفاده در سنسورها و محرک‌ها بسیار مناسب اند. این مواد قابلیت کوپل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را دارند. ساخت مواد کامپوزیتی که یک یا دو فاز آن را مواد پیزوالکتریک تشکیل می‌دهند از اهمیت بالایی برخوردار است. باید توجه شود که کامپوزیت‌های پیزوالکتریکی خواص بهتری نسبت به مواد خالص پیزوالکتریکی دارند. تحقیقات بسیاری در زمینه کامپوزیت‌های پیزوالکتریکی انجام شده است. بیرونگ و سودانو با استفاده از یک روش میکرومکانیکی با قرار دادن پوششی از جنس پیزوسرامیک بر روی فیبر به بررسی خواص کوپل الکترومکانیکی کامپوزیت پرداختند [18]. آن‌ها گزارش کرده‌اند که خواص الکترومکانیکی این کامپوزیت حدود 70% فاز پیزوالکتریکی کامپوزیت است. ادگارد یک روش مدل‌سازی جدید بر پایه روش موری-تاناکا بنا کرد [19]. این روش قادر به اندازه‌گیری خواص الکترومکانیکی کامپوزیت است. در مطالعه دیگری دای و انجی به بررسی خواص الکترومکانیکی کامپوزیت فیبر پیزوالکتریک پرداختند [20]. این کامپوزیت‌ها که از یک هسته کربنی و پوسته‌ی پیزوسرامیکی تشکیل شده‌اند از سفتی بالا و تحریک‌پذیری ولتاژی خوبی بهره‌مند است. این تحقیق با استفاده از تلفیق دو روش میکرومکانیکی موری-تاناکا و روش رقیق‌سازی انجام شده است. سپس مقایسه‌ای بین نتایج روش میکرومکانیکی با روش المان محدود انجام شده که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول بین این دو روش است. جیانگ و چونگ نقش فاز میانی را در تقویت خواص الکترومکانیکی کامپوزیت سه‌فازی بررسی کردند [21] و یافتند که مدل‌هایی که شامل فاز میانی‌اند دارای میدان‌های الکتریکی و مکانیکی قوی‌تری‌اند. شاید بتوان مطالعه انجام شده توسط برگر و همکاران را یکی از مورد توجه‌ترین تحقیقات در زمینه کامپوزیت‌های پیزوسرامیکی به حساب آورد [22]. آن‌ها با قرار دادن فیبرهای پیزوسرامیک در زمینه پلیمری و با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی خواص کامپوزیت‌های پیزوالکتریک را به دست آوردند. آن‌ها با تأکید بر چینش مربعی فیبرهای استوان‌های در کامپوزیت از روش همگن‌سازی به عنوان روش تحلیلی و روش المان محدود به عنوان روش عددی به منظور مطالعه این کامپوزیت‌ها استفاده کردند. یکی از پیش‌گام‌ترین کارها در زمینه کامپوزیت‌های پیزوالکتریکی تحقیق انجام شده توسط لی و دان است [23]. آن‌ها با بهره بردن از یک کامپوزیت دوفازی شامل زمینه و فیبرهای پیزوالکتریک به تحلیل میدان‌های داخلی این کامپوزیت همگن پرداختند. کارگوپتا و ونکاتش یک مدل تحلیلی ارائه کردند که می‌تواند پاسخ الکترومکانیکی یک سیستم کامپوزیتی پیزوالکتریکی را بدهد [24]. فاکری و همکاران به گسترش تنسور اشلبی برای مطالعه رفتار الکتروالاستیک مواد کامپوزیتی پرداختند [25]. این تنسورها که برای روش‌های موری-تاناکا، خوداتکا و تقریب رقیق‌سازی^۳ معتبر هستند، برای فرمول‌نویسی روش تحلیلی تکرارشونده استفاده شده است. هاشمی و همکاران با استفاده از یک روش همگن‌سازی، به مطالعه کامپوزیت پیزوالکتریکی که از پوشش‌های مختلف پوشیده شده پرداختند [26]. در

میانی را در مدل‌سازی وارد کرد. شکریه و همکاران با استفاده از مدل‌سازی میکرومکانیکی المان محدود، رفتار مکانیکی پلیمرهای تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را مورد مطالعه قرار دادند [3]. آن‌ها اثرات ابعاد المان حجمی نماینده را بر مدول الاستیک نانوکامپوزیت بررسی کردند. گریبل و هاماکرز با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی به بررسی تأثیر نانولوله‌های کربنی بر مدول الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلی‌اتیلن تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تک‌جداره پرداختند [4].

گو و همکاران با ترکیبی از روش‌های محاسباتی و تجربی، اتصال لایه میانی در کامپوزیت زمینه اپوکسی که با نانولوله‌های کربنی تک‌جداره تقویت شده‌اند را بررسی کردند [5]. ذاکری و همکاران با روش شبیه‌سازی چندمقیاسی به بررسی اثرات ضخامت فاز میانی بر خواص موثر الاستیک کامپوزیت تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی پرداختند [6]. اثرات لایه میانی ضعیف بین نانولوله کربنی و زمینه پلیمری بر خواص موثر کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با نانولوله کربنی توسط استوا و اسپانوس مورد مطالعه قرار گرفت [7]. آن‌ها گزارش کردند که اتصال ناقص در لایه میانی تأثیر چندانی بر مدول یانگ طولی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با نانولوله کربنی ندارد، بلکه عمده تأثیر آن بر خواص عرضی است. به منظور مدل‌سازی اتصال ناقص نانولوله کربنی و زمینه پلیمری، هامراند و همکاران تحلیل میکرومکانیکی را بر نانوکامپوزیت تقویت‌شده با نانولوله کربنی با اضافه کردن فاز میانی انجام دادند [8]. آبت‌اللهی و همکاران تحلیل چندمقیاسی را جهت بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با نانولوله تحت بارگذاری‌های مختلف انجام دادند [9]. فرانکلند و همکاران با استفاده از روش دینامیک مولکولی رفتار تنش-کرنش کامپوزیت تقویت‌شده با نانولوله‌ی کربنی را بررسی کردند [10].

همانطور که بیان شد مطالعات زیادی در خصوص توسعه کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله کربنی انجام شده است. اما مشکلات فراوانی بر سر راه ساخت این مواد وجود دارد، از جمله این مشکلات ناهمراستایی و تجمع نانولوله‌ها در یک مکان است. باور و همکاران نشان دادند که با به کارگیری فرآیند رسوبدهی بخار شیمیایی، لایه نازک یکنواختی از نانولوله‌های کربنی هم‌راستا بر سطح خارجی فیبر نوری می‌توان ایجاد کرد [11]. گارسیا و همکاران بر روی یک لایه هیبریدی که در آن فاز تقویت، فیبر آلومینای ساخته شده از نانولوله‌های کربنی رشد یافته بر سطح فیبر است، مطالعاتی را انجام دادند [12]. آن‌ها نشان دادند که خواص مکانیکی و الکتریکی چنین لایه‌ای به دلیل رشد نانولوله‌ی کربنی بر سطح فیبر آلومینا بهبود می‌یابد.

پاسخ‌های مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف فیبر فازی^۱ و با استفاده از روش‌های میکرومکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است [13, 14]. الیافی که با نانولوله کربنی پوشش داده شده‌اند و در یک زمینه پلیمری، فلزی یا سرامیکی قرار می‌گیرند، تشکیل کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف فیبر فازی را می‌دهند. آن‌ها تأثیرات درصد حجمی فیبر کربن و نانولوله کربنی و فاز میانی را بر پاسخ کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف فیبر فازی مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از روش موری-تاناکا، خواص مکانیکی یک کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف فیبر فازی با در نظر گرفتن فاز میانی و بدون آن بررسی شده است [15]. با در نظر گرفتن نانولوله‌های کربنی رشد کرده در جهت شعاعی بر سطح خارجی فیبر، خواص عرضی کامپوزیت بهبود داده شده است. کاندوال و

² Cylindrical

³ Dilute approximation

¹ Fuzzy Fiber Reinforced Composite

فیبر پیزوالکتریک و نانولوله‌ی کربنی مورد بررسی قرار گرفته است. نانولوله‌های کربنی در راستای شعاعی بر روی سطح فیبر پیزوالکتریک پخش می‌شوند و فیبر فازی را شکل می‌دهند. این فیبر پیزوالکتریک فازی⁶ در شکل 2 نشان داده شده است. وقتی این فیبر پیزوالکتریک فازی در داخل زمینه پلیمری قرار می‌گیرد فاصله‌ی بین نانولوله‌ها با پلیمر پر می‌شود، بنابراین نانولوله‌هایی که در جهات شعاعی هم‌راستا شده‌اند به تقویت کامپوزیت کمک می‌کنند. بنابراین فیبر پیزوالکتریک فازی را می‌توان به عنوان یک کامپوزیت فیبر فازی⁷ استوان‌های نشان داد. شعاع کامپوزیت فیبر فازی برابر جمع شعاع فیبر و طول نانولوله است. کامپوزیت فیبر فازی در شکل 1 نشان داده شده است. بنابراین المان حجمی کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیزوالکتریک فازی⁸ را می‌توان از دو فاز تشکیل داد به صورتی که فاز تقویت کامپوزیت فیبر فازی است و پلیمر به عنوان زمینه استفاده می‌شود. فیبر پیزوالکتریک در جهت ضخامت تک‌لایه قطبش شده است و تنها میدان الکتریکی که در اینجا در نظر گرفته می‌شود در جهت ضخامت تک‌لایه می‌باشد. بنابراین محاسبه خواص موثر کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیزوالکتریک فازی با تحلیل اجرا شده بر نانوکامپوزیت زمینه پلیمری⁹ آغاز می‌شود. در ادامه، با در نظر گرفتن نانوکامپوزیت زمینه پلیمری به عنوان زمینه و فیبر پیزوالکتریک به عنوان فاز تقویت، خواص موثر کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیزوالکتریک فازی به دست می‌آید.

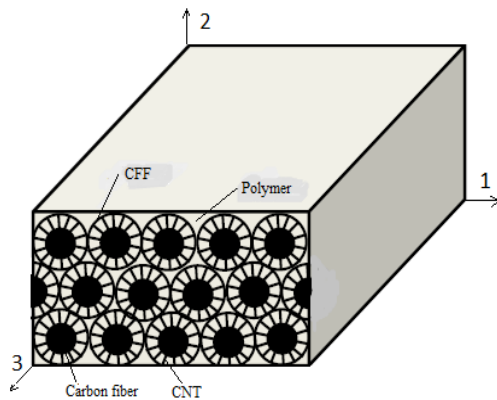


Fig. 1 A lamina of the FFRC including continuous unidirectional piezoelectric fiber, CNT and polymer matrix

شکل 1 تک‌لایه FFRC شامل فیبر پیزوالکتریک، نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری

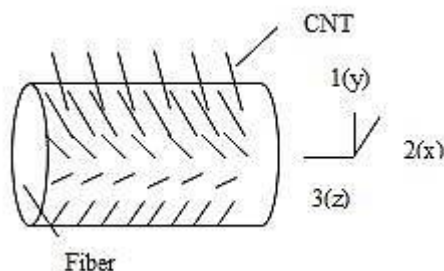


Fig. 2 Piezoelectric fiber coated with radially aligned CNT on its outer surface

شکل 2 فیبر پیزوالکتریک پوشیده شده از نانولوله‌های کربنی هم‌راستا در جهت شعاعی

مطالعه آن‌ها فعل و انفعالات فاز میانی بین هر یک از اجزا به خوبی دیده شده است. آن‌ها مطالعه‌شان را روی ذرات کروی پخش شده در زمینه پلیمری، فیبرهای شیشه پوشیده شده با پوشش پیزوالکتریک پخش شده در زمینه اپوکسی و ذرات پیزوالکتریک کروی پوشش داده شده با پوشش پیزوالکتریکی اجرا کردند. با استفاده از روش میدان میانگین¹ که برگرفته از روش معروف موری-تاناکا است، کوتساوا و همکاران با تغییر دادن شکل ناخالصی² و جهت قطبش³ خواص الکتروالاستیک ماده‌ی کامپوزیتی پیزوالکتریکی را مطالعه کردند [27].

در جهت کارهای انجام شده قبلی، دالا و رای مطالعه‌ای را بر روی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با فیبر فازی انجام دادند [28]. آن‌ها با استفاده از دو روش موری-تاناکا و مدل سلول واحد⁴ نتایج مربوط به خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت را استخراج کردند. آن‌ها تحلیلی بر روی کامپوزیت انجام دادند تا خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت را برای حالتی که نانولوله‌ی کربنی به کار نمی‌رود بررسی کنند و شاهد بهبود نتایج بر اثر استفاده از نانولوله‌ی کربنی شدند.

مدل سلول واحد یک مدل ساده و کارآمد برای محاسبه خواص کامپوزیت‌ها در شرایط مختلف است [29]. در این پژوهش نیز با استفاده از مدل سلول واحد خواص الکتروالاستیک کامپوزیت هیبریدی تقویت‌شده با فیبر فازی استخراج شده است. نوآوری این پژوهش بهره‌بردن از مدل سلول واحد برای استخراج ثابت‌های الاستیک و پیزوالکتریک است. روش سلول واحد با توجه به سادگی روابط و هزینه‌ی محاسباتی کم از شایستگی خوبی برای محاسبه‌ی ضرایب الکتروالاستیک کامپوزیت برخوردار است. بررسی تاثیرات اندازه نانولوله‌ی کربنی و استفاده از فیبرهای پیزوالکتریک مختلف در دستور کار این پژوهش قرار دارد.

2- روابط ساختاری، المان نماینده و تحلیل

از کامپوزیت‌های پیزوالکتریکی می‌توان برای محرک‌های پخش‌کننده استفاده نمود. این کامپوزیت‌ها خواص خوبی را از خود نشان می‌دهند. جهت قطبش فیبرهای پیزوالکتریکی در انواع صفحات کامپوزیتی در جهت ضخامت تک‌لایه است، در حالی که صفحات بالایی و پایینی تک‌لایه الکترودی شده‌اند. ضریب پیزوالکتریک e_{33} این پیزوالکتریک‌ها مقدار تنش اعمالی تحریک شده در جهت فیبر را نشان می‌دهد [29]. e_{31} بر تنش اعمالی در جهت عمود بر فیبر دلالت می‌کند. تحریک درون‌صفحه‌ای به وسیله یک محرک⁵ در مقایسه با تحریک خارج‌صفحه‌اش قابل اغماض است. اگر توانایی تحریک درون‌صفحه‌ای یک محرک زیاد شود، در عملکرد آن تاثیر بسزایی خواهد داشت. برای بهبود خواص درون‌صفحه‌ای موثر این کامپوزیت‌ها، سطح خارجی فیبر را با پوششی از نانولوله‌های کربنی می‌پوشانند [30]. در اینجا فیبرهای پیزوالکتریک در جهت‌های طولی و در یک راستا قرار گرفته‌اند. نانولوله‌های کربنی بر روی این فیبرها پخش شده‌اند. این مطالعه به بررسی خواص الاستیک و پیزوالکتریک این نوع از کامپوزیت‌ها می‌پردازد.

شکل 1 شماتیکی از یک تک‌لایه کامپوزیت تقویت‌شده با پیروفیبرهای فازی را نشان می‌دهد. خواص ساختاری ویژه این کامپوزیت‌های تقویت‌شده با

¹ Mean field

² Inhomogeneity

³ Polling direction

⁴ Simplified Unit Cell Method

⁵ Actuator

⁶ Piezoelectric Fuzzy Fiber

⁷ Composite Fuzzy Fiber

⁸ Piezoelectric Fuzzy Fiber Reinforced Composite

⁹ Polymer Matrix Nano Composite

شده است. ضریب پیزوالکتریک e_{31} تنش نرمال ایجاد شده در جهت 1 را به علت میدان الکتریکی اعمالی در جهت 3 مشخص می‌کند. بنابراین برای محاسبه e_{31} باید روابط ساختاری مرتبط با این ضریب را در نظر بگیریم. تک لایه کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیزوالکتریک فازی تحت میدان الکتریکی در جهت 3 قرار دارد. بنابراین بر اساس جهات اصلی ماده، روابط ساختاری برای یک زیرسلول به صورت رابطه (1) بیان می‌شود.

$$\{\sigma^{\alpha\beta}\} = [C^{\alpha\beta}]\{\varepsilon^{\alpha\beta}\} - \{e^{\alpha\beta}\}E_3 \quad (1)$$

بردار ضرایب پیزوالکتریک به صورت رابطه (2) بیان می‌شوند، بالا نویس هر یک از حروف نشان‌دهنده شماره زیرسلول است.

$$\{e^{\alpha\beta}\} = [e_{31}^{\alpha\beta} \quad e_{32}^{\alpha\beta} \quad e_{33}^{\alpha\beta} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (2)$$

رابطه الکتروالاستیک کامپوزیتی که در جهت طولی فیبر قطبش شده است به صورت رابطه (3) می‌باشد [31].

$$\begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ D_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & -e_{31} \\ C_{12} & C_{22} & C_{13} & -e_{32} \\ C_{12} & C_{13} & C_{33} & -e_{33} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \kappa_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ E_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

شرایط تعادل برای المان نماینده در جهات نرمال بین تنش اعمال شده کلی (S) و تنش‌های محلی (σ) بین زیرسلول‌ها با رابطه (4) بیان می‌شود [32].

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^r b_{\beta} \sigma_{11}^{1\beta} = L_r S_{11} \\ \sum_{\alpha=1}^c a_{\alpha} \sigma_{22}^{\alpha 1} = L_c S_{22} \\ \sum_{\beta=1}^r \sum_{\alpha=1}^c a_{\alpha} b_{\beta} \sigma_{33}^{\alpha\beta} = L_c L_r S_{33} \\ \sum_{\alpha=1}^c \sum_{\beta=1}^r a_{\alpha} b_{\beta} D_{33}^{\alpha\beta} = L_r L_c \bar{D}_{33} \end{cases} \quad (4)$$

از تعادل بین تنش‌ها در راستای سطوح اتصال زیرسلول‌ها به رابطه (5) می‌رسیم [33].

$$\begin{cases} \sigma_{11}^{1\beta} = \sigma_{11}^{\alpha 1} \quad (\alpha > 1) \\ \sigma_{22}^{\alpha 1} = \sigma_{22}^{\alpha\beta} \quad (\beta > 1) \\ \sigma_{11}^{\alpha\beta} = \sigma_{22}^{\alpha\beta} = 0 \\ D_1^{\alpha\beta} = D_2^{\alpha\beta} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

سازگاری بین جابجایی‌ها در هر زیرسلول منجر به رابطه (6) می‌شود.

$$\begin{cases} \sum_{\alpha=1}^c a_{\alpha} \varepsilon_{11}^{\alpha 1} = \sum_{\alpha=1}^c a_{\alpha} \varepsilon_{11}^{\alpha\beta} \quad \beta > 1 \\ \sum_{\beta=1}^r b_{\beta} \varepsilon_{22}^{1\beta} = \sum_{\beta=1}^r b_{\beta} \varepsilon_{22}^{\alpha\beta} \quad \alpha > 1 \\ \varepsilon_{33}^{11} = \varepsilon_{33}^{\alpha\beta} \quad (\alpha \times \beta \neq 1) \\ E_3^{11} = E_3^{\alpha\beta} \quad (\alpha \times \beta \neq 1) \end{cases} \quad (6)$$

رابطه‌ی تنش- کرنش سه‌بعدی بین تنش‌های نرمال و کرنش‌ها برای زیرسلول $\alpha\beta$ می‌تواند به صورت رابطه (7) بیان شود.

در مدل سلول واحد المان حجمی نماینده کامپوزیت به $c \times r$ سلول مستطیلی تقسیم می‌شود. المان حجمی نماینده دارای طول L_c و L_r به ترتیب در جهات x و y است. طول هر سلول در جهت x و y با a_{α} در جهت y با b_{β} مشخص می‌شود. برای محاسبه‌ی خواص نانوکامپوزیت زمینه پلیمری، کامپوزیت فیبر فازی و کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیزوالکتریک فازی فرض می‌شود که فاز تقویت به شکل الیاف در زمینه دارای آرایش منظم چیدمان مربعی باشد. المان حجمی نماینده نانوکامپوزیت زمینه پلیمری با در نظر گرفتن فاز میانی مدل می‌شود. این فاز میانی ناشی از واکنش غیرپیوندی بین اتم‌های نانولوله کربن و زمینه پلیمری است. با توجه به اینکه در نانوکامپوزیت پلیمری، مولکول‌های پلیمر فضای خالی بین نانولوله‌ها را پر می‌کنند، به علت وجود نیروی واندروالس بین نانولوله‌ی کربنی و پلیمر، فاز میانی که به صورت محیطی نیرویی بوده در نظر گرفته شده است. المان حجمی نماینده نانوکامپوزیت زمینه پلیمری در شکل 3 نشان داده شده است. باید توجه کرد که طول المان حجمی نماینده در جهت‌های x و y به ترتیب برابر $L_c = d/2 + t_i + X$ و $L_r = d/2 + t_i + X$ است. که d و t_i به ترتیب قطر فیبر و ضخامت فاز میانی‌اند. هم‌چنین $X = (1/\sqrt{f} - 1)d/2 - t_i$ است که f درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی است. هم‌چنین المان حجمی نماینده کامپوزیت فیبر فازی و کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیزوالکتریک فازی در شکل 4 نشان داده شده است.

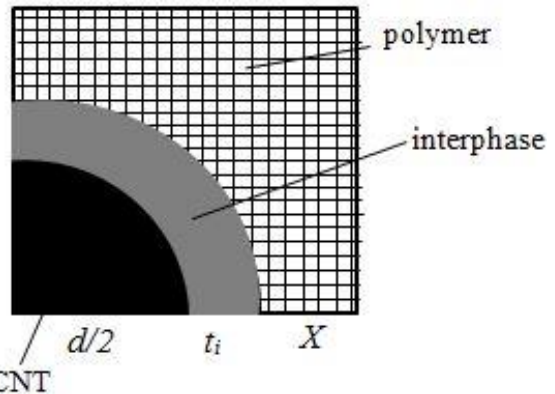


Fig. 3 Selected RVE for modeling of PMNC

شکل 3 المان حجمی نماینده برای مدل کردن PMNC

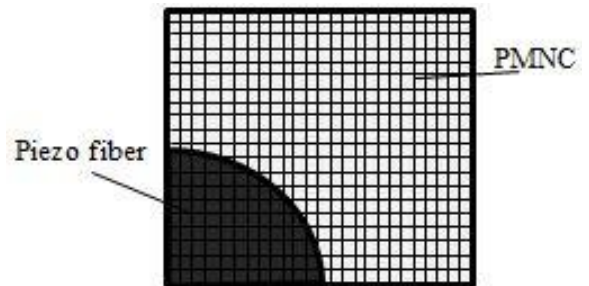


Fig. 4 Selected RVE for modeling of CFF and PFFRC

شکل 4 المان حجمی نماینده برای مدل کردن PFFRC

از آنجایی که فازهای ساختاری نانوکامپوزیت زمینه پلیمری مواد پیزوالکتریک نیستند، ضرایب پیزوالکتریک موثر برای نانوکامپوزیت زمینه پلیمری یک بردار بدون مقدار خواهد بود. فیبرهای پیزوالکتریک در جهت طولی و به صورت یکنواخت در زمینه نانوکامپوزیت زمینه پلیمری پخش شده‌اند. بررسی حاضر در جهت محاسبه ضریب پیزوالکتریک کامپوزیت مطرح

نانوکامپوزیت زمینه پلیمری رول شده توسط رابطه‌ی (13) نشان داده شده است.

$$[\bar{C}^{PMNC}] = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11}^{NC} & \bar{C}_{12}^{NC} & \bar{C}_{13}^{NC} & 0 & 0 & \bar{C}_{16}^{NC} \\ \bar{C}_{12}^{NC} & \bar{C}_{22}^{NC} & \bar{C}_{23}^{NC} & 0 & 0 & \bar{C}_{26}^{NC} \\ \bar{C}_{13}^{NC} & \bar{C}_{23}^{NC} & \bar{C}_{33}^{NC} & 0 & 0 & \bar{C}_{36}^{NC} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44}^{NC} & \bar{C}_{45}^{NC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{45}^{NC} & \bar{C}_{55}^{NC} & 0 \\ \bar{C}_{16}^{NC} & \bar{C}_{26}^{NC} & \bar{C}_{36}^{NC} & 0 & 0 & \bar{C}_{66}^{NC} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_{11}^{NC} &= m^4 C_{11}^{NC} + 2m^2 n^2 (C_{12}^{NC} + 2C_{66}^{NC}) + n^4 C_{22}^{NC} \\ \bar{C}_{12}^{NC} &= n^2 m^2 (C_{11}^{NC} + C_{22}^{NC} - 4C_{66}^{NC}) \\ &\quad + (n^4 + m^4) C_{12}^{NC} \\ \bar{C}_{13}^{NC} &= m^2 C_{13}^{NC} + n^2 C_{23}^{NC} \\ \bar{C}_{16}^{NC} &= nm [m^2 (C_{11}^{NC} - C_{12}^{NC} - 2C_{66}^{NC}) \\ &\quad + n^2 (C_{12}^{NC} - C_{22}^{NC} + 2C_{66}^{NC})] \\ \bar{C}_{22}^{NC} &= n^4 C_{11}^{NC} + 2m^2 n^2 (C_{12}^{NC} + 2C_{66}^{NC}) + m^4 C_{22}^{NC} \\ \bar{C}_{23}^{NC} &= n^2 C_{13}^{NC} + m^2 C_{23}^{NC} \\ \bar{C}_{26}^{NC} &= nm [n^2 (C_{11}^{NC} - C_{12}^{NC} - 2C_{66}^{NC}) \\ &\quad + m^2 (C_{12}^{NC} - C_{22}^{NC} + 2C_{66}^{NC})] \\ \bar{C}_{33}^{NC} &= C_{33}^{NC} \\ \bar{C}_{36}^{NC} &= mn (C_{13}^{NC} - C_{23}^{NC}) \\ \bar{C}_{44}^{NC} &= m^2 C_{44}^{NC} + n^2 C_{55}^{NC} \\ \bar{C}_{45}^{NC} &= mn (C_{55}^{NC} - C_{44}^{NC}) \\ \bar{C}_{55}^{NC} &= n^2 C_{44}^{NC} + m^2 C_{55}^{NC} \\ \bar{C}_{66}^{NC} &= n^2 m^2 (C_{11}^{NC} - C_{12}^{NC} + C_{22}^{NC}) + (n^2 - m^2) C_{66}^{NC} \end{aligned} \quad (14)$$

پس از محاسبه‌ی خواص الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلیمری رول شده خواص کامپوزیت فیبر فازی محاسبه می‌شود. در این بخش ماده نانوکامپوزیت زمینه پلیمری و فیبر پیزوالکتریک به ترتیب به عنوان زمینه و فاز تقویت معرفی می‌شوند. در پایان با استفاده از خواص موثر کامپوزیت فیبر فازی به عنوان فاز تقویت و پلیمر به عنوان فاز زمینه خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیزوالکتریک فازی به وسیله روابط میکرومکانیکی محاسبه می‌شود. نانولوله‌ی کربنی که برای تقویت کامپوزیت استفاده می‌شود یک سازه استوانه‌ای توخالی است که با پوششی از شش‌وجهی‌های پیوسته پوشانده شده است [34]. فیبر پیزوالکتریک و نانولوله‌ی کربنی مواد ایزوتروپ عرضی هستند. قطر نانولوله‌ی کربنی و فیبر پیزوالکتریک به ترتیب 0.39 nm و 10 μm است. ضخامت فاز میانی برابر 0.3333 nm است. همچنین مدول الاستیک و نسبت پواسون فاز میانی به ترتیب برابر 19.26 GPa و 0.34 اند [14]. خواص مکانیکی نانولوله‌های کربنی، فیبر پیزوالکتریک و زمینه در جدول 1 نشان داده شده است [28]. قطر مربوط به CNT(20,0)، CNT(10,0) و CNT(5,0) به ترتیب برابر 1.56، 0.78 و 0.39 nm اند.

درصد حجمی اشغال شده توسط نانولوله، به قطر نانولوله، قطر فیبر کربن و فاصله‌ی بین مراکز دو نانولوله وابسته است. بیشترین درصد حجمی نانولوله کربنی در کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیزوالکتریک فازی و نانوکامپوزیت زمینه پلیمری به ترتیب بر طبق رابطه (15) و (16) بیان می‌شوند [28].

$$(V_{CNT})_{max} = \frac{V_{CNT}}{V_{FFRC}} = \frac{\pi d_n^2}{2(d_n + 1.7)^2} \left(\sqrt{\frac{\pi v_f}{2\sqrt{3}}} - v_f \right) \quad (15)$$

$$(v_{nt})_{max} = \frac{V_{CNT}}{V_{PMNC}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{D^2}{(D^2 - d^2)} (V_{CNT})_{max} \quad (16)$$

$$\{\varepsilon\}^{\alpha\beta} = [S]^{\alpha\beta} \{\sigma\}^{\alpha\beta} \quad (7)$$

که $\{\varepsilon\}^{\alpha\beta}$ و $\{\sigma\}^{\alpha\beta}$ بردارهای تنش نرمال و کرنش هستند و $[S]^{\alpha\beta}$ ماتریس نرمی الاستیک است. با قرار دادن معادله (7) در معادله (6) و با در نظر گرفتن معادله‌های (1) و (2)، تعداد $c + r + 2rc$ سری از معادلات با همین تعداد مجهول به دست خواهد آمد [32].

$$[A]_{m \times m} [\sigma]_{m \times 1} = [F]_{m \times 1} \quad (m = c + r + 2rc) \quad (8)$$

که $[\sigma]_{m \times 1}$ بردار تنش محلی است، بردار $[F]_{m \times 1}$ نیروی خارجی است، همچنین $[A]_{m \times m}$ ماتریس ضرایب است.

همانطور که در شکل 2 مشخص است، کربن نانولوله‌های تک‌جداره بر روی سطح خارجی فیبر رشد کرده‌اند. دقت شود که همین هندسه برای تمام نانولوله‌ها در کامپوزیت در نظر گرفته شده است. ماده پلیمری فاصله بین نانولوله‌های کربنی را پر می‌کند. به دلیل حضور نانولوله‌ی کربنی، ماده پلیمری در جهت عمود بر راستای طولی فیبر پیزوالکتریک تقویت شده است. در ابتدا از مدل میکرومکانیکی برای استخراج خواص نانوکامپوزیت زمینه پلیمری استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن نانوکامپوزیت زمینه پلیمری شامل نانولوله‌ی کربنی به عنوان فاز تقویت و ماده پلیمری به عنوان فاز زمینه و فاز میانی که به علت فعل و انفعالات اتمی بین نانولوله کربنی و زمینه ایجاد می‌شود، اولین سری از محاسبات برای استخراج خواص نانوکامپوزیت زمینه پلیمری اجرا می‌شود.

باید دقت شود که تحلیل میکرومکانیکی خواص الکتروالاستیک مربوط به کامپوزیت فیبر فازی به وسیله‌ی نانوکامپوزیت زمینه پلیمری رول شده انجام می‌شود. با در نظر گرفتن ماتریس $[\bar{C}^{PMNC}]$ به عنوان ماتریس سفتی نانوکامپوزیت زمینه پلیمری رول نشده، ماتریس سفتی مربوط به نانوکامپوزیت زمینه پلیمری رول شده به وسیله رابطه (9) بیان می‌شود [34].

$$[C^{PMNC}] = \frac{1}{\pi(R^2 - a^2)} \int_0^{2\pi} \int_a^R [\bar{C}^{PMNC}] r dr da \quad (9)$$

a و R به ترتیب شعاع فیبر کربن و شعاع کامپوزیت فیبر فازی است. $[\bar{C}^{PMNC}]$ به وسیله رابطه (10) به دست می‌آید. باید دقت شود که $[C^{NC}]$ ماتریس سفتی الاستیک کامپوزیت رول نشده است.

$$[\bar{C}^{PMNC}] = [T]^{-T} [C^{NC}] [T]^{-1} \quad (10)$$

با در نظر گرفتن یک دوران حول محور z و داشتن ماتریس کسینوس‌های هادی که رابطه‌ی بین ماتریس‌های سفتی در جهت‌های اصلی المان و جهت‌های کلی را نشان می‌دهد، ماتریس انتقال T به صورت رابطه (12) بیان می‌شود [30].

$$Q = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & -mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -n & m & 0 \\ -2mn & -2mn & 0 & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Q ماتریس کسینوس‌های هادی و در رابطه (12)، m و $n = \cos\theta$ که زاویه‌ی دوران حول محور مختصات است. خواص الاستیک

روش میکرومکانیکی دیده می‌شود. شکل‌های 7 و 8 مربوط به ضرایب سفتی C_{12} و C_{23} کامپوزیت می‌باشد. در این شکل‌ها هم سازگاری نتایج دو روش به خوبی دیده می‌شود. شکل 9 معرف نتایج مربوط به ضریب C_{44} است. این شکل تطابق کامل دو مدل میکرومکانیکی را در تعیین نتیجه مربوط به ضریب سفتی مرتبط با مدول برشی مشخص می‌کند. شکل‌های 10 و 11 نزدیکی بسیار خوب روش سلول واحد و روش سلولی، در مورد نتایج پیش‌بینی شده مربوط به ضرایب پیژوالکتریک را به خوبی نشان می‌دهد. باید توجه شود که اثرات فاز میانی در این نمودارها دیده نشده است و از فیبر پیژوالکتریک PZT-5A استفاده شده است. شکل‌های 12 تا 19 تغییرات ضرایب الکتروالاستیک کامپوزیت را به ازای تغییرات قطر نانولوله و در نتیجه‌ی آن تغییرات ثابت‌های نشان می‌دهد. در تمام نمودارها به جز مواردی که به صورت مستقیم به نوع نانولوله اشاره شده باشد از نانولوله‌ی کربنی (5,0) با قطر 0.39 nm و طول 8.52 nm استفاده شده است [38].

با توجه به شکل 12 که نشان‌گر تغییرات ضریب سفتی C_{11} نسبت به درصد حجمی فیبر پیژوالکتریک است، مشخص می‌شود که با افزایش قطر نانولوله‌ی کربنی و در نتیجه تغییر ضرایب سفتی نانولوله، نمودار مقادیر کوچکتری را نشان می‌دهد. این می‌تواند مربوط به ضعیف‌تر شدن نانولوله‌ی کربنی باشد. در شکل 13 نتایج مربوط به ضریب سفتی C_{33} نسبت به تغییرات درصد حجمی فیبر نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود تغییرات قطر نانولوله و در ادامه‌ی آن تغییرات خواص نانولوله تاثیر چندانی روی این ثابت ندارد که این موضوع با توجه به نقش کم نانولوله در محاسبه ضریب سفتی طولی کامپوزیت (در جهت ضخامت لایه) قابل توجه است.

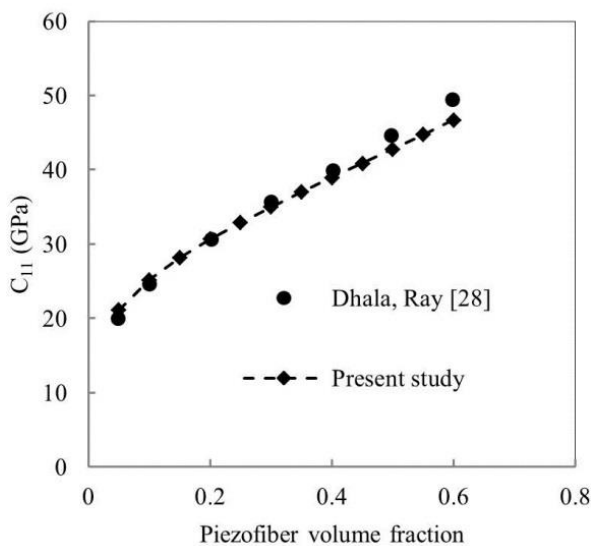


Fig. 5 Comparison of C_{11} for two micromechanical models

شکل 5 مقایسه‌ی C_{11} برای دو مدل میکرومکانیکی

شکل‌های 14 و 15 به ترتیب مربوط به ضرایب سفتی C_{12} و C_{23} کامپوزیت است. از مقایسه این دو شکل معلوم می‌شود که تغییرات قطر نانولوله کربنی تاثیر بیشتری بر نتایج مربوط به ضریب C_{12} دارد. در ادامه همانطور که از شکل 16 مشخص است ضریب سفتی مربوط به مدول برشی کامپوزیت به طرز قابل توجهی تحت تاثیر تغییرات مربوط به قطر نانولوله قرار گرفته است.

در این روابط d قطر فیبر کربن است، d_n قطر نانولوله‌ی کربنی و D قطر کامپوزیت تقویت شده با فیبر پیژوالکتریک فازی است که توسط رابطه (17) به درصد حجمی فیبر کربن در کامپوزیت مرتبط می‌شود [28].

$$v_f = \frac{V_f}{V_{PFRC}} = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}D^2} \quad (17)$$

جدول 1 خواص الکتروالاستیک فازهای ساختاری کامپوزیت

Table. 1 Electroelastic properties of PFFRC constituent phases

CNT (20,0) [35]	CNT (10,0) [35]	CNT (5,0) [35]	Matrix [28]	PZT -7A [36]	PZT -5A [28]	
940.2	1857	3562	8	158	121	C_{11} (GPa)
77.1	165.8	409.5	4.4	88	75.4	C_{12} (GPa)
224.1	377.2	193.7	4.4	81	75.2	C_{23} (GPa)
246	551.4	1587	8	125	111	C_{33} (GPa)
396	787.7	1537	8	22	21.1	C_{55} (GPa)
-	-	-	-	-2.2	-5.4	e_{31} (C/m ²)
-	-	-	-	9.5	9.5	e_{33} (C/m ²)
-	-	-	-	425	1700	κ_{33}/κ_0

3- نتایج و بحث

در ابتدا برای اعتبارسنجی مدل میکرومکانیکی سلول واحد ساده‌شده، مدول الاستیک کامپوزیت تقویت‌شده با فیبر فازی مدول سلول واحد با نتایج آزمایشگاهی و عددی کولکارنی مقایسه شده‌اند [37]. خواص مکانیکی نانولوله‌ی کربنی و زمینه در جدول 2 آورده شده‌اند. نتایج تحلیل در جدول 3 نشان داده شده‌اند. درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی و فیبر کربن به ترتیب 2 و 40% اند.

جدول 2 خواص مکانیکی نانولوله‌ی کربنی و اپین 862

Table 2 The mechanical properties of the CNT and Epon 862

ν_T	ν_L	E_T (GPa)	E_L (GPa)	ماده
0.4693	0.162	49.9	800	نانولوله‌ی کربنی
				ایزوتروپ عرضی [35]
0.3	0.3	1000	1000	نانولوله‌ی کربنی
				ایزوتروپ [17]
0.3	0.3	2.026	2.026	زمینه Epon [37]
0.3	0.27	18.5	294	فیبر کربن IM7 [37]

جدول 3 مقایسه‌ی بین نتایج مربوط به مدول الاستیک کامپوزیت تقویت‌شده با فیبر فازی

Table 3 Comparison of the FFRC elastic modulus

E (GPa)	روش
10.02	آزمایشگاهی [37]
13.93	عددی [37]
12.789	مدل حاضر، نانولوله‌ی کربنی ایزوتروپ
11.8	مدل حاضر، نانولوله‌ی کربنی ایزوتروپ عرضی

در ادامه برای اعتبارسنجی مدل، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده با نتایج دالا و رای انجام شده است [28]. شکل‌های 5 و 6 به ترتیب ضرایب سفتی الاستیک C_{11} و C_{33} را نشان می‌دهند. تطابق بسیار خوبی بین نتایج دو

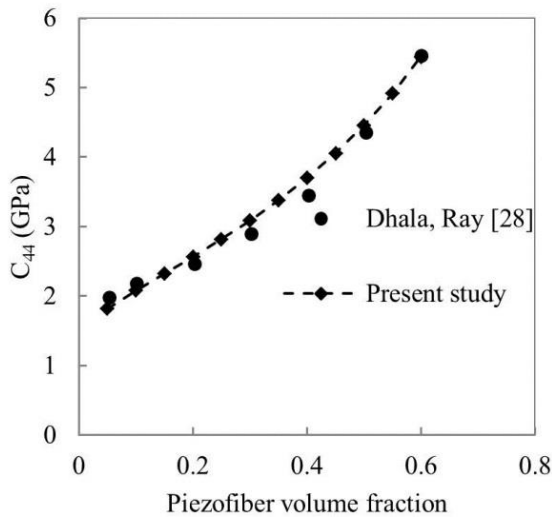


Fig. 9 Comparison of C_{44} for two micromechanical models

شکل 9 مقایسه‌ی C_{44} برای دو مدل میکرومکانیکی

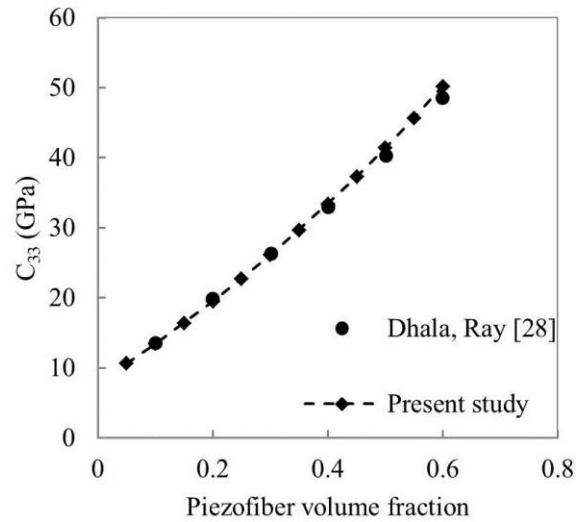


Fig. 6 Comparison of C_{33} for two micromechanical models

شکل 6 مقایسه‌ی C_{33} برای دو مدل میکرومکانیکی

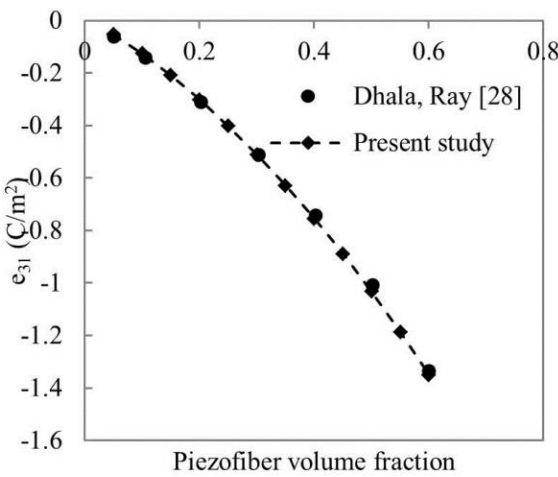


Fig. 10 Comparison of e_{31} for two micromechanical models

شکل 10 مقایسه‌ی e_{31} برای دو مدل میکرومکانیکی

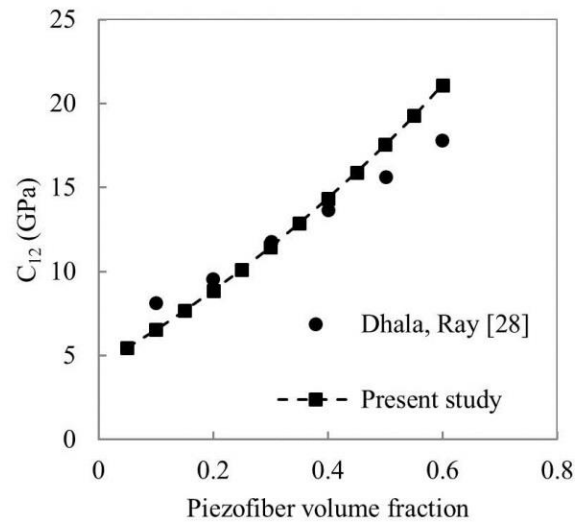


Fig. 7 Comparison of C_{12} for two micromechanical models

شکل 7 مقایسه‌ی C_{12} برای دو مدل میکرومکانیکی

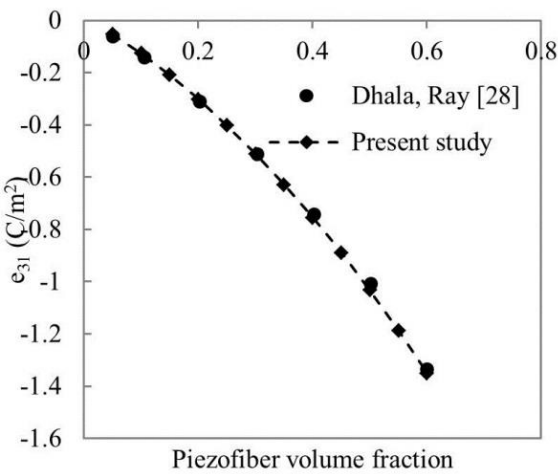


Fig. 11 Comparison of e_{33} for two micromechanical models

شکل 11 مقایسه‌ی e_{33} برای دو مدل میکرومکانیکی

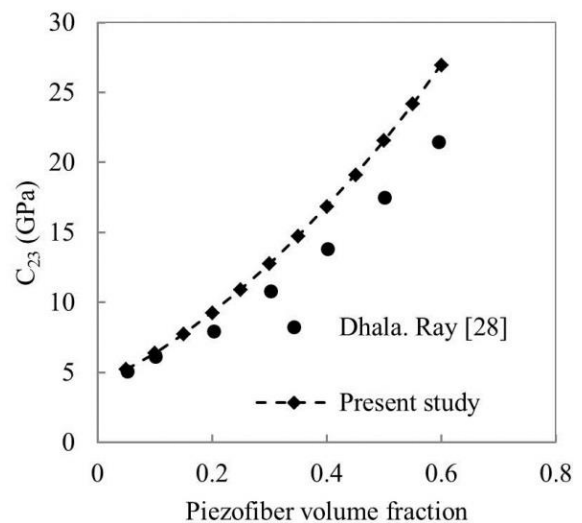


Fig. 8 Comparison of C_{23} for two micromechanical models

شکل 8 مقایسه‌ی C_{23} برای دو مدل میکرومکانیکی

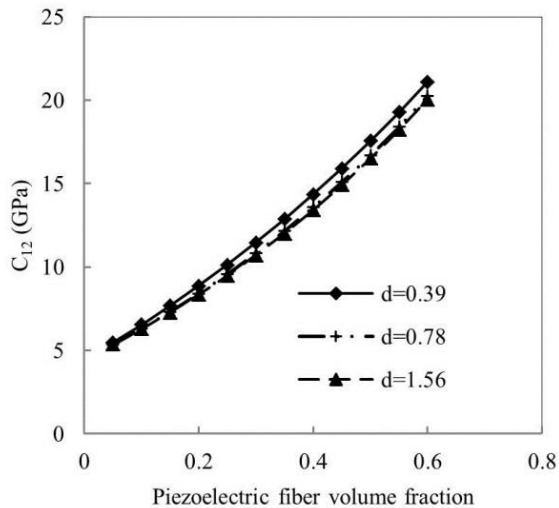


Fig. 14 Effect of carbon nanotube diameter on C_{12} of PPFRC
 شکل 14 اثر قطر نانولوله‌ی کربنی بر ثابت C_{12} کامپوزیت هیبریدی

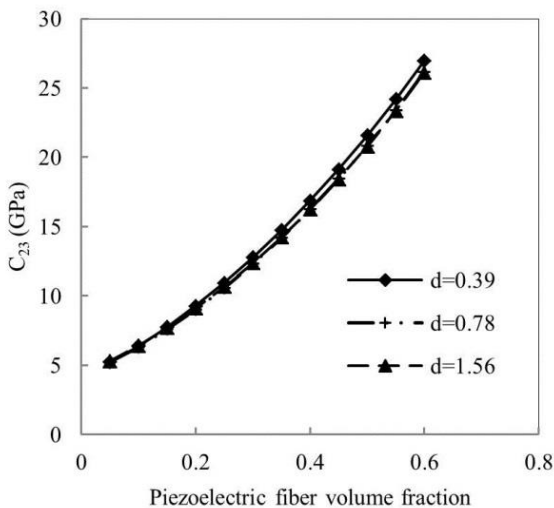


Fig. 15 Effect of carbon nanotube diameter on C_{23} PPFRC
 شکل 15 اثر قطر کربن نانولوله بر ثابت C_{23} کامپوزیت هیبریدی

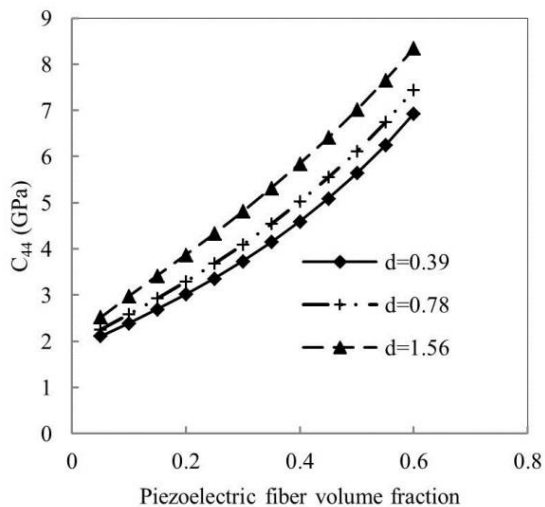


Fig. 16 Effect of carbon nanotube diameter on C_{44} of PPFRC
 شکل 16 اثر قطر نانولوله‌ی کربنی بر ثابت C_{44} کامپوزیت هیبریدی

همانطور که از این شکل مشخص است با افزایش قطر نانولوله این ضریب هم افزایش می‌یابد. شکل‌های 17 و 18 نشان‌دهنده‌ی تاثیرات ناچیز تغییرات قطر نانولوله بر ضرایب پیزوالکتریک است. نانولوله‌ی کربنی فاقد خواص پیزوالکتریک است که این امر توجیه‌کننده این تاثیرات ناچیز است. شکل 19 مربوط به تغییرات ثابت دی‌الکتریک با درصد حجمی فیبر پیزوالکتریک است، این شکل هم حاکی از تاثیرات کم تغییرات قطر نانولوله بر نتایج نهایی پیزوالکتریکی کامپوزیت است.

تا اینجا نتایج به دست آمده مربوط به در نظر گرفتن درصد حجمی بیشینه برای نانولوله‌ی کربنی بود، نتایج نشان داده در شکل‌های 20 تا 28 با در نظر گرفتن درصدهای حجمی نصف مقدار بیشینه و ربع مقدار بیشینه برای نانولوله‌ی کربنی به دست آمده است. این موضوع در شکل 20 دیده می‌شود، ضریب سفتی عرضی C_{11} کامپوزیت (در جهت عمود بر فیبر و در راستای نانولوله‌ها) به شدت تحت تاثیر درصد حجمی نانولوله تغییر کرده است، به صورتی که با کاهش درصد حجمی نانولوله و کم شدن سهم آن در کامپوزیت، ضریب سفتی عرضی کاهش پیدا کرده است. شکل 21 مربوط به تغییرات ضریب سفتی طولی C_{33} (در جهت فیبر کربن) نسبت به تغییرات درصد حجمی فیبر پیزوالکتریک است.

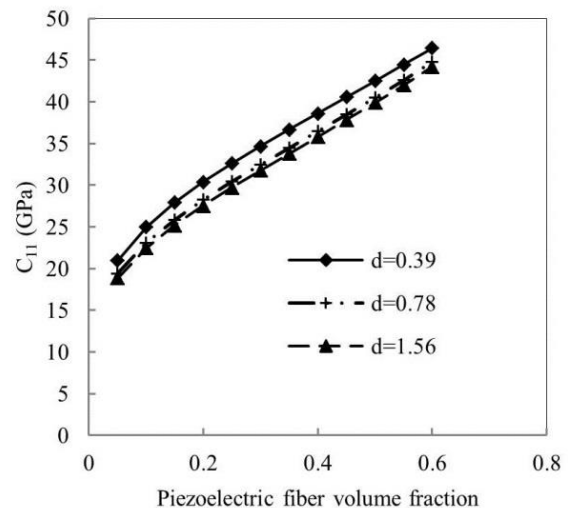


Fig. 12 Effect of carbon nanotube diameter on C_{11} of PPFRC
 شکل 12 اثر قطر کربن نانولوله بر ثابت C_{11} کامپوزیت هیبریدی

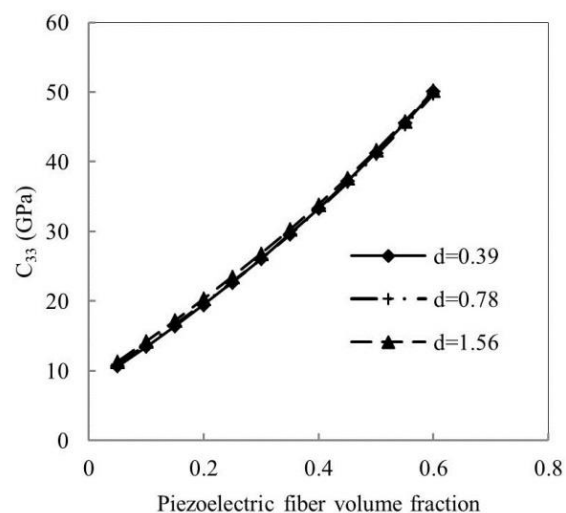


Fig. 13 Effect of carbon nanotube diameter on C_{33} of PPFRC
 شکل 13 اثر قطر نانولوله‌ی کربنی بر ثابت C_{33} کامپوزیت هیبریدی

همانطور که از این شکل مشخص است با کاهش درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی، ضریب C_{33} کاهش می‌یابد. شکل‌های 22 و 23 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تغییرات ضرایب C_{12} و C_{23} نسبت به تغییرات درصد حجمی فیبر پیزوالکتریک در نسبت حجمی‌های مختلف نانولوله‌ی کربنی است. باید دقت شود که کاهش درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی تأثیرات مشابهی را روی این دو نمودار گذاشته است و هر دو با کاهش درصد حجمی نانولوله از مقدار بیشینه، روند کاهشی را تجربه می‌کنند. شکل 24 مربوط به تغییرات ضریب سفتی مربوط به مدول برشی کامپوزیت نسبت به تغییرات درصد حجمی فیبر است. شکل‌های 25 تا 27 مربوط به تغییرات ضرایب پیزوالکتریکی و دی‌الکتریکی کامپوزیت نسبت به تغییرات درصد حجمی فیبر است. هر سه شکل دارای روند صعودی هستند. همانطور که از مقایسه‌ی شکل‌های 25 و 26 می‌توان مشاهده کرد، ضریب پیزوالکتریک e_{31} تغییرات بیشتری را نسبت به ضریب e_{33} تجربه می‌کند. این موضوع نشان‌دهنده‌ی تأثیرپذیری بودن e_{31} نسبت به تغییرات درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی است. همانطور که در شکل 27 دیده می‌شود، ضریب دی‌الکتریک کمتر دچار تغییرات شده است. با توجه به اینکه ضریب دی‌الکتریک در جهت طولی به دست می‌آید می‌توان این تغییرات اندک را توضیح داد.

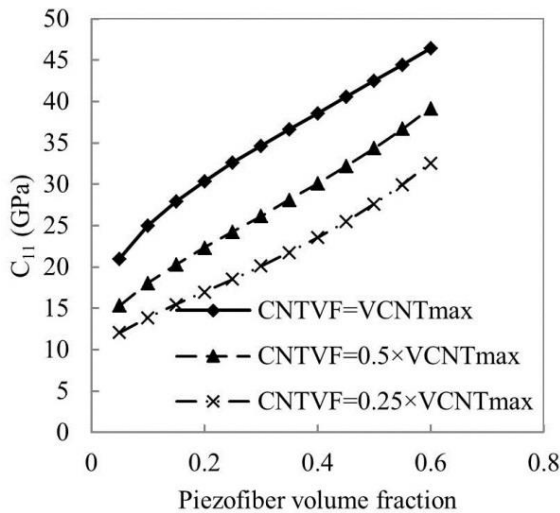


Fig. 20 Effect of CNT volume fraction on C_{11} of PFFRC

شکل 20 اثر درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی بر ثابت C_{11} کامپوزیت هیبریدی

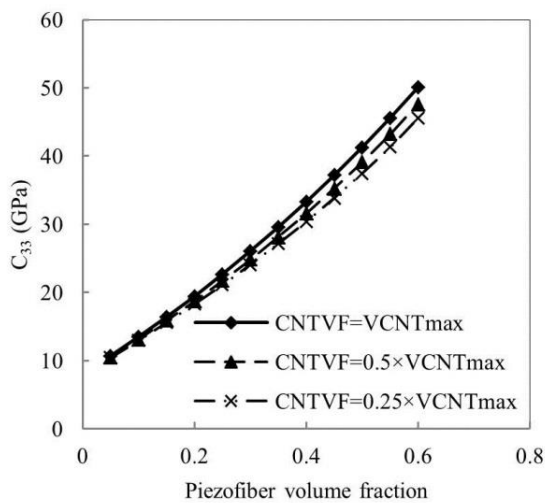


Fig. 21 Effect of CNT volume fraction on C_{33} of PFFRC

شکل 21 اثر درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی بر ثابت C_{33} کامپوزیت هیبریدی

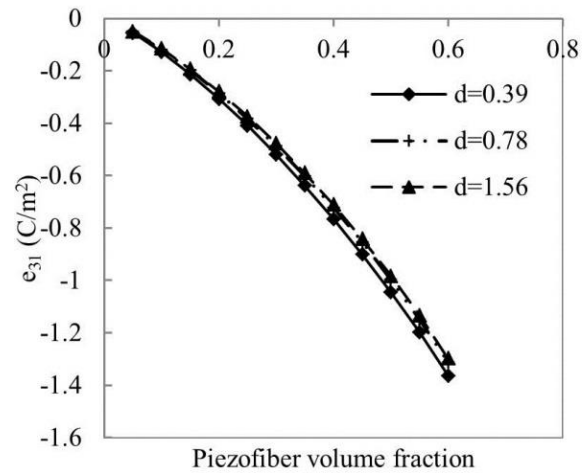


Fig. 17 Effect of carbon nanotube diameter on e_{31} of PFFRC

شکل 17 اثر قطر نانولوله‌ی کربنی بر ضریب e_{31} کامپوزیت هیبریدی

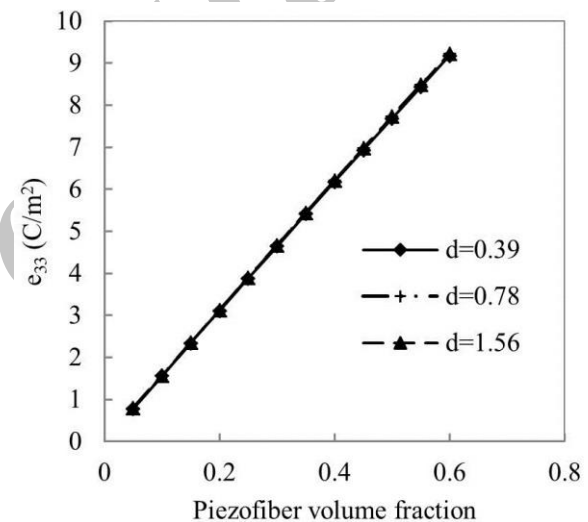


Fig. 18 Effect of carbon nanotube diameter on e_{33} of PFFRC

شکل 18 اثر قطر نانولوله‌ی کربنی بر ضریب e_{33} کامپوزیت هیبریدی

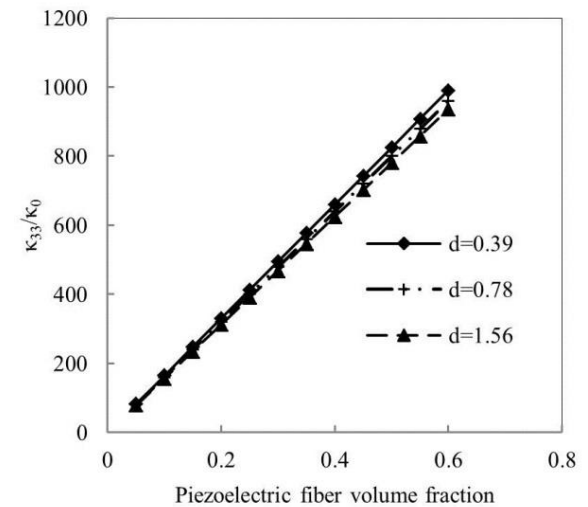


Fig. 19 Effect of carbon nanotube diameter on κ_{33}/κ_0 of PFFRC

شکل 19 اثر قطر نانولوله‌ی کربنی بر κ_{33}/κ_0 کامپوزیت هیبریدی

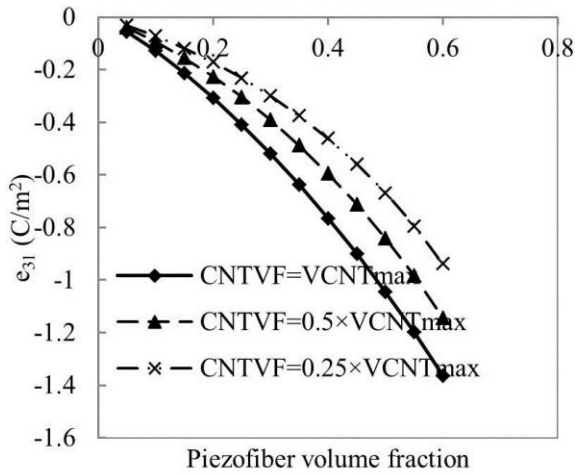


Fig. 25 Effect of CNT volume fraction on e_{31} of PFFRC

شکل 25 اثر درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی بر ضریب e_{31} کامپوزیت هیبریدی

فیبر پیزوالکتریک PZT-7A یکی از کاربردی‌ترین فیبرهای پیزوالکتریک استفاده شده در مقالات است. بررسی تاثیرات این فیبر روی کامپوزیت و مقایسه این تاثیرات با حالتی که از PZT-5A استفاده می‌شود هدف این بخش از بحث است. فیبر PZT-7A دارای خواص مکانیکی قوی‌تری نسبت به PZT-5A است، در حالی که خواص الکتریکی PZT-5A بیشتر از PZT-7A است. همانطور که از شکل 28 مشخص است با بکار بردن فیبر PZT-7A ضریب سفتی عرضی کامپوزیت C_{11} افزایش می‌یابد. شکل 29 مربوط به تغییرات ضریب سفتی طولی C_{33} نسبت به درصد حجمی فیبر پیزوالکتریک است. تاثیرات قراردادن PZT-7A به جای PZT-5A مشابه ضریب C_{11} است. تاثیر به کار بردن فیبرهای پیزوالکتریک مختلف برای ضرایب C_{12} و C_{23} قابل توجه نیست، این موضوع از شکل‌های 30 و 31 قابل مشاهده است. شکل 32 که مربوط به ضریب C_{44} است نشان می‌دهد که به کار بردن فیبری با خواص الاستیک قوی‌تر می‌تواند به تقویت کامپوزیت کمک کند. خواص الکتریکی PZT-7A نسبت به PZT-5A ضعیف‌تر است و همانطور که تصور می‌شد ضریب e_{31} در کامپوزیت تقویت شده با PZT-5A بیشتر است (شکل‌های 33 تا 35 مشاهده شود).

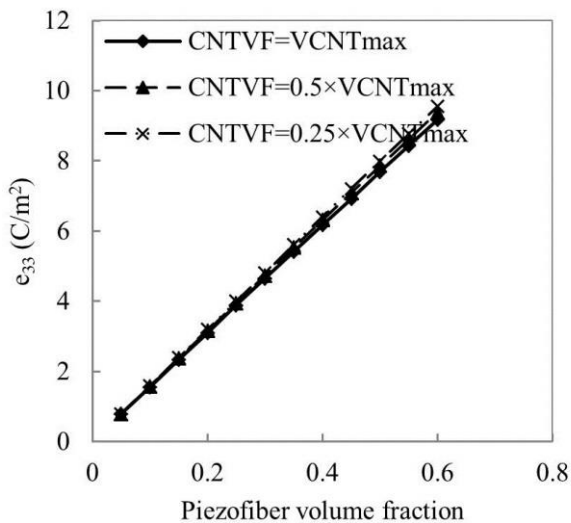


Fig. 26 Effect of CNT volume fraction on e_{33} of PFFRC

شکل 26 اثر درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی بر ضریب e_{33} کامپوزیت هیبریدی

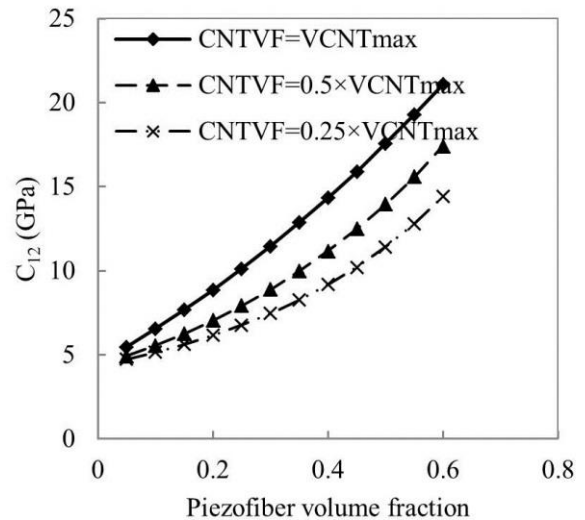


Fig. 22 Effect of CNT volume fraction on C_{12} of PFFRC

شکل 22 اثر درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی بر ثابت C_{12} کامپوزیت هیبریدی

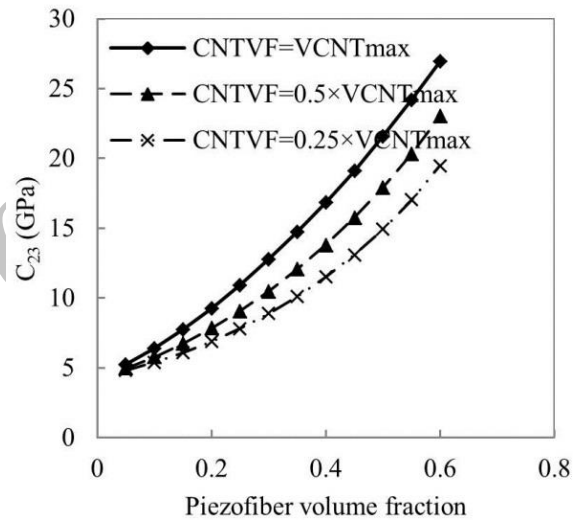


Fig. 23 Effect of CNT volume fraction on C_{23} of PFFRC

شکل 23 اثر درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی بر ثابت C_{23} کامپوزیت هیبریدی

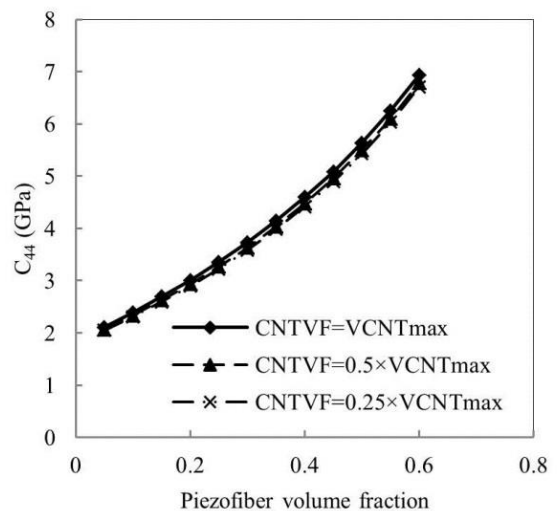


Fig. 24 Effect of CNT volume fraction on C_{44} of PFFRC

شکل 24 اثر درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی بر ثابت C_{44} کامپوزیت هیبریدی

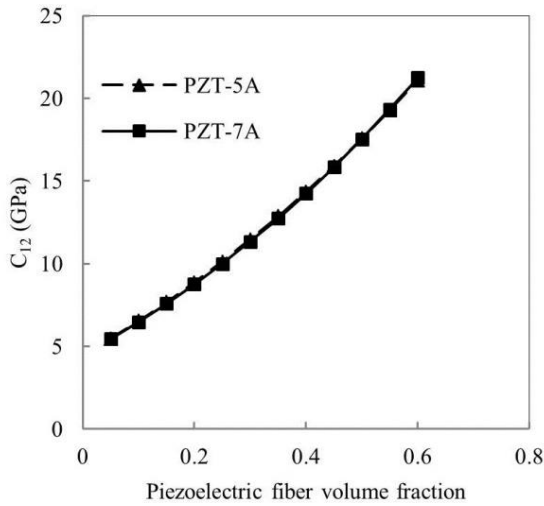


Fig. 30 Variation of C_{12} for different piezoelectric fiber
 شکل 30 تغییرات C_{12} به ازای فیبرهای پیزوالکتریک مختلف

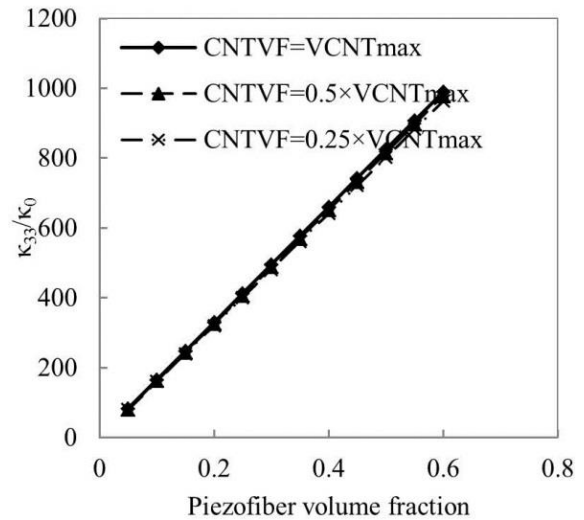


Fig. 27 Effect of CNT volume fraction on κ_{33}/κ_0 of PFFRC
 شکل 27 اثر درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی بر κ_{33}/κ_0 کامپوزیت هیبریدی

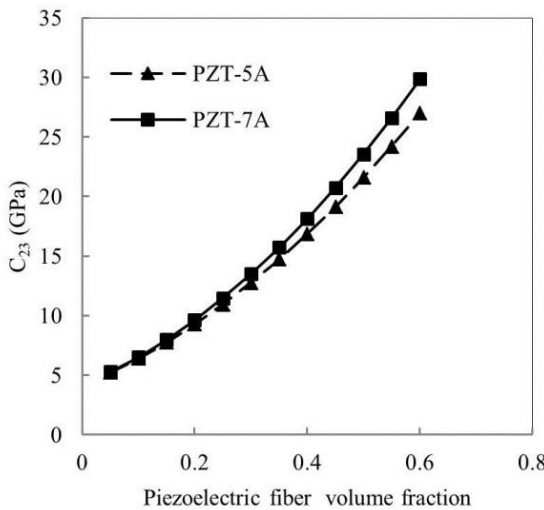


Fig. 31 Variation of C_{23} for different piezoelectric fiber
 شکل 31 تغییرات C_{23} به ازای فیبرهای پیزوالکتریک مختلف

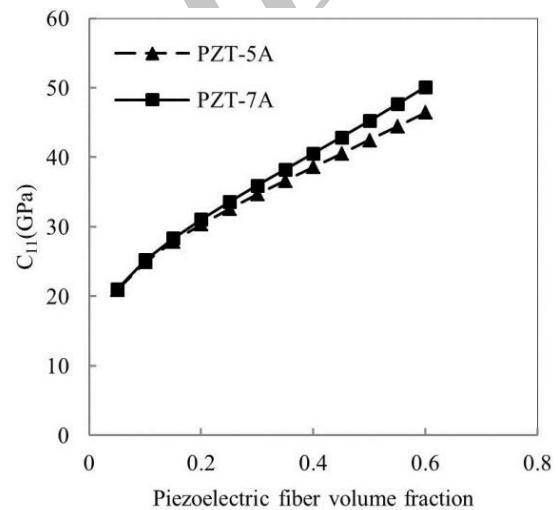


Fig. 28 Variation of C_{11} for different piezoelectric fiber
 شکل 28 تغییرات C_{11} به ازای فیبرهای پیزوالکتریک مختلف

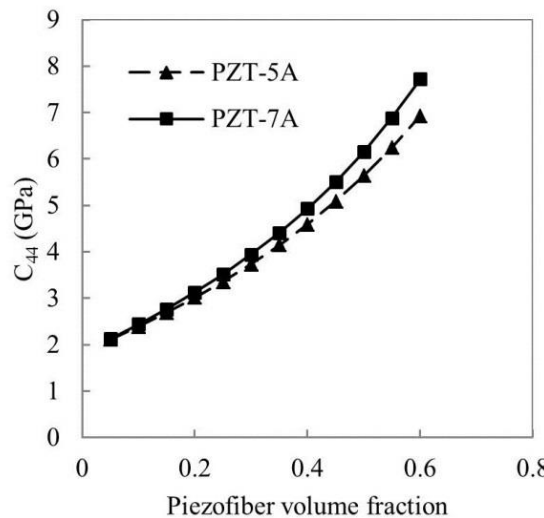


Fig. 32 Variation of C_{44} for different piezoelectric fiber
 شکل 32 تغییرات C_{44} به ازای فیبرهای پیزوالکتریک مختلف

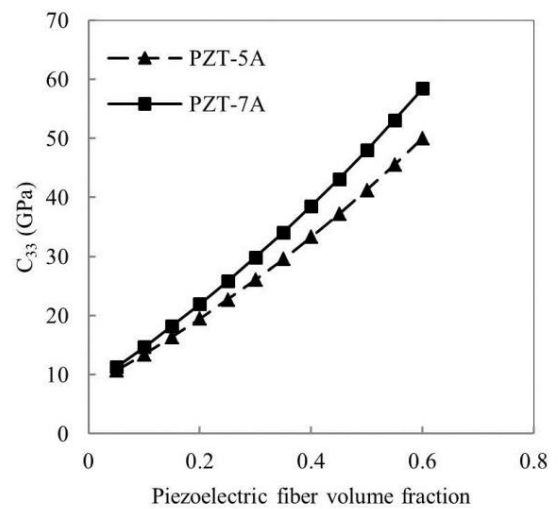


Fig. 29 Variation of C_{33} for different piezoelectric fiber
 شکل 29 تغییرات C_{33} به ازای فیبرهای پیزوالکتریک مختلف

این موضوع در شکل 33 مشخص است. شکل 34 و 35 به ترتیب مربوط به ضریب پیزوالکتریک طولی کامپوزیت و ضریب دی‌الکتریک کامپوزیت است. تأثیرات استفاده از فیبرهای پیزوالکتریک مختلف بر نمودارها قابل مشاهده است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثرات اندازه نانولوله کربنی بر خواص موثر الاستیک و الکتریکی نانوکامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی بررسی شد. رشد شعاعی نانولوله‌های کربنی هم‌راستا بر سطح خارجی فیبر کربن، به کامپوزیت خواص منحصر به فردی در جهت عمود بر فیبر کربن می‌دهد. این خواص منحصر به فرد با تغییرات اندازه و درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی و تأثیر آن بر ضرایب الاستیک و الکتریکی نهایی کامپوزیت قابل مشاهده است. مدل میکرومکانیکی تحلیلی بر اساس سلول واحد جهت استخراج خواص موثر الاستیک کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی به کار گرفته شد. فاز میانی ناشی از فعل و انفعالات بین اتم‌های نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری به عنوان یک فاز سوم در بررسی خواص موثر نانوکامپوزیت زمینه پلیمری استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد استفاده کردن از نانولوله‌ی کربنی با قطر کوچک‌تر تأثیر زیادی بر بهبود خواص الکترومکانیکی عرضی کامپوزیت دارد، درحالی که این تأثیر در حالت طولی قابل اغماض است. همچنین افزایش درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی موجب بهبود خواص الکترومکانیکی عرضی کامپوزیت شد. پس از مقایسه نتایج به دست آمده از کاربرد فیبرهای PZT-5A و PZT-7A به عنوان تقویت‌کننده‌های پیزوالکتریک مشخص شد که استفاده کردن از PZT-5A در بهبود خواص الکترومکانیکی و استفاده کردن از PZT-7A در بهبود خواص مکانیکی نقش تعیین کننده‌ای دارند.

5- مراجع

- [1] Thostenson, E.T. and Chou, T.W., "On The Elastic Properties Of Carbon Nanotube-Based Composites: Modelling And Characterization" Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 36, No. 5, pp. 573, 2003.
- [2] Han, Y. and Elliott, J., "Molecular Dynamics Simulations Of The Elastic Properties Of Polymer/Carbon Nanotube Composites" Computational Materials Science, Vol. 39, No 2, pp. 315-323, 2007.
- [3] Shokrieh, M.M., and Rafiee, R., "On the tensile behavior of an embedded carbon nanotube in polymer matrix with non-bonded interphase region" Composite Structures, Vol. 92, No. 3, pp. 647-652, 2010.
- [4] Griebel, M. and Hamaekers, J., "Molecular dynamics simulations of the elastic moduli of polymer-carbon nanotube composites" Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 193, No. 17, pp. 1773-1788, 2004.
- [5] Gou, J. Minaie, B. Wang, B. Liang, Z. and Zhang, C., "Computational and experimental study of interfacial bonding of single-walled nanotube reinforced composites" Computational Materials Science, Vol. 31, No. 3, pp. 225-236, 2004.
- [6] Zakeri, M., "Interface Modeling of Nanotube Reinforced Nanocomposites by Using Multi-Scale Modeling Method" Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 1-11, 2012. (فارسی)
- [7] Spanos, P. and Esteva, M., "Effect of stochastic nanotube waviness on the elastic and thermal properties of nanocomposites by fiber embedment in finite elements" Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Vol. 6, No. 10, pp. 2317-2333, 2009.
- [8] Hammerand, D. C. Seidel, G. D. and Lagoudas, D. C., "Computational micromechanics of clustering and interphase effects in carbon nanotube composites" Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 14, No. 4, pp. 277-294, 2007.

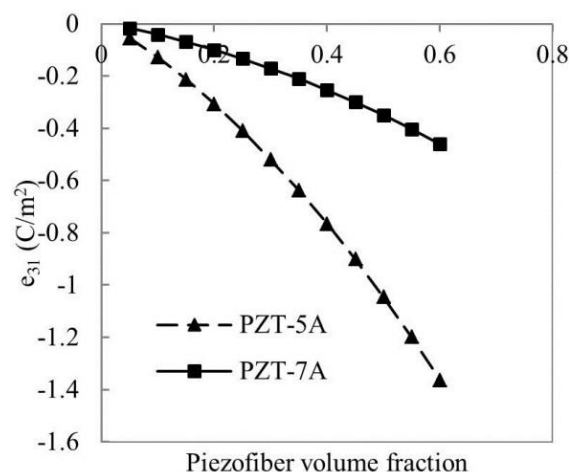


Fig. 33 Variation of e_{31} for different piezoelectric fiber

شکل 33 تغییرات e_{31} کامپوزیت هیبریدی تقویت‌شده با فیبر فازی نسبت به درصد حجمی فیبر پیزوالکتریک

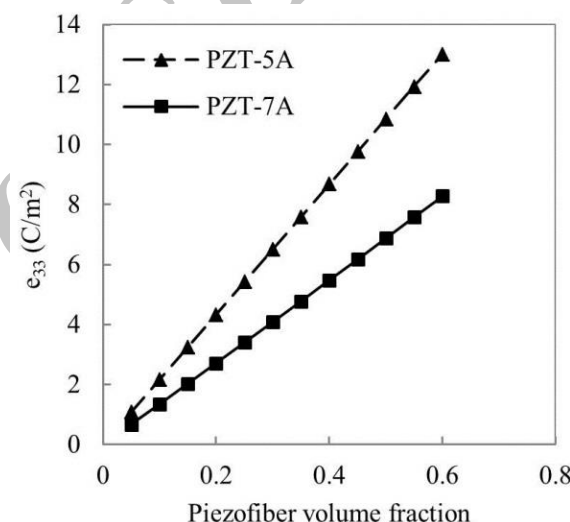


Fig. 34 Variation of e_{33} for different piezoelectric fiber

شکل 34 تغییرات e_{33} به ازای فیبرهای پیزوالکتریک مختلف

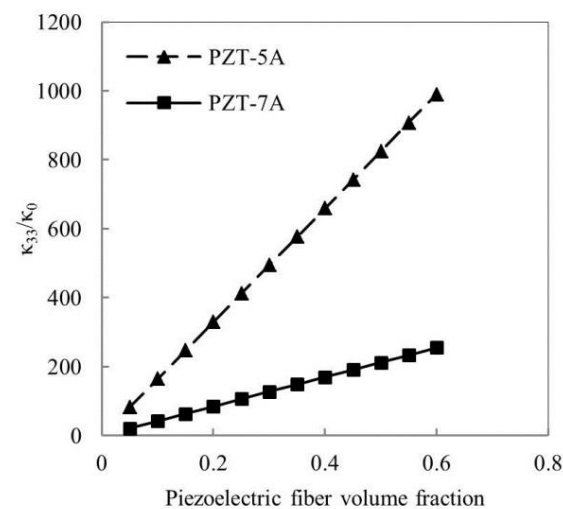


Fig. 35 Variation of κ_{33}/κ_0 fraction for different piezoelectric fiber

شکل 35 تغییرات κ_{33}/κ_0 به ازای فیبرهای پیزوالکتریک مختلف

- materials" *Composite Structures*, Vol. 92, No. 4, pp. 964-972, 2010.
- [28] Dhala, S. and Ray, M., "Micromechanics of piezoelectric fuzzy fiber-reinforced composite" *Mechanics of Materials*, Vol. 81, pp.1-17, 2015.
- [29] Aghdam, M. and Dezhsetan, A., "Micromechanics based analysis of randomly distributed fiber reinforced composites using simplified unit cell model" *Composite structures*, Vol. 71, No. 3, pp. 327-332, 2005.
- [30] Kundalwal, S. and Ray, M., "Effect of carbon nanotube waviness on the effective thermoelastic properties of a novel continuous fuzzy fiber reinforced composite" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 57, pp. 199-209, 2014.
- [31] Mahmoodi, M. and Vakili-fard, M., "Electro-thermo-mechanical behavior modeling of short CNT reinforced piezo-polymeric composite" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 67-76, 2016. (in persian فارسی)
- [32] Hassanzadeh-Aghdam, M.K. Mahmoodi, M.J. and Ansari, R., "Interphase effects on the thermo-mechanical properties of three-phase composites" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 230, No. 19, pp. 3361-3371, 2016.
- [33] Ansari Khalkhali, R. Hassanzadeh Aghdam, M. K. and Mashkor, A., "Study on the percolation behavior of the mechanical properties of nanoparticle reinforced polymer nanocomposites using three-dimensional micromechanical modeling" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 376-382, 2015. (in persian فارسی)
- [34] Hassanzadeh-Aghdam, M.K. Mahmoodi, M. and Barkhordari, H., "Micromechanical modeling of effective elastic properties of hybrid nanocomposites reinforced by fuzzy fiber containing carbon nanotubes" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 261-272, 2017. (in persian فارسی)
- [35] Shen, L. and Li, J., "Transversely isotropic elastic properties of single-walled carbon nanotubes" *Physical Review B*, Vol. 69, No. 4, pp. 045414, 2004.
- [36] Malakooti, M. H. and Sodano, H. A., "Multi-inclusion modeling of multiphase piezoelectric composites" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 47, No.1, pp. 181-189, 2013.
- [37] Kulkarni, M. Carnahan, D. Kulkarni, K. Qian, D. and Abot, J., "Elastic response of a carbon nanotube fiber reinforced polymeric composite: a numerical and experimental study" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, No. 5, pp. 414-421, 2010.
- [38] Tsai, J.-L. Tzeng, S.-H. and Chiu, Y.-T., "Characterizing elastic properties of carbon nanotubes/polyimide nanocomposites using multi-scale simulation" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 106-115, 2010.
- [9] Ayatollahi, M. Shadlou, S. and Shokrieh, M., "Multiscale modeling for mechanical properties of carbon nanotube reinforced nanocomposites subjected to different types of loading" *Composite Structures*, Vol. 93, No. 9, pp. 2250-2259, 2011.
- [10] Frankland, S. J. V. Harik, V. M. Odegard, G. M. Brenner, D. W. and Gates, T. S., "The stress-strain behavior of polymer-nanotube composites from molecular dynamics simulation. Composites" *Science and Technology*, Vol. 63, No. 11, pp. 1655-1661, 2003.
- [11] Bower, C. Zhu, W. Jin, S. and Zhou, O., "Plasma-induced alignment of carbon nanotubes" *Applied Physics Letters*, Vol. 77, No. 6, pp. 830-832, 2000.
- [12] Garcia, E. J. Wardle, B. L. Hart, A. J. and Yamamoto, N., "Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ" *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2034-2041, 2008.
- [13] Ray, M. and Pradhan, A., "The performance of vertically reinforced 1-3 piezoelectric composites in active damping of smart structures" *Smart materials and structures*, Vol. 15, No. 2, pp. 631, 2006.
- [14] Kundalwal, S. and Ray, M., "Effective properties of a novel continuous fuzzy-fiber reinforced composite using the method of cells and the finite element method" *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 36, pp. 191-20, 2012.
- [15] Kundalwal, S. and Ray, M., "Micromechanical analysis of fuzzy fiber reinforced composite" *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, Vol. 7, No. 2, pp. 149-166, 2011.
- [16] Kundalwal, S. and Ray, M., "Effect of carbon nanotube waviness on the elastic properties of the fuzzy fiber reinforced composites" *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 80, No. 2, pp. 021010, 2013.
- [17] Chatzigeorgiou, G. Seidel, G. D. and Lagoudas, D. C., "Effective mechanical properties of "fuzzy fiber" composites" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 6, pp. 2577-2593, 2012.
- [18] Lin, Y. and Sodano, H.A., "Electromechanical characterization of a active structural fiber lamina for multifunctional composites" *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11, pp. 1825-1830, 2009.
- [19] Odegard, G.M., "Constitutive modeling of piezoelectric polymer composites" *Acta Materialia*, Vol. 52, No.18, pp. 5315-5330, 2004.
- [20] Dai, Q. and Ng, K., "Investigation of electromechanical properties of piezoelectric structural fiber composites with micromechanics analysis and finite element modeling" *Mechanics of Materials*, Vol. 53, pp. 29-4, 2012.
- [21] Jiang, C. and Cheung, Y., "An exact solution for the three-phase piezoelectric cylinder model under antiplane shear and its applications to piezoelectric composites" *International journal of solids and structures*, Vol. 38, No. 28, pp. 4777-4796, 2001.
- [22] Berger, H. Kari, S. Gabbert, U. Rodriguez-Ramos, R. Guinovart, R. Otero, J. A. and Bravo-Castillero, J., "An analytical and numerical approach for calculating effective material coefficients of piezoelectric fiber composites" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 21, pp. 5692-5714, 2005.
- [23] Li, J.Y. and Dunn, M.L., "Micromechanics of magnetoelastoelectric composite materials: average fields and effective behavior" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 9, No. 6, pp. 404-416, 1998.
- [24] Kar-Gupta, R. and Venkatesh, T. A., "Electromechanical response of 1-3 piezoelectric composites: An analytical model. *Acta Materialia*, Vol. 55, No.3, pp. 1093-1108, 2007.
- [25] Fakri, N. Azrar, L. and El Bakkali, L., "Electroelastic behavior modeling of piezoelectric composite materials containing spatially oriented reinforcements" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 2, pp. 361-384, 2003.
- [26] Hashemi, R. Weng, G. J. Kargamovin, M. H. and Shodja, H. M., "Piezoelectric composites with periodic multi-coated inhomogeneities. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, No. 21, pp. 2893-2904, 2010.
- [27] Koutsawa, Y. Biscani, F. Belouettar, S. Nasser, H. and Carrera, E., "Multi-coating inhomogeneities approach for the effective thermo-electro-elastic properties of piezoelectric composite

Archive of SID