

پیش بینی میکرومکانیکی مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوذرات گرافن

چکیده: در این مقاله با ارائه یک رویکرد میکرومکانیکی سلسه مراتبی جدید بر اساس روش موری-تاناکا، مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن پیش بینی می شود. اثرات کلوخه ای شدن نانوذرات گرافن در زمینه سیمانی به عنوان یکی از پارامترهای مهم ریزساختاری در فرآیند مدل سازی میکرومکانیکی لحاظ می شود. همچنین اثرات مقدار نانوذرات گرافن، نسبت منظر، مقدار و همراستایی الیاف فولادی در زمینه سیمانی بر مدول الاستیک کامپوزیت مورد مطالعه قرار می گیرد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج پیش بینی شده در این مطالعه با داده های تجربی مقایسه می شوند. نتایج نشان می دهد که افزودن نانوذرات گرافن با توزیع یکنواخت به کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف فولادی موجب بهبود خواص الاستیک می شود. تشکیل حالت کلوخه ای نانوذرات، سبب کاهش اثرات تقویت کنندگی گرافن می شود. بر اساس نتایج میکرومکانیکی، افزایش مقدار و نسبت منظر میکروالیاف فولادی مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی را افزایش می دهد. همچنین همراستایی الیاف موجب حصول حداکثری مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافن خواهد شد.

واژه های راهنما: کامپوزیت پایه سیمانی، میکروالیاف فولادی، نانوغرافن، مدول الاستیک، مدلسازی میکرومکانیکی

میثم
سلیم زاده شوئیلی*
استادیار،
دانشکده فنی،
دانشگاه گیلان- رشت

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

Maysam
Salimzadehshooiili*
Assistant Professor,
Faculty of Engineering,
University of Guilan-
Rasht

Micromechanical prediction of elastic modulus of cement-based composites reinforced with steel microfibers and graphene nanoparticles

Abstract: A new hierarchical micromechanical approach based on the Mori-Tanaka method is introduced to predict the elastic modulus of cement composites reinforced with steel microfibers and graphene nanosheets. Effects of graphene agglomeration in cement matrix, as one of the key microstructures in the micromechanical modeling are considered. Influences of graphene content, fiber aspect ratio, content, and alignment on the composite elastic modulus are investigated. For validation, predicted results of this study are compared with experimental data. Findings show that uniform distribution of graphene nanoparticles in cement composites containing steel fibers improves elastic properties. Formation of agglomerated nanoparticles reduces reinforcing effects of graphene. Based on the micromechanical results, increasing content and aspect ratio of steel microfibers enhances elastic moduli of the cement composite. Fiber alignment leads to the maximum achievable elastic modulus of steel fibers/graphene nanosheets-reinforced cement composites. Modulus of steel fibers/graphene nanosheets-reinforced cement composites.

Keywords: Cement-based composite; Steel microfiber; Nano-graphene; Elastic modulus; Micromechanics

۱- مقدمه

مواد پایه سیمانی به دلیل فراوانی منابع، صرفه اقتصادی، شکل-پذیری آسان و استحکام فشاری عالی‌شان، یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی مورد استفاده در زیرساخت‌های عمرانی در سراسر جهان هستند [۱]، [۲]، [۳]. با این حال، معایب چنین موادی از جمله شکنندگی ذاتی، استحکام کششی پایین و حساسیت در محیط‌های مهاجم، همیشه از نگرانی‌های عمده بوده‌اند که ممکن است منجر به دوام ضعیف و هزینه بالای نگهداری شوند [۴]، [۵]، [۶]. تلاش‌های بسیاری برای افزودن میکروالیاف مختلف به کامپوزیت‌های پایه سیمانی، مانند الیاف کربن، شیشه، پلی پروپیلن و ... انجام شده است تا خواص مکانیکی تحت بارهای کششی، دوام و چندعملکردی بودن این مواد بهبود یابد [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]. مزیت اصلی گنجاندن میکروالیاف در کامپوزیت‌های پایه سیمانی، مقاومت در برابر انتشار ترک و تأخیر در گسترش آن است. به طور کلی، اعتقاد بر این است که افزودن میکروالیاف موجب بهبود مقاومت این مواد کامپوزیتی در برابر ترک خوردگی می‌شود [۴]، [۱۱]، [۱۲]. در این زمینه، استفاده از الیاف فولادی در کامپوزیت‌های پایه سیمانی می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها برای بهبود خواص کلی مکانیکی به‌ویژه مدول و استحکام کششی در نظر گرفته شود [۴]، [۱۱]. الیاف فولادی به دلیل مدول الاستیسیته عالی، استحکام بالا، رسانایی حرارتی خوب و مقرون به صرفه بودن برای مهندسان مواد بسیار جذاب هستند.

با پیشرفت فناوری نانو در حوزه مواد مهندسی ساختمانی، استفاده از نانومواد مانند نانوسیلیکا، اکسید تیتانیوم، نانوکلی، نانوالومینا، نانوالیاف کربن، نانولوله کربن، گرافن و ... در کامپوزیت‌های پایه سیمانی به منظور افزایش عملکرد مکانیکی و فیزیکی‌شان مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و مهندسان قرار گرفته است [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]. نانومواد دوبعدی مانند گرافن یا اکسید گرافن نه تنها از نظر نیروهای جاذبه مشابه نانومواد یک‌بعدی نظیر نانولوله‌های کربنی هستند، بلکه از اتم‌های کربن با پیوند sp^2 تشکیل شده‌اند که به گرافن خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای می‌بخشند. گرافن دارای مدول الاستیک بالا (۱/۱ تراپاسکال) و استحکام کششی عالی (۱۳۰ گیگاپاسکال)، رسانایی الکتریکی بالا، رسانایی حرارتی زیاد (۵۰۰۰ وات بر متر کلین) و سطح ویژه فوق‌العاده بالا است [۱۳]، [۱۴]. گزارش شده است که اکسید گرافن می‌تواند به‌خوبی در محلول پخش شود و گروه‌های اکسیژن‌دار روی سطح آن می‌توانند به واکنش با سیمان کمک کنند [۱۷]، [۱۸].

تجربی متعددی در حوزه استخراج خواص مکانیکی کامپوزیت-های پایه سیمانی حاوی نانوذرات گرافن انجام شده است. لو و اوینگ [۱۹] تأثیر افزودن نانوصفحات اکسید گرافن بر ویژگی‌های کامپوزیت سیمانی و بتن فوق‌العاده مقاوم را گزارش کردند. طبق نتایج آزمایشگاهی، افزودن نانوصفحات گرافن موجب بهبود استحکام‌های خمشی و فشاری کامپوزیت‌های پایه سیمانی شده، به‌طوری‌که افزایش استحکام خمشی بیش از افزایش استحکام فشاری می‌باشد. غلامپور و همکاران [۲۰] تأثیر گروه‌های عاملی اکسیژن در گرافن و نقص‌های ساختاری گرافن را بر خواص کششی محوری و فشاری کامپوزیت‌های پایه سیمانی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزودن اکسید گرافن کاهش-یافته با مقدار ۰/۱ درصد تحت شرایط کاهش بهینه منجر به افزایش ۴۵ و ۸۳/۷ درصد مقاومت کششی و فشاری ۲۸ روزه کامپوزیت‌های پایه سیمانی درصدی در مقایسه با نمونه ساده شده است. هویو و همکارانش [۲۱] گزارش کردند که افزودن ۰/۱۶ درصد وزنی اکسید گرافن در ماتریس سیمانی می‌تواند استحکام خمشی کامپوزیت پایه سیمانی حاصل را تا ۱۱/۶۲ درصد افزایش دهد. پان و همکارانش [۲۲] دریافتند که افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی اکسید گرافن می‌تواند مقاومت فشاری کامپوزیت پایه سیمانی را ۱۵ تا ۳۳ درصد و مقاومت خمشی آن را ۴۱ تا ۵۹ درصد افزایش دهد. در یک مطالعه تجربی دیگر [۲۳]، عملکرد دو شکل خاص از نانومواد گرافنی شامل اکسید گرافن و اکسید گرافن کاهش‌یافته در کامپوزیت‌های پایه سیمانی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. استحکام فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه کامپوزیت سیمانی حاوی ۰/۰۶ درصد وزنی اکسید گرافن و اکسید گرافن کاهش‌یافته به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد افزایش یافتند. به علاوه افزایش استحکام خمشی برای کامپوزیت پایه سیمانی حاوی ۰/۰۴ درصد وزنی اکسید گرافن و ۰/۰۶ درصد وزنی اکسید گرافن کاهش‌یافته به ترتیب ۷۵/۷ و ۳۳/۷ درصد گزارش شد.

تقاضا برای مواد کامپوزیتی پایه سیمانی در طیف گسترده‌ای از کاربردها که به خواص مکانیکی و چندمنظوره بهتر تحت بارگذاری‌ها و شرایط محیطی سخت‌تر نیاز دارند، در حال افزایش است. اخیراً، ترکیب میکروالیاف با پرکننده‌های نانومقیاس به‌عنوان روشی نوین برای تولید کامپوزیت‌های پایه سیمانی مطرح شده است [۲۴]، [۲۵]، [۲۶]. به‌عنوان مثال، چویی و همکارانش [۲۷] تأثیرات الیاف کربن پوشش داده‌شده با نانولوله‌های کربنی را بر ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های پایه سیمانی بررسی کردند و آن را با کامپوزیت سیمانی تقویت‌شده با الیاف کربن و ماتریس سیمانی خالص مقایسه نمودند. نتایج

نانوگرافن و میکروالیاف فولادی که پارامترهای ریزساختاری مهم را در نظر بگیرد، تاکنون ارائه نشده است.

در این مقاله یک مدل میکرومکانیکی سلسله‌مراتبی مبتنی بر روش موری-تاناکا به منظور تخمین مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت‌شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفات گرافن توسعه می‌شود. لذا تقسیم‌بندی پژوهش حاضر به صورت زیر است: در بخش دوم، فرآیند مدل‌سازی کامپوزیت پایه سیمانی با تقویت‌کننده‌های هیبریدی توضیح داده می‌شود. سپس روابط میکرومکانیکی مدل موری-تاناکا در چندین حالت با توجه به هندسه تقویت‌کننده ارائه می‌شود. در بخش سوم پس از مشخص کردن اجزای تشکیل‌دهنده، پیش‌بینی‌های میکرومکانیکی برای مدول الاستیک کامپوزیت مورد نظر گزارش می‌شود. همچنین در این به منظور اعتبارسنجی مدل میکرومکانیکی، مقایسه با نتایج موجود در ادبیات پیشین انجام می‌شود. در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری پژوهش حاضر بحث خواهد شد. مدل‌سازی میکرومکانیک توسعه داده شده در این پژوهش ریزساختارهای مواد کامپوزیتی پایه سیمانی را به رفتار کششی آن‌ها مرتبط می‌کند و این ارتباط امکان تنظیم معکوس اجزا برای دستیابی به عملکرد کششی هدفمند با حداقل مقدار ایاف و نانوماده و همچنین پیش‌بینی و مدل‌سازی مستقیم رفتار کششی را فراهم می‌سازد.

۲- مدل‌سازی میکرومکانیکی کامپوزیت پایه سیمانی

ویژگی ساختاری ماده کامپوزیتی پایه سیمانی مورد نظر در این پژوهش به این صورت است که میکروالیاف فولادی در زمینه سیمانی پراکنده با نانوصفات گرافن پخش شده‌اند.

یک نمایش شماتیک از چنین کامپوزیتی در شکل (۱) نشان داده شده است.

در این بخش، یک روش سلسله‌مراتبی برای پیش‌بینی میکرومکانیکی خواص الاستیک کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با ایاف فولادی و نانوصفات گرافن توسعه داده می‌شود. روش تحلیلی برای پیش‌بینی خواص الاستیک چنین کامپوزیت‌هایی با پیش‌بینی خواص الاستیک ماده سیمانی حاوی نانوگرافن آغاز می‌شود.

خواص الاستیک سیمان تقویت‌شده با نانوصفات گرافن با استفاده از روش موری-تاناکا به‌عنوان یک روش میکرومکانیکی تحلیلی کارآمد محاسبه می‌شوند [۴۳، ۴۲]. از دیدگاه یک ماده کامپوزیتی، گرافن‌ها به‌عنوان عامل تقویت‌کننده درون سیمان، که به‌عنوان زمینه (یا ماتریس) عمل می‌کند، پراکنده شده‌اند.

نشان داد که با افزودن این تقویت‌کننده‌های متشکل از ایاف کربن و نانولوله کربن به ماتریس سیمانی، استحکام خمشی کامپوزیت سیمانی در ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۴۸/۵، ۴۲/۲ و ۴۵/۵ درصد بیشتر از ماده سیمانی خالص بود. در حالی که با افزودن ایاف کربن به ماتریس سیمانی، استحکام خمشی کامپوزیت سیمانی در ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۳، ۲۴/۱ و ۱۹/۸ درصد بیشتر از ماده سیمانی خالص شد. چن و همکارانش [۲۸] گزارش کردند که ایاف کربن پوشش داده شده با گرافن در مقایسه با ایاف کربن، در ایجاد حفاظت در برابر تداخل الکترومغناطیسی در کامپوزیت‌های پایه سیمانی مؤثرتر است. در مطالعه‌ای دیگر، نتایج نشان داد که استحکام فشاری کامپوزیت پایه سیمانی حاوی ۰/۰۶ درصد اکسید گرافن و ۱ درصد ایاف کربنی به میزان ۲۳/۸۹ درصد افزایش یافته، در حالی که افزایش استحکام کششی خمشی این کامپوزیت به ۱۳۸/۴۴ درصد رسیده است [۲۹]. در حوزه استخراج خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پایه سیمانی حاوی دو فاز تقویت‌کننده میکرو و نانومقیاس مطالعات تجربی متعددی انجام شده است [۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵]. با این وجود، مرور ادبیات پیشین به وضوح نشان می‌دهد که یک مطالعه جامع بر خواص کششی کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت‌شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفات گرافنی انجام نشده است.

روش‌های میکرومکانیکی تکنیک‌های قدرتمندی هستند که عمدتاً برای پیش‌بینی خواص مؤثر مواد ناهمگن توسعه یافته‌اند. مدل‌های میکرومکانیکی می‌توانند خواص مؤثر کامپوزیت‌های پایه سیمانی را بر اساس ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده، مقدار، هندسه تقویت‌کننده و تعامل بین فازها پیش‌بینی کنند [۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹]. حسن‌زاده اقدم و همکارانش [۴۰] با استفاده از مدل میکرومکانیکی محیط مؤثر هدایت حرارتی کامپوزیت پایه سیمانی حاوی نانولوله‌های کربنی را پیش‌بینی کردند. علاوه بر درصد حجمی نانولوله کربن، اثرات حالت موجی بودن و مقاومت لایه میانی بین نانولوله و زمینه سیمانی در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. صافی و همکارانش [۴۱] به تحلیل جامع خواص الاستیک مؤثر کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت‌شده با ایاف ترکیبی نانو و میکروساختار پرداختند. در پژوهش مذکور یک طرح مدل‌سازی میکرومکانیکی چندمرحله‌ای مبتنی بر مدل سلول واحد برای پیش‌بینی ویژگی‌های الاستیک در جهت‌های محوری و عرضی پیشنهاد شده است. با توجه به افزایش کاربردهای کامپوزیت‌های پایه سیمانی با تقویت‌کننده‌های نانو و میکرو مقیاس، یک مدل پیش‌بینی‌کننده برای مدول الاستیک چنین مواد مهندسی حاوی

$$\mathbf{C}^{NC} = \left(f_m \mathbf{C}_m + \sum_{r=1}^N f_r \langle \mathbf{C}_r : \mathbf{A}_r(\theta, \varphi) \rangle \right) : \left(f_m \mathbf{I} + \sum_{r=1}^N f_r \langle \mathbf{A}_r(\theta, \varphi) \rangle \right)^{-1} \quad (3)$$

در این رابطه $\langle x \rangle$ نشان دهنده میانگین گیری جهتی برای یک تانسور مرتبه چهارم می باشد. پس از انجام عملیات ریاضی، مدول حجمی k^{NC} و مدول برشی μ^{NC} سیمان تقویت شده با نانوگرافن پخش شده به صورت تصادفی برابر خواهد بود با:

$$k^{NC} = k_m + \frac{f_r(\delta_r - 3k_m\alpha_r)}{3(f_m + f_r\alpha_r)} \quad (4)$$

$$\mu^{NC} = \mu_m + \frac{f_r(\eta_r - 2\mu_m\beta_r)}{2(f_m + f_r\beta_r)} \quad (5)$$

که در این رابطه k_m و μ_m به ترتیب مدول حجمی و مدول برشی زمینه سیمانی می باشند و

$$\alpha_r = \frac{3k_m + 2n_r - 2l_r}{3n_r}$$

$$\beta_r = \frac{4\mu_m + 7n_r + 2l_r}{15n_r} + \frac{2\mu_m}{2p_r}$$

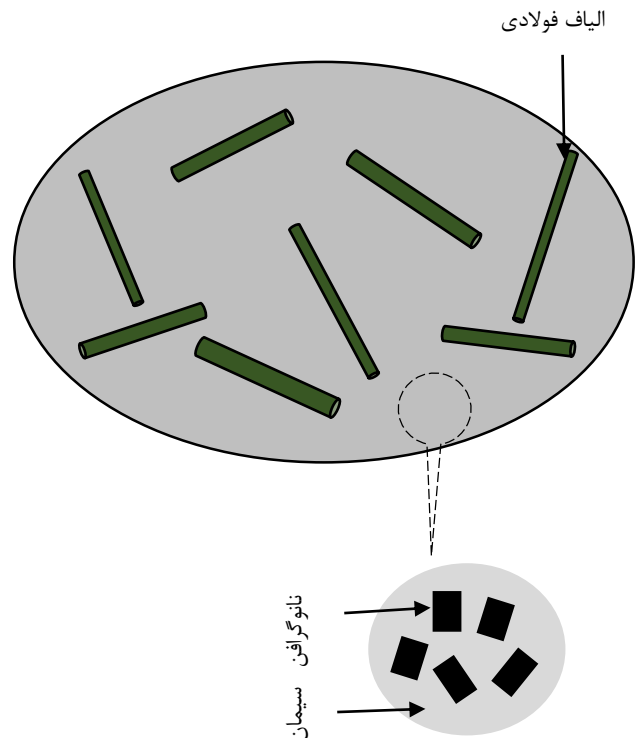
$$\delta_r = \frac{3k_m(n_r + 2l_r) + 4(k_r n_r - l_r^2)}{3n_r} \quad (6)$$

$$n_r = \frac{2}{15} \left(k_r + 6m_r + 8\mu_m - \frac{l_r^2 + 2\mu_m l_r}{n_r} \right)$$

در رابطه فوق k_r, n_r, l_r, p_r و m_r ثوابت الاستیک هیل برای گرافن می باشد. مدول الاستیک E^{NC} و نسبت پواسون ν^{NC} زمینه سیمانی حاوی گرافن را می توان مطابق روابط الاستیسیته به صورت زیر محاسبه نمود.

$$E^{NC} = \frac{9k^{NC}\mu^{NC}}{3k^{NC} + \mu^{NC}} \quad (7)$$

$$\nu^{NC} = \frac{3k^{NC} - 2\mu^{NC}}{6k^{NC} + 2\mu^{NC}} \quad (8)$$



شکل ۱ شماتیکی از یک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن

سه نوع پخش گرافن در زمینه سیمانی شامل: (۱) همراستا، (۲) با پراکندگی یکنواخت و (۳) کلوخه ای شده در نظر گرفته می شود. بر اساس مدل موری-تاناکا، تانسور سفتی الاستیک زمینه سیمانی تقویت شده با نانوصفحات همراستا \mathbf{C}^{NC} به صورت زیر ارائه می شود [۴۴].

$$\mathbf{C}^{NC} = \left(f_m \mathbf{C}_m + \sum_{r=1}^N f_r \mathbf{C}_r : \mathbf{A}_r \right) : \left(f_m \mathbf{I} + \sum_{r=1}^N f_r \mathbf{A}_r \right)^{-1} \quad (1)$$

در این رابطه f_r و f_m به ترتیب کسر حجمی گرافن و زمینه، N تعداد تقویت کننده و \mathbf{I} تانسور واحد مرتبه چهارم می باشد. همچنین \mathbf{C}_m و \mathbf{C}_r به ترتیب تانسور سفتی الاستیک مرتبه چهارم برای گرافن و زمینه سیمانی بوده و \mathbf{A}_r به صورت زیر تعریف می شود

$$\mathbf{A}_r = [\mathbf{I} + (\mathbf{S} : \mathbf{C}_m^{-1}) : (\mathbf{C}_r - \mathbf{C}_m)]^{-1} \quad (2)$$

پخش تصادفی گرافن در زمینه سیمانی منجر به ایجاد یک کامپوزیت با خواص ایزوتروپیک می شود. برای شبیه سازی چنین کامپوزیت هایی، ماتریس سفتی آن به صورت زیر اصلاح می شود

$$\mu_{agglomer} = \mu_m + \frac{f_r \zeta (\eta_r - 2\mu_m \beta_r)}{2(\xi - f_r \zeta + f_r \zeta \beta_r)} \quad (12)$$

فرآیند مشابهی برای تعیین مدول حجمی k_{emp} و مدول برشی μ_{emp} فاز زمینه مؤثر به صورت زیر انجام می‌شود.

$$k_{emp} = k_m + \frac{f_r (\delta_r - 3k_m \alpha_r) (1 - \zeta)}{3(1 - \xi - f_r (1 - \zeta) + f_r (1 - \zeta) \alpha_r)} \quad (13)$$

$$\mu_{emp} = \mu_m + \frac{f_r (1 - \zeta) (\eta_r - 2\mu_m \beta_r)}{2(1 - \xi - f_r (1 - \zeta) + f_r (1 - \zeta) \beta_r)} \quad (14)$$

سپس، با به‌کارگیری مدل موری-تاناکا و در نظر گرفتن فاز کلوخه‌ای شده به‌عنوان تقویت‌کننده و فاز زمینه مؤثر به‌عنوان زمینه جدید، مدول حجمی k^{FGC} و مدول برشی μ^{FGC} سیمان حاوی نانوصفحات گرافن کلوخه‌ای شده به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$k^{FGC} = k_{emp} + \frac{\xi \left(\frac{k_{agglomer}}{k_{emp}} - 1 \right)}{1 + \hat{\alpha} (1 - \xi) \left(\frac{k_{agglomer}}{k_{emp}} - 1 \right)} k_{emp} \quad (15)$$

$$\mu^{FGC} = \mu_{emp} + \frac{\xi \left(\frac{\mu_{agglomer}}{\mu_{emp}} - 1 \right)}{1 + \hat{\beta} (1 - \xi) \left(\frac{\mu_{agglomer}}{\mu_{emp}} - 1 \right)} \mu_{emp} \quad (16)$$

که در این رابطه $\hat{\alpha}$ و $\hat{\beta}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\hat{\alpha} = \frac{3k_{emp}}{3k_{emp} + 4\mu_{emp}}, \quad \hat{\beta} = \frac{6(k_{emp} + 2\mu_{emp})}{5(3k_{emp} + 4\mu_{emp})} \quad (17)$$

پس از استخراج خواص مؤثر سیمان حاوی نانوصفحات گرافن می‌توان خواص الاستیک ماده کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوذرات گرافن با استفاده از میکرومکانیکی موری-تاناکا پیش‌بینی نمود. در این مرحله سیمان حاوی نانوصفحات گرافن به‌عنوان زمینه و الیاف فولادی

پراکندگی یکنواخت نانوذرات گرافن در زمینه سیمانی به بهبود خواص این مواد ترکیبی پیشرفته کمک می‌کند. بررسی‌های انجام‌شده در مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در طی فرآیند ساخت چنین مواد کامپوزیتی، ذرات گرافن به دلیل سطح ویژه بالا و برهمکنش‌های قوی، تمایل به حالت کلوخه‌ای شدن دارند که ممکن است نقاط تمرکز تنش ایجاد کنند و باعث کاهش خواص مکانیکی شود [۱۴]، [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۴۵]، [۴۶]، [۴۷]. لذا مدل‌سازی مطالعه این پدیده ریزساختاری کامپوزیت‌های پایه سیمانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یک تکنیک دو مرحله‌ای مبتنی بر مدل میکرومکانیکی موری-تاناکا برای بررسی تأثیر کلوخه‌ای شدن نانوصفحات گرافن بر خواص الاستیک مؤثر کامپوزیت‌های پایه سیمانی ارائه می‌شود. فرض می‌شود که برخی از ذرات گرافن در نواحی کروی در زمینه سیمانی متمرکز شده و مابقی ذرات گرافن دارای پراکندگی یکنواخت باشند. بنابراین، کل سیستم کامپوزیتی را می‌توان به دو ناحیه تقسیم کرد: ناحیه داخل کره‌ها که به‌عنوان فاز کلوخه‌ای شناخته می‌شود و ناحیه خارج از کره‌ها که به‌عنوان فاز زمینه مؤثر در نظر گرفته می‌شود [۴۸]. دو پارامتر ξ و ζ به منظور توصیف حالت کلوخه‌ای شدن نانوذرات گرافن به کار می‌رود چنانکه

$$\xi = \frac{V_{agglomer}}{V}, \quad \zeta = \frac{V_r^{agglomer}}{V_r} \quad (9)$$

در این رابطه V حجم کل ماده کامپوزیتی، $V_{agglomer}$ حجم قسمت کلوخه‌ای شده، V_r و $V_r^{agglomer}$ به ترتیب حجم کل گرافن در زمینه سیمانی و بخشی از آن که کلوخه‌ای شده است را بیان می‌کند. با توجه به معادله (۹) و کسر حجمی نانوغرافن، می‌توان کسر حجمی آن را در قسمت کلوخه‌ای شده $f_r^{agglomer}$ و در قسمت زمینه مؤثر f_r^{emp} به صورت زیر محاسبه نمود.

$$f_r^{agglomer} = \frac{V_r^{agglomer}}{V_{agglomer}} = \frac{\zeta}{\xi} f_r \quad (10)$$

$$f_r^{emp} = \frac{V_r - V_r^{agglomer}}{V - V_{agglomer}} = \frac{(1 - \zeta) f_r}{(1 - \xi)}$$

ابتدا، خواص الاستیک مؤثر فاز کلوخه‌ای شده و فاز زمینه مؤثر با استفاده از معادلات (۴-۶) و (۱۰) تعیین می‌شوند چنانکه

$$k_{agglomer} = k_m + \frac{(\delta_r - 3k_m \alpha_r) f_r \zeta}{3(\xi - f_r \zeta + f_r \zeta \alpha_r)} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_{1122} = \hat{S}_{1133} &= -\frac{1}{2(1-v^{NC})} \left[1 - 2v^{NC} + \frac{1}{a^2 - 1} \right] \\ &+ \frac{1}{2(1-v^{NC})} \left[1 - 2v^{NC} + \frac{3}{2(a^2 - 1)} \right] g, \\ \hat{S}_{2323} &= \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left\{ \frac{a^2}{2(a^2 - 1)} + \left[1 - 2v^{NC} - \frac{3}{4(a^2 - 1)} \right] g \right\}, \\ \hat{S}_{1212} = \hat{S}_{1313} &= \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left\{ 1 - 2v^{NC} - \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} - \frac{1}{2} \left[1 - 2v^{NC} - \frac{3(a^2 + 1)}{a^2 - 1} \right] g \right\}, \end{aligned} \quad (20)$$

در رابطه فوق a نسبت منظر (نسبت طول به قطر) الیاف فولادی کوتاه و پارامتر g که به هندسه میکروالیاف مربوط می-شود برابر خواهد بود با:

$$g = \frac{a}{(a^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} \left\{ a(a^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - \cosh^{-1} a \right\}, \text{ when } a > 1 \quad (21)$$

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، ابتدا به منظور اعتبارسنجی مدل میکرومکانیکی ارائه شده، پیش‌بینی‌های مدل حاضر با داده‌های تجربی [۵۱] مقایسه می‌شوند. شکل (۲) مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی را بر حسب مقدار نانوگرافن نشان می‌دهد. چگالی گرافن ۲/۲۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و ثوابت الاستیک هیل $2k_r$ ، n_r ، $2m_r$ و $2p_r$ آن به ترتیب ۱۷۰۰، ۱۰۲۰۰۰، ۶/۸، ۲۰۴۰۰۰ و ۷۳۸ گیگاپاسکال می‌باشد [۴۳]، [۴۴]. همچنین مدول الاستیک و نسبت پواسون زمینه سیمانی به ترتیب ۳۳۴۸ مگاپاسکال و ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که مدول الاستیک پیش‌بینی شده با مدل میکرومکانیکی تطابق مناسبی با داده‌های تجربی [۵۱] دارد. همچنین مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی با افزایش مقدار نانوگرافن افزایش می‌یابد.

به‌عنوان تقویت کننده در نظر گرفته می‌شوند. همچنین فرض می‌شود که توزیع میکروالیاف فولادی در کامپوزیت به صورت اتفاقی باشد. بر اساس روش میکرومکانیکی موری-تاناکا، تانسور سفتی الاستیک چنین کامپوزیتی به صورت زیر داده می‌شود [۴۹]، [۵۰].

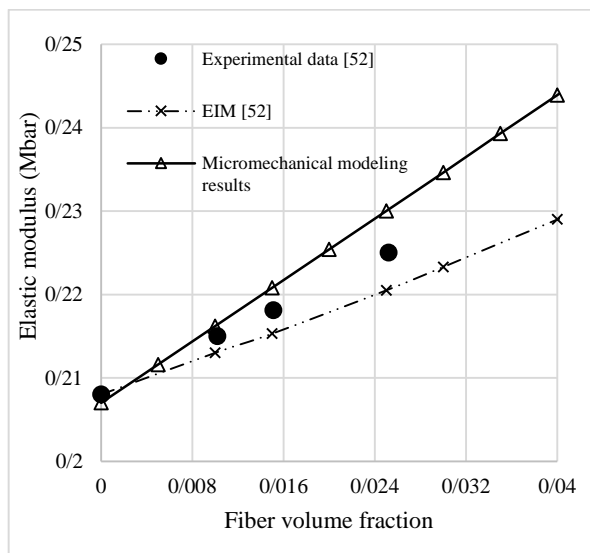
$$[C^{HC}] = [C^{NC}] + V_F ([C^F] - [C^{NC}]) \left\{ [\tilde{A}_1] \left[(1 - V_F)[I] + V_F[\tilde{A}_1] \right]^{-1} \right\} \quad (18)$$

در این رابطه V_F و C^F به ترتیب کسر حجمی و تانسور سفتی الیاف فولادی و تانسور \tilde{A}_1 به صورت زیر تعریف می‌شود.

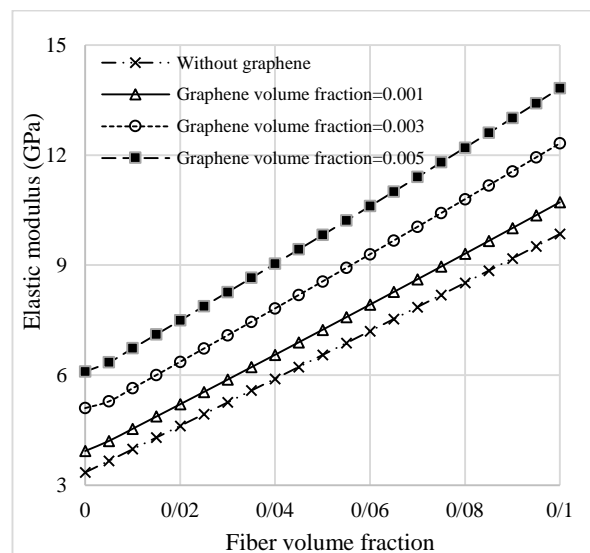
$$[\tilde{A}_1] = [I] + [\hat{S}]([C^{NC}]^{-1}([C^F] - [C^{NC}]))^{-1} \quad (19)$$

همچنین مؤلفه‌های غیر صفر تانسور اشلیبی \hat{S} به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned} \hat{S}_{1111} &= \frac{1}{2(1-v^{NC})} \left\{ 1 - 2v^{NC} + \frac{3a^2 - 1}{a^2 - 1} - \left[1 - 2v^{NC} + \frac{3a^2}{a^2 - 1} \right] g \right\}, \\ \hat{S}_{2222} = \hat{S}_{3333} &= \frac{a^2}{8(1-v^{NC})a^2 - 1} + \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left[1 - 2v^{NC} - \frac{1}{9} - \frac{1}{4(a^2 - 1)} \right] g, \\ \hat{S}_{2233} = \hat{S}_{3322} &= \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left\{ \frac{a^2}{2(a^2 - 1)} - \left[1 - 2v^{NC} + \frac{3}{4(a^2 - 1)} \right] g \right\}, \\ \hat{S}_{2211} = \hat{S}_{3311} &= -\frac{1}{2(1-v^{NC})} \frac{a^2}{a^2 - 1} + \frac{1}{4(1-v^{NC})} \left\{ \frac{3a^2}{a^2 - 1} - (1 - 2v^{NC}) \right\} g, \end{aligned}$$



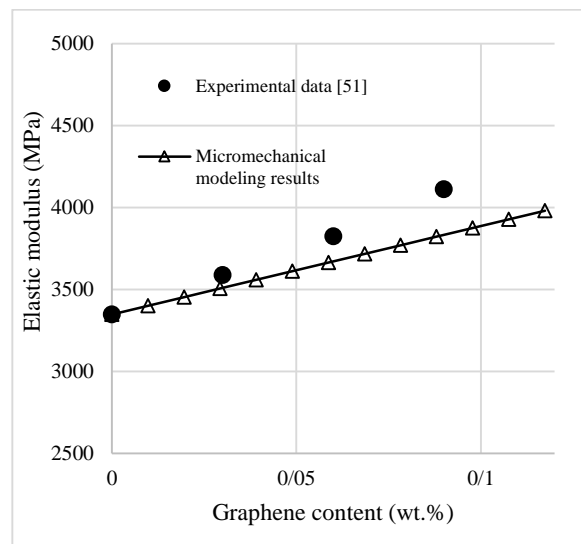
شکل ۳ مقایسه مدول الاستیک کامپوزیت زمینه بتنی حاوی الیاف فولادی



شکل ۴ تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن بر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی

نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی نشان می‌دهد که مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن با افزایش مقدار میکروالیاف افزایش می‌یابد.

همان‌طور که بیان شد، ممکن است در حین فرآیند ساخت کامپوزیت‌های سیمانی، نانوذرات کربنی در زمینه به حالت کلوخه‌ای شده درآیند. لذا با استفاده از مدل میکرومکانیکی ارائه شده اثر این پارامتر ریزساختاری بر خواص ارتجاعی کامپوزیت مورد نظر بررسی می‌شود.



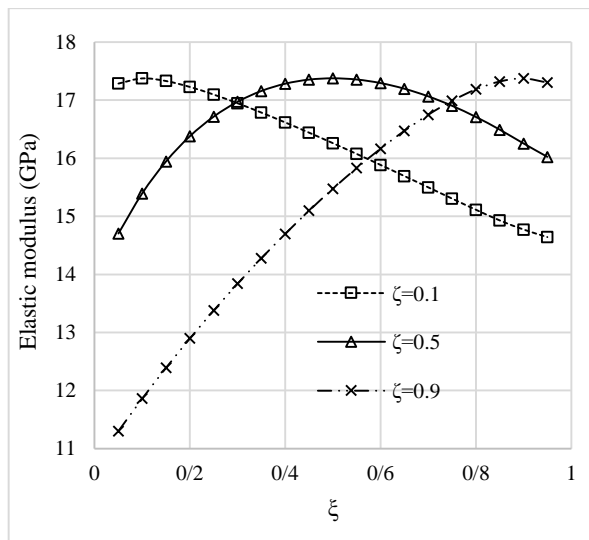
شکل ۵ مقایسه مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی حاوی گرافن

مقایسه‌ای دیگر بین پیش‌بینی‌های مدل میکرومکانیکی حاضر با داده‌های تجربی و همچنین مدل EIM^۱ برای مدول الاستیک کامپوزیت بتنی تقویت شده با الیاف فولادی ارائه می‌شود. مدول الاستیک و نسبت پواسون برای زمینه و الیاف به ترتیب ۲۰/۸۰۲ گیگاپاسکال، ۰/۲۰۸۱ و ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ می‌باشد. همچنین نسبت منظر میکروالیاف فولادی ۱۰۰ می‌باشد [۵۲]. شکل (۳) مدول الاستیک ماده کامپوزیتی را بر حسب کسر حجمی الیاف فولادی نشان می‌دهد. واضح است که نتایج مدل‌سازی ارائه شده در این مطالعه تطابق قابل قبولی با داده‌های تجربی [۵۲] دارد. بیشترین اختلاف بین دو مجموعه از نتایج حدود ۲/۵ درصد می‌باشد.

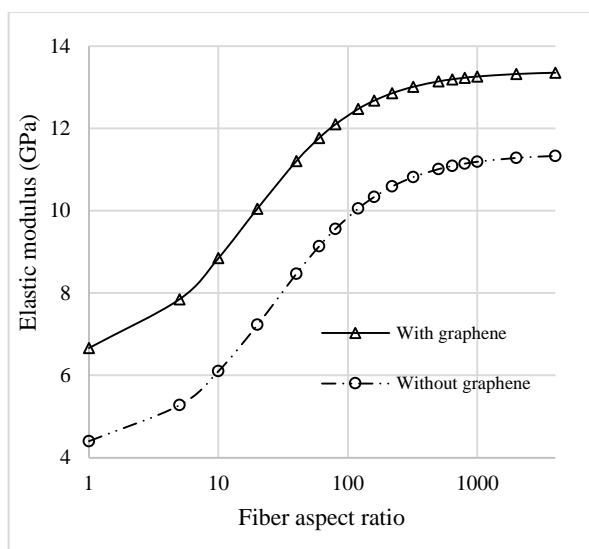
در این قسمت، با به‌کارگیری رویکرد میکرومکانیکی سلسه-مراتبی بر اساس روش موری-تاناکا، مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن ارائه می‌شود. قطر و طول الیاف به ترتیب ۵۰ میکرومتر و ۵ میلی‌متر می‌باشد. در شکل (۴) تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن بر مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی بررسی شده است. همچنین نتایج برای سه کسر حجمی گرافن شامل ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۵ ارائه شده است. به خوبی می‌توان دریافت که افزودن حتی مقدار کمی نانوصفحات گرافن باعث بهبود خواص الاستیک کامپوزیت سیمانی اقویت شده با الیاف فولادی می‌شود. به‌عنوان مثال افزودن ۰/۳ درصد حجمی نانوغرافن به کامپوزیت سیمانی حاوی ۴ درصد حجمی الیاف فولادی باعث بهبود حدود ۳۳ درصدی در مدول الاستیک آن می‌شود.

¹ Equivalent inclusion method

کامپوزیت سیمانی می‌شود. در واقع افزایش نسبت منظر میکروالیاف باعث بهبودی در ظرفیت تحمل بار مکانیکی کامپوزیت سیمانی می‌شود. به‌عنوان مثال، با افزایش نسبت منظر الیاف فولادی از ۱۰ به ۱۰۰، مدول الاستیک کامپوزیت سیمانی شامل نانوگرافن و بدون آن به ترتیب ۳۹ درصد و ۶۰ درصد بهبود می‌یابد. همچنین می‌توان دریافت که بعد از نسبت منظر ۱۰۰، افزایش بیشتر آن تأثیر جزئی بر خواص مکانیکی دارد.



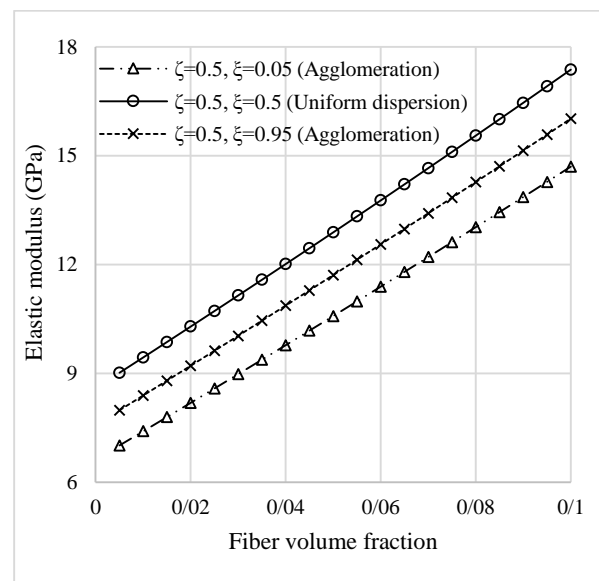
شکل ۶ تغییرات مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با پارامتر ζ



شکل ۷ تغییرات مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با نسبت منظر الیاف

همراستایی الیاف در مواد کامپوزیتی یکی از پارامترهای مهم ریزساختاری جهت طراحی یک ماده مقاوم در برابر بارهای

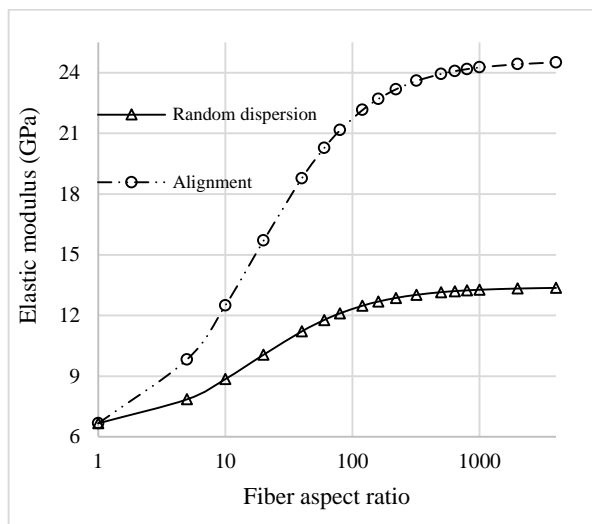
شکل (۵) تأثیر نوع توزیع نانوصفحات گرافن با مقدار ۱ درصد حجمی را بر مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی نشان می‌دهد. تشکیل حالت کلوخه‌ای نانوذرات، سبب کاهش اثرات تقویت‌کنندگی گرافن و در نهایت کاهش مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی حاوب میکروالیاف فولادی می‌شود. در واقع با توزیع یکنواخت نانوگرافن ($\xi = \zeta$) در سیمان می‌توان از مزیت فوق‌العاده خواص مکانیکی چنین ذراتی استفاده نمود.



شکل ۵ تأثیر نوع توزیع نانوصفحات بر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن

در شکل (۶) تغییرات مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با پارامتر تجمع نانوذرات ξ به ازای مقادیر مختلف پارامتر ζ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با دور شدن از حالت توزیع یکنواخت نانوذرات، مدول الاستیک کامپوزیت سیمانی کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مدول الاستیک به ازای $\xi = \zeta$ یعنی تحت شرایط توزیع یکنواخت به دست می‌آید.

شکل (۷) مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی را با نسبت منظر الیاف نشان می‌دهد. درصد حجمی الیاف فولادی و نانوصفحات گرافن در کامپوزیت زمینه سیمانی به ترتیب برابر ۱۰ و ۰/۳ می‌باشد. دقت شود که توزیع الیاف فولادی در کامپوزیت به صورت اتفاقی در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی به وضوح نشان می‌دهد که افزایش نسبت منظر الیاف فولادی باعث افزایش غیرخطی در مدول الاستیک



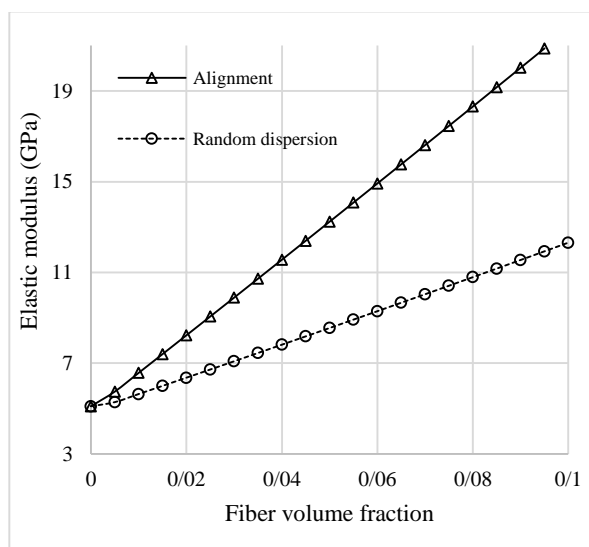
شکل ۹ تأثیر همراستایی الیاف بر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با نسبت منظر الیاف

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل میکرومکانیکی بر اساس روش موری-تاناکا جهت پیش‌بینی مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی و نانوصفحات گرافن ارائه شد. با توجه به پارامترهای میکروساختاری موجود از جمله پدیده خوشه‌ای شدن نانوذرات، فرآیند مدل‌سازی میکرومکانیکی در چند مرحله پایه‌ریزی شد. تطابق بسیار خوبی بین نتایج پیش‌بینی شده با مدل میکرومکانیکی حاضر در قیاس با داده‌های تجربی موجود مشاهده شد. یافته‌های مهم این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- افزودن نانوصفحات گرافن به کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با میکروالیاف فولادی موجب بهبود خواص الاستیک آن می‌شود. افزایش مقدار نانوذرات با حفظ توزیع یکنواخت موجب بهبودی بیشتر در خواص مکانیکی کامپوزیت خواهد شد.
- در صورت تشکیل حالت کلوخه‌ای نانوذرات گرافن، مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی کاهش می‌یابد. لذا به منظور افزایش کارآرایی این ماده کامپوزیتی، توزیع همگن نانوصفحات گرافن در سیمان توصیه می‌شود.
- افزایش کسر حجمی و نسبت منظر میکروالیاف فولادی باعث بهبودی بیشتر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی می‌شود. البته نتایج نشان داد که با افزایش نسبت منظر میکروالیاف، مدول الاستیک تا یک مقدار آستانه‌ای افزایش می‌یابد که به پارامترهای ریزساختاری از جمله مقدار نانوگرافن، نوع توزیع الیاف فولادی بستگی خواهد داشت.

کششی خارجی محسوب می‌شود. با استفاده از روش میکرومکانیکی توسعه داده شده، اثرات همراستایی میکروالیاف فولادی بر مدول الاستیک کامپوزیت زمینه سیمانی حاوی الیاف و نانوگرافن بررسی می‌شود. نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی در شکل (۸) نشان داده شده است. به وضوح می‌توان دریافت که همراستاسازی میکروالیاف فولادی در کامپوزیت سیمانی موجب افزایش چشمگیر مدول الاستیک خواهد شد. به عنوان مثال، مدول الاستیک این ماده کامپوزیتی شامل ۰.۵٪ حجمی الیاف فولادی همراستا شده و ۰.۳٪ نانوصفحات گرافن ۵۵ درصد بیشتر از نمونه با توزیع اتفاقی الیاف فولادی می‌باشد.



شکل ۸ تأثیر همراستایی الیاف بر مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافنی با کسر حجمی الیاف

در شکل (۹) تغییرات مدول الاستیک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی و نانوصفحات گرافن در مقابل نسبت منظر الیاف در دو حالت شامل توزیع اتفاقی میکروالیاف و همراستاسازی آن نشان داده شده است. به وضوح می‌توان دریافت که یک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با نانوگرافن و میکروالیاف فولادی همراستاسازی دارای مدول الاستیک بسیار بالاتری در قیاس با نمونه حاوی الیاف فولادی با توزیع اتفاقی می‌باشد. همچنین نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی نشان می‌دهد زمانی که الیاف به صورت همراستا در کامپوزیت پایه سیمانی قرار دارد، مدول الاستیک تا نسبت منظر ۱۰۰۰ به سرعت افزایش می‌یابد و بعد از این مقدار مشخص، تغییرات آن تأثیر جزئی بر مدول الاستیک خواهد داشت. این در حالی است که برای نمونه شامل الیاف فولادی با توزیع اتفاقی، این مقدار عدد ۱۰۰ گزارش می‌شود.

- composites,” *Materials*, vol. 16, no. 7, 2552, 2023, <https://doi.org/10.3390/ma16072552>.
- [8] A. Dinesh, and D. Suji, “Electro-mechanical investigations of steel fiber reinforced self-sensing cement composite and their implications for real-time structural health monitoring,” *Journal of Building Engineering*, vol. 51, 104343, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104343>.
- [9] S. Elkatatny, R. Gajbhiye, A. Ahmed, and A. A. Mahmoud, “Enhancing the cement quality using polypropylene fiber,” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 10, pp. 1097-1107, 2020, <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00804-4>.
- [10] L. Rovero, S. Galassi, and G. Misseri, “Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 194, 108051, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108051>.
- [11] A. E. Naaman, “Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites,” *Journal of advanced concrete technology*, vol. 1, no. 3, pp. 241-252, 2003, <https://doi.org/10.3151/jact.1.241>.
- [12] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, M. Fahmi, and S. İpek, “Mechanical and fracture properties of carbon fiber reinforced self-compacting concrete composites,” In 10th International Conference on Composite Science and Technology, pp. 1-12, Portugal: Lisboa, 2015.
- [13] H. Yang, H. Cui, W. Tang, Z. Li, N. Han, and F. Xing, “A critical review on research progress of graphene/cement based composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 102, pp. 273-296, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.07.019>.
- [14] Y. Lin, and H. Du, “Graphene reinforced cement composites: A review,” *Construction and Building Materials*, 265, 120312, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120312>.
- [15] H. Du, and S. Dai Pang, “High performance cement composites with colloidal nano-silica,” *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp. 317-325, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.045>.
- [16] B. Han, S. Sun, S. Ding, L. Zhang, X. Yu, and J. Ou, “Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 70, pp. 69-81, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.12.002>.
- بیشترین مدول الاستیک زمانی حاصل می‌شود که میکروالیاف فولادی در کامپوزیت پایه سیمانی حاوی نانوذرات گرافن همراستا شده باشند.
 - با توجه به ارتباط بین ریزساختارهای موجود و رفتار کششی کامپوزیت پایه سیمانی حاوی میکروالیاف فولادی و نانوغرافن، امکان تنظیم اجزای سازنده برای دستیابی به عملکرد مکانیکی هدفمند فراهم خواهد شد.
- ### مراجع
- [1] D. Lilargem Rocha, L. U. D. Tambara Júnior, M. T. Marvila, E. C. Pereira, D. Souza, and A. R. G. de Azevedo, “A review of the use of natural fibers in cement composites: concepts, applications and Brazilian history,” *Polymers*, vol. 14, no. 10, 2043, 2022, <https://doi.org/10.3390/polym14102043>.
- [2] X. Li, D. Qin, Y. Hu, W. Ahmad, A. Ahmad, F. Aslam, and P. Joyklad, “A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications,” *Journal of Building Engineering*, vol. 45, 103447, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103447>.
- [3] T. A. Fode, Y. A. C. Jande, and T. Kivevele, “Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite—Comprehensive review,” *Heliyon*, vol. 9, no. 7, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17924>.
- [4] S. Abdallah, M. Fan, and D. W. Rees, “Bonding mechanisms and strength of steel fiber-reinforced cementitious composites: Overview,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 3, 04018001, 2018, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000215).
- [5] A. A. Abdul-Razzak, and A. A. M. Ali, “Influence of cracked concrete models on the nonlinear analysis of high strength steel fibre reinforced concrete corbels,” *Composite Structures*, vol. 93, no. 9, pp. 2277-2287, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.016>.
- [6] Y. Ding, F. Zhang, F. Torgal, and Y. Zhang, “Shear behaviour of steel fibre reinforced self-consolidating concrete beams based on the modified compression field theory,” *Composite Structures*, vol. 94, no. 8, pp. 2440-2449, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.02.025>.
- [7] Y. Hao, C. Shi, Z. Bi, Z. Lai, A. She, and W. Yao, “Recent advances in properties and applications of carbon fiber-reinforced smart cement-based

- Composites*, vol. 82, pp. 165-175, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.004>.
- [26] S. Jiang, D. Zhou, L. Zhang, J. Ouyang, X. Yu, X. Cui, and B. Han, "Comparison of compressive strength and electrical resistivity of cementitious composites with different nano-and micro-fillers," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 60-68, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.05.010>.
- [27] H. Cui, Z. Jin, D. Zheng, W. Tang, Y. Li, Y. Yun, T. Yiu Loand, F. Xing, "Effect of carbon fibers grafted with carbon nanotubes on mechanical properties of cement-based composites," *Construction and building materials*, vol. 181, pp. 713-720, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.049>.
- [28] J. Chen, D. Zhao, H. Ge, and J. Wang, "Graphene oxide-deposited carbon fiber/cement composites for electromagnetic interference shielding application," *Construction and Building materials*, vol. 84, pp. 66-72, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.050>.
- [29] Z. S. Chen, X. Zhou, X. Wang, and P. P. Guo, "Mechanical behavior of multilayer GO carbon-fiber cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 159, pp. 205-212, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.094>.
- [30] S. Wu, T. Qureshi, and G. Wang, "Application of graphene in fiber-reinforced cementitious composites: A review," *Energies*, vol. 14, no. 15, 4614, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14154614>.
- [31] Z. Lu, J. Yu, J. Yao, and D. Hou, "Experimental and molecular modeling of polyethylene fiber/cement interface strengthened by graphene oxide," *Cement and Concrete Composites*, vol. 112, 103676, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103676>.
- [32] Z. Lu, A. Hanif, G. Sun, R. Liang, P. Parthasarathy, and Z. Li, "Highly dispersed graphene oxide electrodeposited carbon fiber reinforced cement-based materials with enhanced mechanical properties," *Cement and Concrete Composites*, vol. 87, pp. 220-228, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.006>.
- [33] X. Liu, G. Wang, R. Liu, K. Lyu, J. Zuo, and S. P. Shah, "Stress-sensitivity of carbon nanotube-grafted-carbon fiber incorporated cement-based composites," *Journal of Building Engineering*, vol. 64, 105589, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105589>.
- [34] F. Zhou, G. Pan, and L. Zhang, "Enhancing the shrinkage resistance and impermeability of cement-based materials using carbon fiber modified by in situ-grown nano-SiO₂ and carbon nanotubes,"
- [17] S. Chuah, Z. Pan, J. G. Sanjayan, C. M. Wang, and W. H. Duan, "Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide," *Construction and Building materials*, vol. 73, pp. 113-124, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>.
- [18] G. Goncalves, P. A. Marques, C. M. Granadeiro, H. I. Nogueira, M. K. Singh, and J. Gracio, "Surface modification of graphene nanosheets with gold nanoparticles: the role of oxygen moieties at graphene surface on gold nucleation and growth," *Chemistry of Materials*, vol. 21, no. 20, pp. 4796-4802, 2009, <https://doi.org/10.1021/cm901052s>.
- [19] L. Lu, and D. Ouyang, "Properties of cement mortar and ultra-high strength concrete incorporating graphene oxide nanosheets," *Nanomaterials*, vol. 7, no. 7, 187, 2017, <https://doi.org/10.3390/nano7070187>.
- [20] A. Gholampour, M. Valizadeh Kiamahalleh, D. N. Tran, T. Ozbakkaloglu, and D. Losic, "From graphene oxide to reduced graphene oxide: impact on the physiochemical and mechanical properties of graphene-cement composites," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, no. 49, pp. 43275-43286, 2017, <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16736>.
- [21] D. Hou, Z. Lu, X. Li, H. Ma, Z. Li, "Reactive molecular dynamics and experimental study of graphene-cement composites: Structure, dynamics and reinforcement mechanisms," *Carbon*, vol. 115, pp. 188-208, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.013>.
- [22] Z. Pan, L. He, L. Qiu, A. H. Korayem, G. Li, J. W. Zhu, ... and M. C. Wang, "Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite," *Cement and Concrete Composites*, vol. 58, pp. 140-147, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>.
- [23] T. S. Qureshi, and D. K. Panesar, "Impact of graphene oxide and highly reduced graphene oxide on cement based composites," *Construction and Building Materials*, vol. 206, pp. 71-83, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.176>.
- [24] B. S. Sindu, and S. Sasmal, "On the development and studies of nano-and micro-fiber hybridized strain hardened cementitious composite," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 348-359, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.11.008>.
- [25] G. M. Kim, S. M. Park, G. U. Ryu, and H. K. Lee, "Electrical characteristics of hierarchical conductive pathways in cementitious composites incorporating CNT and carbon fiber," *Cement and Concrete*

- Materials*, vol. 129, pp. 63-79, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2018.11.003>.
- [43] R. Pouyanmehr, M. K. Hassanzadeh-Aghdam, and R. Ansari, "Effect of graphene nanosheet dispersion on diffusion-induced stresses in layered sn-based nanocomposite electrode for lithium-ion batteries," *Mechanics of Materials*, vol. 145, pp. 103390, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103390>.
- [44] X. Y. Ji, Y. P. Cao, and X. Q. Feng, "Micromechanics prediction of the effective elastic moduli of graphene sheet-reinforced polymer nanocomposites," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 045005, 2010, DOI 10.1088/0965-0393/18/4/045005.
- [45] Y. Suo, R. Guo, H. Xia, Y. Yang, B. Zhou, and Z. Zhao, "A review of graphene oxide/cement composites: Performance, functionality, mechanisms, and prospects," *Journal of Building Engineering*, vol. 53, pp. 104502, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104502>.
- [46] S. Bai, L. Jiang, N. Xu, M. Jin, and S. Jiang, "Enhancement of mechanical and electrical properties of graphene/cement composite due to improved dispersion of graphene by addition of silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 164, pp. 433-441, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.176>.
- [47] M. Krystek, D. Pakulski, V. Patroniak, M. Górski, L. Szojda, A. Ciesielski, and P. Samorì, "High-performance graphene-based cementitious composites," *Advanced Science*, vol. 6, no. 9, pp. 1801195, 2019, <https://doi.org/10.1002/advs.201801195>.
- [48] M. K. Hassanzadeh-Aghdam, "Evaluating the effective creep properties of graphene-reinforced polymer nanocomposites by a homogenization approach," *Composites Science and Technology*, vol. 209, pp. 108791, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108791>.
- [49] T. Mori, and K. Tanaka, "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions," *Acta metallurgica*, vol. 21, no. 5, pp. 571-574, 1973, [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3).
- [50] M. Safi, M. K. Hassanzadeh-Aghdam, and M. J. Mahmoodei, "Effects of nano-sized ceramic particles on the coefficients of thermal expansion of short SiC fiber-aluminum hybrid composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 803, pp. 554-564, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.314>.
- Journal of Building Engineering*, vol. 63, pp. 105542, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105542>.
- [35] X. Ou, G. Ye, J. Jiang, J. Gong, and Z. He, "Improving electrical and mechanical properties of cement composites by combined addition of carbon black and carbon nanotubes and steel fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 438, pp. 136931, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136931>.
- [36] V. Rheinheimer, Y. Wu, T. Wu, K. Celik, J. Wang, L. De Lorenzis, ... and P. J. Monteiro, "Multi-scale study of high-strength low-thermal-conductivity cement composites containing cenospheres," *Cement and Concrete Composites*, vol. 80, pp. 91-103, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.002>.
- [37] S. H. Jang, D. P. Hochstein, S. Kawashima, and H. Yin, "Experiments and micromechanical modeling of electrical conductivity of carbon nanotube/cement composites with moisture," *Cement and Concrete Composites*, vol. 77, pp. 49-59, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.003>.
- [38] E. García-Macías, A. D'Alessandro, R. Castro-Triguero, D. Pérez-Mira, and F. Ubertini, "Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 108, pp. 451-469, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.025>.
- [39] J. Li, , Qiu, J. Weng, and E. H. Yang, "Micromechanics of engineered cementitious composites (ECC): A critical review and new insights," *Construction and Building Materials*, vol. 362, pp. 129765, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129765>.
- [40] M. K. Hassanzadeh-Aghdam, R. Ansari, and M. J. Mahmoodei, A. Darvizeh, and A. Hajati-Modarai, "A comprehensive study on thermal conductivities of wavy carbon nanotube-reinforced cementitious nanocomposites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 90, pp. 108-118, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.021>.
- [41] M. Safi, M. K. Hassanzadeh-Aghdam, and M. J. Mahmoodei, "Elastic properties of cement-based composites reinforced by nano-tailored hybrid fiber," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 26, pp. 5232-5246, 2022, <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1952359>.
- [42] M. Hasanzadeh, R. Ansari, and M. K. Hassanzadeh-Aghdam, "Evaluation of effective properties of piezoelectric hybrid composites containing carbon nanotubes," *Mechanics of*

reinforced concrete using a dedicated empirical formula,” *Computational materials science*, vol. 31, no. 3-4, pp. 337-346, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2004.04.003>.

[51] Y. Zhao, Y. Liu, T. Shi, Y. Gu, B. Zheng, K. Zhang, ... and S. Shi, “Study of mechanical properties and early-stage deformation properties of graphene-modified cement-based materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 257, 119498, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119498>.

[52] T. L. Teng, Y. A. Chu, F. A. Chang, and H. S. Chin, “Calculating the elastic moduli of steel-fiber