



## دستیابی به خواص بهینه مکانیکی مدول برشی، مدول حجمی و سفتی محوری با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی

محسن احمدی<sup>1</sup>، مجتبی حقیقی‌یزدی<sup>2\*</sup>، مریم مهنما<sup>3</sup>، علی‌رضا مشکی<sup>4</sup>

1- 4- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

\* تهران، صندوق پستی 1439957131، mohaghghi@ut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

از سالیان نه‌چندان دور و به‌خصوص اخیراً، ایجاد موادی مطلوب چه از لحاظ مواد تشکیل‌دهنده و چه با خواص مورد انتظار از سوی متخصصین پیگیری می‌شده است. در این بین ریزساختارها به جهت حالت بهینه و دقت محاسبات مورد توجه‌اند. ریزساختارها همان مواد ناهمگنی هستند که طی یک فرآیند بهینه‌سازی معماری‌های ساختارشان بهینه می‌شود. در این مقاله فرآیند بهینه‌سازی توپولوژی برای طراحی ریزساختار چندفازی الاستیک با استفاده از فاکتور جبران‌سازی و روش همگن‌سازی عددی پیاده‌سازی می‌شود. طی این مطالعه بهینه‌سازی عددی با اعمال محاسبات روی متغیرهای طراحی متشکل از درصد حجمی هر فاز در هر المان انجام می‌گیرد. روش حل مسئله بهینه‌سازی توپولوژی مبتنی بر تقسیم به چند سری زیرمسئله بهینه‌سازی دوفازی است که وظیفه انجام آن با یک عمل‌گر مرسوم دوفازی به عنوان یک عمل‌گر درون فضای بهینه‌سازی است. در این پژوهش به مقادیری برابر 0.7264، 0.4447 و 0.3008 برای خاصیت‌های مدول برشی، حجمی و سفتی محوری دست پیدا کردیم. در یک دید کلی، میزان محاسبات و دشواری مسئله به تعداد فازهای شرکت‌کننده در فرآیند طراحی ساختار وابسته است. تا پیش از این مطالعه برای ریزساختارهای متناوب، متقارن و دوفازی به این سوال پاسخ داده شده است. طی مطالعه حاضر ما با تشکیل تانسورهای خواص مواد به صورت تابعی از درصد حجمی به مسئله طرح‌شده پاسخ می‌دهیم. این راه‌حل با تعریف یک فضای طراحی و میدانی منظم از مرزهای بالا و پایین دستگاه مختصات محلی انجام می‌گیرد. مرزهایی که حفظ آن‌ها موجب انسجام و استانداردسازی برای کارهای بعدی در زمینه طراحی ریزساختارهای چندفازی است.

دریافت: 1402/11/29

پذیرش: 1403/03/23

### کلیدواژگان

ریزساختارهای چندفازی،

سلول پایه متناوب،

همگن‌سازی عددی،

بهینه‌سازی توپولوژی

## Achieving optimal mechanical properties of shear modulus, bulk modulus and axial stiffness using topology optimization

Mohsen Ahmadi<sup>1</sup>, Mojtaba Haghighi-Yazdi<sup>2\*</sup>, Maryam Mahnama<sup>3</sup>, Alireza Moshki<sup>4</sup>

1, 2, 3, 4- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14399-57131, Tehran, Iran, mohaghghi@ut.ac.ir

### Keywords

Materials Design,  
Topology Optimization,  
SIMP Method,  
Numerical Homogenization,  
Multi Phase Microstructures

### Abstract

It has been created for several years and in particular, the materials that make up the composition and the expected properties are followed by experts. Meanwhile, microstructures are considered for the optimal mode and accuracy of calculations. Microstructures are heterogeneous materials whose structure is optimized by an optimization process. In this thesis, topology optimization design for multiphase elastic microstructure is implemented using compensation factor and numerical homogenization method. During this study, numerical optimization is performed by applying calculations on design changes consisting of volume percentage of each phase in each element. The technique of solving the topology optimization problem is divided into several series of two-phase subproblems, which performs its task with a conventional two-phase operator as an operator in the optimization space. In this research, values equal to 0.7264, 0.4447 and 0.3008 were obtained. In general, the calculation rate of a view depends on the number of phases involved in the structure design process. Until this study, this question has been answered for symmetric, symmetrical and two-phase microstructures.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Ahmadi, M., Haghighi-Yazdi, M., Mahnama, M., Moshki, A., "Achieving optimal mechanical properties of shear modulus, bulk modulus and axial stiffness using topology optimization," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2391-2400, 2024.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2016020.1870

## 1- مقدمه

معکوس یک مسئله‌ای با تعیین ابتدایی خواص رفتاری و به دست آوردن خواص ساختاری سیستم است. او ادعا می‌کند که فرمول‌بندی ارائه شده که در 2 بعد تدوین شده است قابل تعمیم به محاسبات 3 بعد نیز است. همچنین مطرح می‌کند که بسیاری از مواد به صورت خرپا و دیسک پیوسته برای ایجاد خواص مورد نظر قابل طراحی هستند [16]. زیگموند [7] در کار دیگر خود روی ساختن ریزساختار متناوب در 2 و 3 بعد متمرکز شد. او بار دیگر نیز بر روی روش همگن‌سازی عددی معکوس متمرکز شده است. مسئله یافتن ساده‌ترین ریزساختار ممکن با خصوصیات الاستیک تعیین شده به عنوان یک مسئله همگن‌سازی معکوس نامیده می‌شود و به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی برای یافتن ریزساختار با کمترین وزن ممکن که پاسخگوی الزامات رفتاری مشخص می‌باشد، فرموله شده است. ایده او پیاده‌سازی خرپا و قابی نازک بود که کمترین وزن را در نظر بگیرد. در 2 بعد از 120 عضو و در 3 بعد 2016 عضو به کاربرد تا بتواند به نسبت‌های پواسون 1-، 0 و 0.5 دست یابد.

در این مطالعه با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی، همگن‌سازی عددی و الگوریتم فاز فعال متناوب<sup>۸</sup> دستیابی به خواص بیشینه مطلوب امکان‌پذیر شد. آن چه در این تحقیق مهم می‌نماید تلفیق این روش‌ها با هم به نحوی که هیچ‌گونه تداخلی بین توابع اعمالی ایجاد نگردد، خواهد بود. چرا که ممکن هست فرآیند حل مسئله بهینه‌سازی برای طراحی ریزساختاری به طور مثال با تابع هدفی مانند مدول برشی، برای تابع هدفی دیگر نظیر سفتی محوری پاسخ مناسبی به دست ندهد. و این به آن معنی خواهد بود که سعی شده است تا به میزان ممکن دربرگیرندگی حالت‌های مختلف در توابع هدف مختلف با کسر حجمی‌های مختلف از هر فاز شرکت‌کننده در ریزساختار وجود داشته باشد.

طی تحقیق روند حل مسئله از توزیع فازها در جز حجمی نماینده<sup>۹</sup> (RVE) آغاز می‌شود. سپس تجزیه مسئله چند فازی به  $p/(p-1)/2$  زیر مسائل دوتایی برای استفاده از کارهای علمی گذشته و همچنین ساده‌سازی مسئله ادامه کار خواهد بود. همچنین در این کار تلاش می‌شود که از تلفیق بهینه‌سازی ساختاری در 2 بعد به طراحی ریزساختار در 3 بعد نتیجه شود. از همه مهم‌تر رعایت دربرگیرندگی برای طراحی‌های آینده بوده است. برای به‌روزرسانی متغیرها از سیمپ بهره‌گیری می‌شود چه این که موفقیت این مطالعه بستگی زیادی به این مقطع دارد. برای ادامه و همگرا کردن مسئله با حدود دقت تعریف شده باید خواص موثر با استفاده از همگن‌سازی تعیین شود و این همان تعیین تابع هدف مسئله خواهد بود. محاسبات فیلترینگ و حساسیت یک تابع هدف با توجه به قیدها و دقت‌هایی که کمی پیش‌تر اشاره شد کار را به سوی همگرایی رهنمون می‌کند. تطبیق و تبدیل فضای حل به چگالی المان-های چارچوب مسئله بر عهده روش معیار بهینگی گذاشته شده است. در صورت اقلان شرایط مسئله و تامین همگرایی چرخه حل بسته، و در غیر این صورت تا منتج شدن به مطلوب ادامه خواهد یافت.

## 2- همگن‌سازی

تجزیه و تحلیل یک مساله مقدار مرزی برای یک فضای سلولی با ناهمگنی‌های منظم و متناوب، بسیار دشوار می‌باشد. روشی که برای غلبه کردن بر این فرآیند معمولاً همگن‌سازی نامیده می‌شود و به صورت تئوری دقیق ریاضی

اخیراً کاربرد مواد ناهمگن به طور چشم‌گیر افزایش داشته است، از این مواد می‌توان آلایزهای فلزی و کامپوزیت‌های رشته‌ای را که رفتار مکانیکی مناسبی ارائه می‌دهند نام برد. ناهمگنی‌های موجود در این مواد می‌طلبد که محاسبات متناسب با پاسخی که از آن‌ها انتظار داریم، اندیشیده شود. طی سال‌های اخیر بهینه‌سازی توپولوژی<sup>۱</sup> به عنوان روش شناسایی فرم برای طراحی به سرعت در حال توسعه بوده است. برنامه‌های کاربردی زمینه‌های مختلف مهندسی مانند مکانیک سازه<sup>۲</sup>، جریان سیال<sup>۳</sup>، مسائل انتقال حرارت<sup>۴</sup> و غیره را به زودی در بر می‌گیرد. فو و همکاران [1] طی مطالعه‌ای یک ریزساختار جدید همسانگرد جامد با روش پارامتر جبران‌ساز بر اساس کسرهای حجم عنصری و فیلترگذاری موجود توسعه دادند. قابلیت ساخت از نتایج شبیه‌سازی انتخاب شده با فناوری مدل‌سازی رسوب ذوب شده (FDM)<sup>۵</sup> تأیید می‌شوند. این مطالعه نشان داد که روش پیشنهادی قادر به تولید توپولوژی‌های خود پستی‌بانی همگرا است که با استفاده از FDM قابل چاپ هستند. دلیل موضوعیت یافتن طراحی ناهمگن سلول پایه<sup>۶</sup> که همان کوچک‌ترین جزء تکرارپذیر فضای طراحی متناوب است، ریزساختاری است که با توجه به فرآیندهای ساخت پیشرفته‌ای که در حال بهتر شدن هستند، دشواری محاسبات پیچیده آن وجود ندارد و البته برای این مهم نیز که بتوان از چاپ‌گرهای پیشرفته برای تجسم این ریزساختارها توان عملیاتی دیجیتالی متوقع بود [1]. لیو و همکارانش [2] ضمن خلاصه کردن و ارائه روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی پیشرفته برای انواع AM<sup>7</sup> طراحی سلول واحد، طراحی ساختار مکعبی نمونه‌های اولیه 3 بعدی را ارائه کردند.

به هر حال قابلیت تولید ساختارهای متنوع با معماری‌هایی دقیق در اندازه‌های کوچک با طرح‌های توسعه‌ای در حال پیشرفت، موقعیت‌های ویژه‌ای در اختیار قرار می‌دهد [3]. کانسو و همکارانش [4] به یک ساختار شبکه‌ای دست یافتند که از پیوندهای استیلین و بنزن ساخته شده است و برای محدوده‌ای از ثوابت الاستیک مختلف و مواد ناهمسانگردی استفاده می‌شود. طی این کار از تکنیک‌های مدل‌سازی مولکولی بهره جسته است. محدوده‌هایی از مدول الاستیسیته 20 تا 117 گیگاپاسکال و نسبت پواسون 0.94- تا 1.4 طی این کار قابل دسترسی است. آن‌ها هدف خود را از انجام تحقیق‌شان اطلاع بیش‌تر در زمینه پلیمرهای لانه‌زنبوری آکوستیکی و رفتار انتقالی مکانیکی و جرم بیان کرده‌اند. در مطالعات آن‌ها ساختار لانه‌زنبوری برای نشان دادن کارایی فیلترگذاری بررسی شده است. فوجی و همکاران [5] با بهره‌گیری از کدنویسی به ایجاد ریزساختارهایی با دو فاز پرداختند. ایشان الگوهایی برای چینش فازها کنار هم را با استفاده از پارامترهایی ارائه دادند که پارامترها در واقع توابعی از چگالی‌های فازها بودند. شایان ذکر است ایشان نیز به مانند بسیاری دیگر از محققان این رشته از سیمپ<sup>۸</sup> برای به‌روزرسانی پارامترهای طراحی استفاده کرده‌اند. زیگموند در کارش ماتریس سازنده را برای مواد نیمه محدود ارائه داد. او در تحقیقش مسئله را با معکوس کردن فرآیند یافتن یک ماده با ضرایب همگن حل کرد و اولین تحقیقات برای کمینه نرمی توسط او انجام شد. طی این مقاله در جریان همگن‌سازی از روش انرژی متقابل المان‌ها بهره گرفته شده است. او طی این کار برای حالت 2 بعدی و مسئله را برای نسبت پواسون 1- و خواص اکسترموئی (بیشینه یا کمینه) حل کرده است. مسئله همگن‌سازی

<sup>7</sup> AM (Additive Manufacturing)

<sup>8</sup> SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)

<sup>9</sup> ALTERNATING ACTIVE-PHASE ALGORITHM

<sup>10</sup> Representative Volume Element (RVE)

<sup>1</sup> Topology optimization

<sup>2</sup> Structural mechanics

<sup>3</sup> Fluid flow

<sup>4</sup> Heat transfer

<sup>5</sup> Fused Deposition Modeling

<sup>6</sup> Unit cell

$$\varepsilon_{ij}(u) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

### 1-2- مفهوم سیمپ

در حال حاضر و از دهه هشتاد میلادی یکی از مطلوب‌ترین روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی، روش سیمپ بوده است. در واقع این روش، جریمه‌سازی مواد (میکروساختارها) همسانگرد جامد که دارای چگالی‌های میانی هستند، را انجام می‌دهد. مدع اصلی این روش بهینه‌سازی بندسو<sup>[10]</sup> بود. از مزایای روش سیمپ می‌توان به تعریف ساده و مستقیم توپولوژی که با استفاده از چگالی نسبی بین صفر (نبود ماده) و یک (وجود ماده) تغییر می‌کند، استفاده از المان‌های محدود برای تحلیل مسأله، نیازمند بودن به شبکه‌بندی المان‌ها به علت متغیر بودن درصد حجمی آن‌ها و همچنین توانمندی قابل قبول در غلبه بر ناپایداری عددی و رسیدن به هم‌گرایی فرآیند طراحی ریز ساختار نام برد<sup>[11]</sup>. مسأله بهینه‌سازی توپولوژی با المان‌های همسانگرد (حاوی ماده پایه) یا حفره‌ای (عدم وجود ماده پایه)، معمولاً شامل تعداد بسیار زیادی از این المان‌ها می‌باشند. به دلیل وجود این تعداد زیاد برای مقادیر گسسته مسئله (تعداد بسیار زیاد صفر و یک)، روش‌های جستجو مستقیم هزینه محاسباتی بسیار بالایی خواهند بود، لذا این موضوع عامل بازدارنده برای استفاده از این روش‌ها می‌باشد. بنابراین، استفاده از فرمولاسیون متغیرهای پیوسته توصیه می‌شود. در نظر گرفتن متغیرهای طراحی به صورت پیوسته به معنای تعریف بازه از صفر تا یک، قطعاً مشخص کردن وضعیت نهایی متغیرهای طراحی میانی را به دنبال دارد. بنابراین ایده مطرح شده در روش سیمپ برای جریمه‌سازی این متغیرهای میانی (المان‌های خاکستری)، راه‌حل بسیار مناسبی برای این مسئله می‌باشد. برای به کارگیری روش سیمپ در حوزه طراحی مواد، مقدار ماده‌ای (ماده همسانگرد مفروض به عنوان ماده پایه) که باید درون فضای حجمی از هر المان قرار داده شود، چگالی  $\rho_e$  هر المان تعریف می‌گردد. در توپولوژی‌های میکروساختاری دو فازی (جامد-حفره)،  $\rho_e = 0$  به معنای تهی بودن المان و  $\rho_e = 1$  به این معنی است که این المان، ماده پایه مفروض (جامد همسانگرد) است. برای تابع میان‌یابی در روش سیمپ<sup>[12]</sup> رابطه‌ای توانی بین سفتی و چگالی المان‌ها برقرار می‌باشد. در واقع مدول یانگ هر المان بر حسب این روش به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$E_e = \rho_e^q E_0 \quad (3)$$

محدوده متغیرهای طراحی (چگالی‌های هر المان)  $0 \leq \rho_e \leq 1$  می‌باشد و  $E_0$  مدول یانگ ماده پایه همسانگرد و  $q$  ( $q \geq 1$ ) پارامتر جریمه‌سازی هستند. در واقع چگالی‌هایی که بین صفر و یک قرار دارند، تحت فرآیند جریمه‌سازی قرار می‌گیرند تا در نهایت وضعیت آن‌ها از نظر جامد و حفره بودن، مشخص گردد. بنابراین با اتصال المان‌های محتوی ماده، توپولوژی سلول واحد از میکروساختارهای متناوب مواد ساخته می‌شود و المان‌های بدون ماده نیز نشان‌دهنده فضاهای خالی سلول واحد می‌باشند. بر اساس الگوریتم فاز فعال متناوب از حدس اولیه آغاز و تا تعیین چگالی هر المان برای هر کدام از زیرمسئله‌ها پایان داده می‌شود؛ در صورت عدم همگرایی به گام سوم می‌رود و سپس تا حصول همگرایی و اقیان شرایط حاکم بر مسئله طراحی ریزساختار روند ادامه می‌یابد.

پایه‌سازی می‌شود. تئوری ریاضی همگن‌سازی که تاکنون توسعه پیدا کرده است، به عنوان یک رویکرد جایگزین برای پیدا کردن خواص موثر ماده همگن-سازی شده معادل (مانند خواص میکروساختار کامپوزیت‌ها و مواد پیشرفته) مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از مفهوم توزیع میکروساختارهای کامپوزیتی، روش همگن‌سازی می‌تواند برای حل مسائل بهینه‌سازی توپولوژی ساختاری استفاده شود. مسئله‌ای که پیشنهاد می‌شود جایگزین کردن میکروساختارهای متناوب کامپوزیتی با یک نوع مدل ماده‌ای معادل می‌باشد. به طور کلی، این تئوری مستقیماً فرمول‌های تحلیلی یا الگوریتم‌های عددی مناسب را برای بدست آوردن پاسخ مسائل مهندسی فراهم نمی‌کند. بنابراین، فاصله‌ای میان تئوری ریاضی همگن‌سازی و مکانیک مواد مرکب وجود دارد. این فاصله موجود، به صورت یک مانع اصلی برای گسترش کاربرد روش‌های تئوری ریاضی همگن‌سازی در کارهای عملی می‌باشد. برای حل این موضوع، مدل میکروساختاری همگن‌سازی و فرمولاسیون آن بایستی به خوبی اثبات شود.

در ادامه این قسمت فرآیند برای به دست آوردن تانسور الاستیسیته همگن‌سازی شده که مبنای اصلی طراحی مواد برای بهینه‌سازی توپولوژی می‌باشد، اشاره می‌شود.

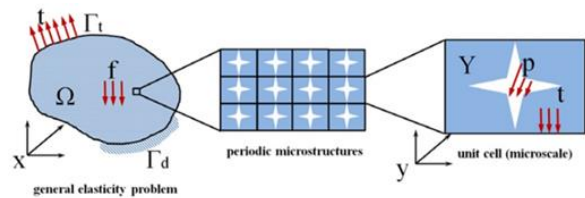


Fig. 1 The problem of an optimization process

شکل 1 یک مسئله (فرآیند) بهینه‌سازی<sup>[8]</sup>

در این جا جامد الاستیک غیرهمگن که دامنه‌ای به اندازه  $\Omega$  را در فضای  $R^3$  اشغال می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. مرز هموار  $\Gamma$  متشکل از  $\Gamma_d$  (که در آن جابجایی‌ها توصیف می‌شوند) و مرز کششی  $\Gamma_t$  (که در آن نیروهای حجمی و کششی اعمال می‌شوند) می‌باشد. برای شرایط مرزی کل سیستم، اشتراکی میان سطح مرزی تحت کشش سطحی و سطح مرزی تحت جابجایی وجود ندارد، یعنی  $\Gamma_d \cap \Gamma_t = \emptyset$ . سلول واحد  $Y$  از میکروساختار مورد نظر در فضای  $R^3$  بر حسب ابعاد سلول پایه در دستگاه مختصات میکروسکوپی به صورت  $Y = [0, \gamma_1] \times [0, \gamma_2] \times [0, \gamma_3]$  تعریف می‌شود. همان‌طور که در [8] مشاهده می‌شود، سلول پایه مورد نظر مستطیلی می‌باشد و مرز حفره آن در اگر  $u$  میدان جابجایی باشد که تعادل ساختار الاستیک را تعیین می‌کند و  $v$  میدان جابجایی مجازی در نظر گرفته شود که به لحاظ سینماتیکی قابل قبول باشد، فرم دو سوپه انرژی<sup>[9]</sup> برای کار مجازی داخلی یک ساختار الاستیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} E_{pqrs} \varepsilon_{rs}^{(ij)} \varepsilon_{pq}^{(kl)} d\Omega \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $E_{ijkl}^H$  تانسور سفتی می‌باشد که در کل دامنه متغیر است و  $\varepsilon_{ij}(u)$  به صورت زیر بر حسب جابجایی‌ها تعریف می‌گردد:

<sup>1</sup> Tensor  
<sup>2</sup> Bendsøe

2-2- تصحیح سیمپ

مدول یانگ هر المان به وسیله تابع میان‌یابی زیر حاصل می‌شود:

$$E_e = E(\rho_e) = E_{min} + \rho_e^q (E_0 - E_{min}) \quad (4)$$

در رابطه فوق  $E_{min}$  سفتی ماده نرم (حفره) و یا فازی که در الگوریتم فاز فعال متناوب مقدار کمتری نسبت به سفتی فاز دیگر دارد، می‌باشد که به منظور جلوگیری از تکینگی<sup>1</sup> ماتریس سفتی در فرآیند المان محدود با مقدار بسیار کوچک غیر صفر در نظر گرفته می‌شود.

3-2- الگوریتم فاز فعال متناوب

تشریح الگوریتم متناوب فاز فعال در این بخش ارائه خواهد شد. در حال حاضر کدهای علمی و تجاری زیادی برای حل مسائل بهینه‌سازی توپولوژی باینری<sup>2</sup> بر اساس روش‌های مختلف وجود دارد. انگیزه برای توسعه الگوریتم فاز فعال متناوب، ارائه یک چارچوب کلی برای تبدیل کدهای بهینه‌سازی توپولوژی فاز باینری به چندگانه با حداقل تلاش و اصلاحات است. علاوه بر این، حفظ کارایی و استحکام الگوریتم‌های اصلی نیز از دیگر عواملی است که در کار حاضر مورد توجه قرار گرفته است. از آن‌جا که این الگوریتم به اندازه کافی کلی است، ارائه در این‌جا به صورت خلاصه است تا امکان استفاده از این الگوریتم در کلاس‌های مختلف از مشکلات بهینه‌سازی توپولوژی فراهم شود.

الگوریتم فاز فعال متناوب شامل تکرار بیرونی است که در آن

$$p \cdot \frac{p-1}{2} \quad (5)$$

ریزمسائل بهینه‌سازی توپولوژی فاز باینری به صورت جزئی، با استفاده از یک حل‌کننده بهینه‌سازی توپولوژی مناسب فاز باینری حل می‌شوند. این روش می‌تواند به صورت مستقل (موازی) یا متوالی به ترتیب مانند تکرارهای ژاکوبی<sup>3</sup> و گاوس-سایدل<sup>4</sup> انجام شود [13]. در حین حل هر زیرمسئله، توپولوژی  $p-2$  فاز به عنوان آخرین مقادیر شناخته شده ثابت می‌شود و آن‌هایی که از دو مرحله باقی‌مانده (فاز فعال)، متغیر خواهند بود. اگر مراحل فعال با اشتراک‌های  $a$  و  $b$  مشخص شود، از  $\rho_{a,b}$  برای نشان دادن بردار طراحی استفاده می‌شود که در آن  $\rho_a$  و  $\rho_b$  می‌تواند تغییر کند و برای  $\rho_i$  برای  $i \neq \{a, b\}$  ثابت باشد. در فضای طراحی رابطه  $\sum_{i=1}^p \rho_i = 1$  و در هر چرخه از فرآیند زیر مسئله‌سازی رابطه‌های زیر حکم‌فرما خواهد بود:

$$r_{ab} = 1 - \sum_{i=1, i \neq \{a,b\}}^p \rho_i \quad (6)$$

و همچنین خواهیم داشت:

$$\rho_b = r_{ab} - \rho_a \quad (7)$$

که در آن‌ها  $r_{ab}$  باقی‌مانده درصد حجمی هنگام حل هر زیر مسئله است.

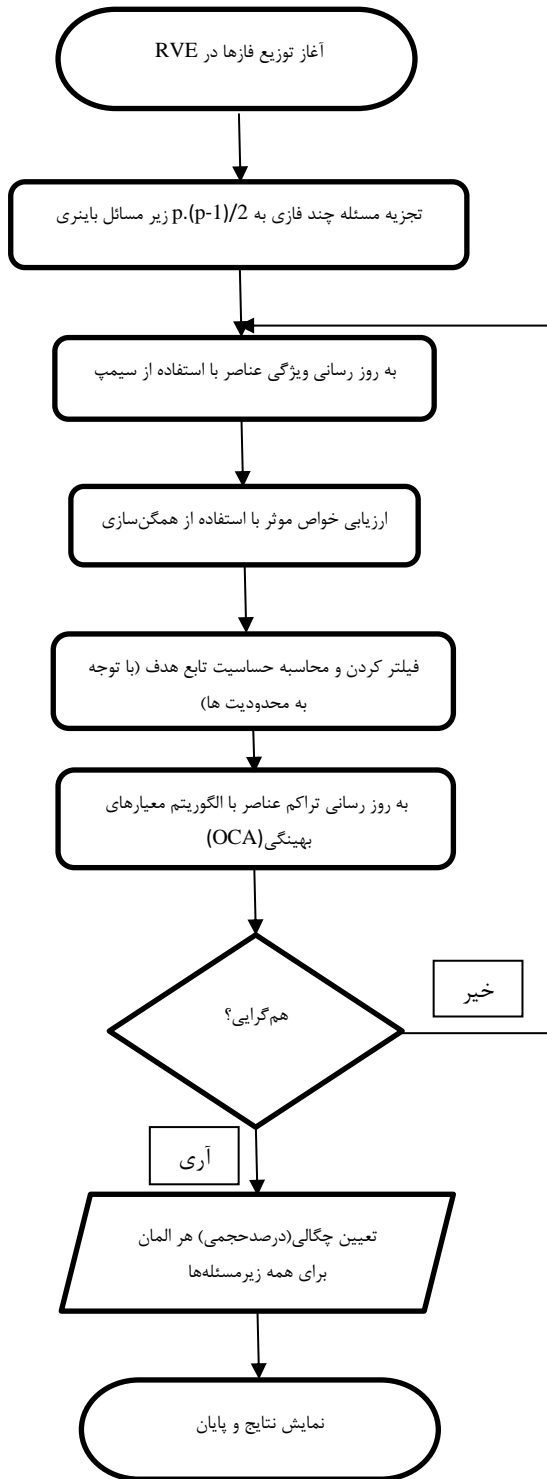


Fig. 2 The flowchart of solving the multiphase topology optimization process problem

شکل 2 روندنمای حل مساله (فرآیند) بهینه‌سازی توپولوژی چند فازی

4. Gauss-Seidel

1. Singularity  
2. binary  
3. Jacobi

بنابراین، یک الگوریتم فاز فعال متناوب، یک حل‌کننده بهینه‌سازی توپولوژی فاز مناسب است. از این پس به عنوان حل‌کننده بهینه‌سازی داخلی، این حل‌کننده نامیده می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت با اصلاح الگوریتم بهینه‌سازی توپولوژی فاز باینری، حل‌کننده بهینه‌سازی داخلی آسان است. اولین اصلاح مورد نیاز، جایگزینی اپراتور خواص مواد فاز باینری با متناظر نمونه چند فاز مربوطه آن، در تناظر است. در الگوریتم‌های بهینه‌سازی توپولوژی فاز باینری، فضای طراحی قابل قبول، ساختار ساده‌ای دارد.

#### 4-2- الگوریتم معیار بهینگی<sup>1</sup>

همان‌طور که در گام ششم روندنمای شکل 2 دیده می‌شود اجزای اصلی مسائل بهینه‌سازی دو فازی عبارتند از روش سیمپ (مواد همسانگرد جامد با جبران-سازی) [14] و تکنیک همگن‌سازی مجانبی [15 و 16] همراه با الگوریتم معیارهای بهینه [14]. مزیت اصلی کاربرد مشترک همگن‌سازی مجانبی و روش سیمپ، که تا حدی به دلیل محبوبیت آنها است، در استفاده آن‌ها از پارامترهای هر عنصر حوزه گسسته به عنوان متغیرهای طراحی در مسئله بهینه‌سازی نهفته است [15]. از میان روش‌های مختلف موجود برای انجام طراحی ریزساختار، در اینجا از OCA [14]، برای به روز رسانی چگالی عنصر با فازهای تشکیل دهنده استفاده شده است. با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی فاز باینری بر اساس OCA [14]، کسر حجمی بهینه دو فاز فعال محاسبه می‌شود. باید بیان کرد که OCA با حل تابع لاگرانژ زیرمشکلات پیاده‌سازی می‌شود و فرآیند به روز رسانی این روش بر اساس یک طرح به روز رسانی اکتشافی پیشنهاد شده در [16] است. اجزای اصلی این چارچوب الگوریتم فاز فعال متناوب، OCA مبتنی بر روش سیمپ و همگن‌سازی مجانبی است. روش پیشنهادی به شیوه قابل اعتنایی ساختارهای مرکب متخلخل و غیر متخلخل سه فازی را در فضایی کلی طراحی می‌کند. علاوه بر این، در تمام بهینه‌سازی‌های جستجوی توپولوژی، دو فاز از سه فاز همیشه نامرتب بودند تا ظرفیت طرح ترکیبی پیشنهادی را نشان دهند.

#### 3- نتایج

در این مطالعه برای کسب ریزساختارهای تکرارشونده از تعداد 10000 المان مربعی استفاده شده است. انتخاب این تعداد المان برای مطالعه حاضر مناسب می‌نماید، چه این که ژیا و بریتکوف [9] در کارشان این تعداد المان را مبنا قرار داده است. پر واضح است که می‌توان تعداد المان‌ها را افزایش داد اما شدت افزایش محاسبات و تاثیر آن بر پارامتر زمان به گونه‌ای است که بایستی به حدی بهینه از المان و دقت محاسباتی اکتفا کرد. مقدار مدول الاستیسیته برای فازها عبارتند از 1، 2 و برای فاز تهی  $10^{-9}$  واحد در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت پواسون ماده ایزوتروپ نیز در محاسبات انجام شده مقداری برابر با 0.3 فرض می‌شود. همچنین مقادیر شعاع فیلترسازی  $rf \leq 0.3$  (N) 10% اعمال می‌شود. برای انجام فرآیند همگن‌سازی مقدار پارامتر جبران-سازی  $q \geq 3$  منظور می‌گردد. شایان ذکر است که معمولاً این پارامتر برای توابع هدف لزوماً به صورت یکسان اعمال نمی‌شود؛ البته موارد مشابه هم در این موضوع وجود دارند. باید بدانیم تابع هدف بر مبنای تانسور سفتی ریزساختار تشریح می‌شود. دسته‌ای از مواد دارای مدول برشی اکسترمومی هستند، نه صفحه تقارن و سه ثابت مستقل در تانسور الاستیسیته‌شان دارند. برای بهینه‌سازی مدول برشی باید پارامترهایی از تانسور نرمی (معکوس تانسور سفتی) که

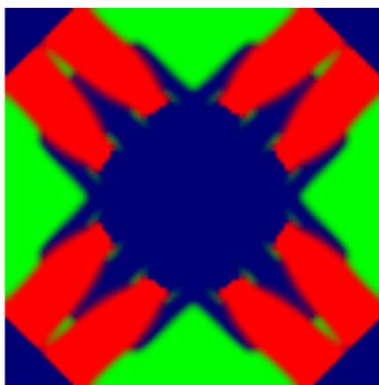
#### 3-1- بهینه‌سازی مدول برشی

برای انجام فرآیند بهینه‌سازی مدول برشی تابع هدفی که پیش‌بینی می‌شود رابطه زیر است:

$$Max. Shear = Q(3.3) \quad (8)$$

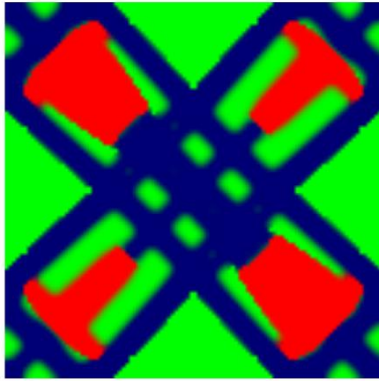
نتایج به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی مدول برشی در شکل‌های 3 تا 8 آمده است که در آن‌ها پیش‌فرض الگوی RGB (قرمز، سبز آبی) بوده است البته این پیش‌فرض همواره به هم‌گرایی فرآیند و یا عدم تقارن در ماتریس سازنده منجر نمی‌شود ناچار اعمال تغییراتی در جانشانی فازهای تشکیل دهنده الزامی می‌نماید. با هر تغییری هم می‌بایست فرآیند طراحی محکوم به هم‌گرایی شود (مانند آن‌چه در شکل‌های 3 تا 8 آمده است) و هم ماتریس متقارن با دقت خواسته شده به دست دهد (مانند رابطه 9).

$$[E^H]_{75\%(37.5\%-37.5\%)} = \begin{bmatrix} 0.1530 & 0.1013 & 0 \\ 0.1013 & 0.1530 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1009 \end{bmatrix} \quad (9)$$



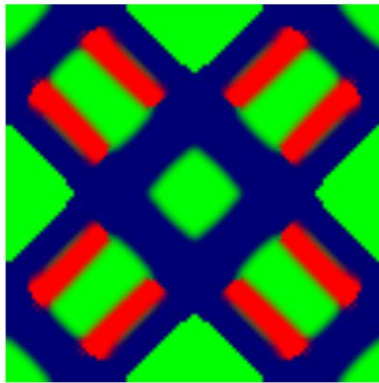
**Fig. 3** The designed microstructure with a volume fraction of 0.375 and of phase 1 (blue) and phase 2 (green) of solid phases and 0.25 of void phase (red) and a shear modulus equal to 0.0258 in two dimensions  
**شکل 3** ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی 0.375 و از فاز 1 (آبی) و فاز 2 (سبز) از فازهای جامد و 0.25 از فاز تهی رنگ (قرمز) و مدول برشی برابر با 0.0258 در دو بعد

<sup>1</sup> Optimality Criteria Algorithm



**Fig. 7** The designed microstructure with a volume fraction of 0.20 and 0.45 respectively from phase 1 (red) and phase 2 (blue and 0.35 green for void) of solid phases and shear modulus equal to 0.0111 in two dimensions

شکل 7 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی به ترتیب 0.20 و 0.45 از فاز 1 (قرمز) و فاز 2 (آبی و 0.35 سبز برای تهی) از فازهای جامد و مدول برشی برابر با 0.0111 در دو بعدی

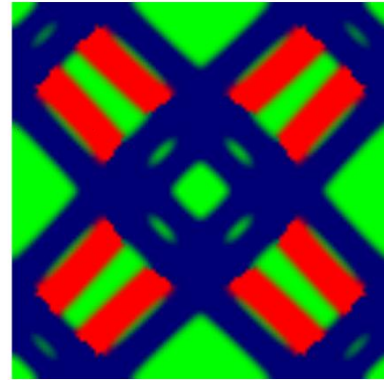


**Fig. 8** The designed microstructure with a volume fraction of 0.15 (red) and 0.50 (blue and 0.35 for the void phase) of phase 1 and phase 2 of solid phases and shear modulus equal to 0.0197 in two dimensions, respectively

شکل 8 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی به ترتیب 0.15 (قرمز) و 0.50 (آبی و 0.35 سبز برای فاز تهی) از فاز 1 و فاز 2 از فازهای جامد و مدول برشی برابر با 0.0197 در دو بعد

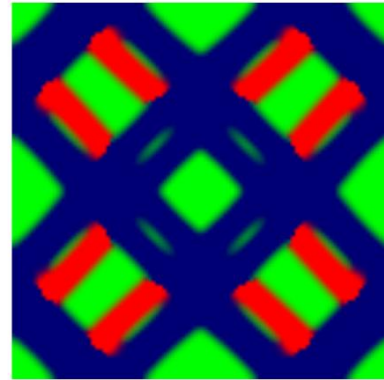
همان طور که از نتایج پیداست، با افزایش درصد حجمی فازهای جامد مدول برشی افزایش می‌یابد، اما برای افزایش درصد حجمی فاز سفت‌تر این خاصیت لزوماً افزایش نمی‌یابد (شکل 7). البته افزایش درصد حجمی فازهای جامد همواره افزایش مدول حجمی را به دنبال دارد، چرا که توزیع همه آن روی کل چینش ریزساختار و تانسور سازنده همگن‌سازی شده تاثیر مستقیم دارد، اما برای درصد حجمی فاز سفت‌تر به طور قطع نمی‌توان این ادعا را طرح کرد.

با دقت در نتایج به دست آمده به وضوح می‌بینیم که افزایش درصد حجمی فازهای جامد عموماً به افزایش خاصیت مورد نظر تابع هدف منجر می‌شود و البته می‌توان حتی عنوان کرد که افزایش درصد حجمی فاز سفتی آن نسبت به فازهای دیگر بیشتر است، تاثیر بیش‌تری نیز دارد. البته در این باره ممکن است نمونه یا نمونه‌هایی بر رد این ادعا وجود داشته باشد مانند شکل 5 در مقایسه با شکل 4، که البته در همان شکل 5 نیز دارای تقارن کامل و ماتریس متقارنی نیست و می‌توان آن را ساختاری نه‌چندان مطلوب دانست. شایان ذکر است که در طراحی ریزساختار ما آزادی عمل مطلق در انتخاب فازها



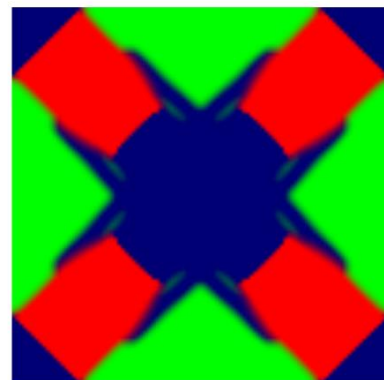
**Fig. 4** The designed microstructure with a volume fraction of 0.2 and 0.55 respectively of phase 1 (red) and phase 2 (blue and 0.25 green representative of the void phase) of solid phases and a shear modulus equal to 0.0222

شکل 4 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی به ترتیب 0.2 و 0.55 از فاز 1 (قرمز) و فاز 2 (آبی، و 0.25 سبز نماینده فاز تهی) از فازهای جامد و مدول برشی برابر با 0.0222



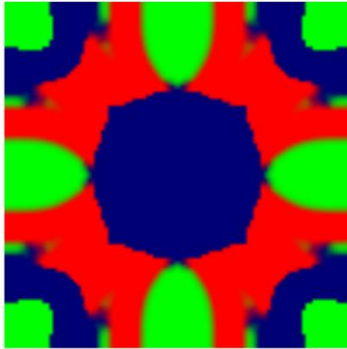
**Fig. 5** the designed microstructure with volume percentage of 0.15 and 0.60, respectively, of phase 1 (red) and phase 2 (blue and green representing the void phase) of solid phases and shear modulus equal to 0.0330 in two dimensions

شکل 5 ریزساختار طراحی شده با درصد حجمی به ترتیب 0.15 و 0.60 از فاز 1 (قرمز) و فاز 2 (آبی و سبز نماینده فاز تهی) از فازهای جامد و مدول برشی برابر با 0.0330 در دو بعد



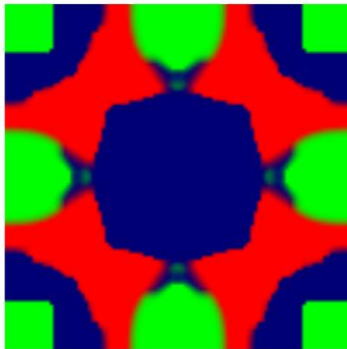
**Fig. 6** The designed microstructure with a volume fraction of 0.325 of phase 1 (red) and phase 2 (green and 0.35 blue for the void phase) of solid phases and a shear modulus equal to 0.0209 in two dimensions.

شکل 6 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی 0.325 از فاز 1 (قرمز) و فاز 2 (سبز و 0.35 آبی برای فاز تهی) از فازهای جامد و مدول برشی برابر با 0.0209 در دو بعد



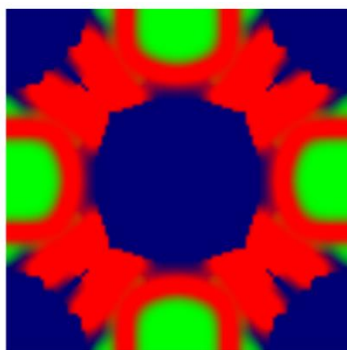
**Fig. 9** The designed microstructure with a volume fraction of 0.375 of phase 1 (red) and phase 2 (blue and 0.25 green for the void phase) of the solid phases and the volume modulus (bulk) is equal to 0.2553 in two dimensions and 0.1910 in three dimensions

شکل 9 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی 0.375 از فاز 1 (قرمز) و فاز 2 (آبی) و 0.25 سبز برای فاز تهی) از فازهای جامد و مدول حجمی (بالک) برابر با 0.2553 در دو بعد و 0.1910 در سه بعد



**Fig. 10** The designed microstructure with a volume fraction of 0.35 (red) and 0.40 (blue and 0.25 for the void phase) of phase 1 and phase 2 of the solid phases and volume modulus equal to 0.2798 in two dimensions and 0.1965 in three dimensions, respectively

شکل 10 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی به ترتیب 0.35 (قرمز) و 0.40 (آبی) و 0.25 سبز برای فاز تهی) از فاز 1 و فاز 2 از فازهای جامد و مدول حجمی برابر با 0.2798 در دو بعد و 0.1965 در سه بعد



**Fig. 11** The designed microstructure with a volume fraction of 0.425 of phase 1 (blue) and phase 2 (red and 0.15 green for the void phase) of solid phases and a volume modulus equal to 0.3679 in two dimensions and 0.2915 in three dimensions

شکل 11 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی 0.425 از فاز 1 (آبی) و فاز 2 (قرمز) و 0.15 سبز برای فاز تهی) از فازهای جامد و مدول حجمی برابر با 0.3679 در دو بعد و 0.2915 در سه بعد

و به ویژه درصد حجمی هایشان نداریم و این امر تا حدی امری تجربی و تکنیکی انگاشته می‌شود. چه این که در طراحی ریزساختار دو بعدی چند فازی با نسبت پواسون منفی با ابتکارهایی نه‌چندان مانوس باز هم به هدف مورد نظر منجر نگشت. شایان توجه است که ریزساختارهای به دست آمده در این روش با استفاده از شعاع فیلتر 5 و یا 6 و ضریب جبران‌سازی 5 و یا غالباً 6 انجام گرفته است که به هیچ صورت به این معنی نیست که این بیش‌ترین مقدار تابع هدف طی این شرایط خواهد بود. چه این که در [7] مقدار یک تابع هدف با استفاده از دو ضریب جبران‌سازی متفاوت به دست آمده است که البته تفاوت اندکی در آن مقدار دارند قابل چشم‌پوشی است.

### 2-3- بهینه‌سازی مدول حجمی (بالک)<sup>1</sup>

به منظور بهینه‌سازی مدول حجمی می‌بایست هم‌زمان مدول الاستیسیته موثر و نسبت پواسون موثر ریزساختار بهینه شود. برای بهینه‌سازی مدول حجمی تابع هدفی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$Max. Bulk = \left( \frac{Q(1,1) + Q(2,2) + Q(1,2) + Q(2,1)}{2} \right) \quad (10)$$

نتایج فرآیند بهینه‌سازی مدول حجمی برای ریزساختار سه بعدی چندفازی در حالت درصدهای حجمی مختلف در شکل‌های 9 تا 12 ارائه شده است. این شکل‌ها بهینه را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل‌های 9 تا 12 مشاهده می‌شود، این مجموعه از نتایج با لحاظ سه نکته گردآوری شده‌اند؛ نخست آن که می‌بایست در موقع دریافت نتیجه نهایی درصد حجمی فازهای شرکت‌کننده در فرآیند همگن و بهینه‌سازی با درصد حجمی تعیین شده در آغاز فرآیند نباید تفاوت زیادی داشته باشد. دوم این که فازهای تشکیل شده در هر شکل به سهولت قابل تفکیک و از همه مهم‌تر به تعداد فازها تفاوت رنگی دیده شود که این ناشی از ماتریس درصدهای حجمی بزرگی است که یکی از تابع‌های فرآیند کدنویسی را شامل می‌شود. سوم این که تانسور الاستیسیته همگن‌سازی شده با تانسور الاستیسیته یک ماده ارتوتروپیک منطبق باشد یعنی که نه صفحه تقارن و سه ثابت مستقل در تانسور الاستیسیته‌شان داشته باشند که در تانسورهای ارائه شده قابل تصدیق است. نکته‌ای شایان گفتن است که جابه‌جایی ترکیب رنگی فازهای تشکیل دهنده است که باید برای توضیح آن معیار در این حالت ماتریس درصد حجمی نهایی و همگن شده است نه رنگ فازها، البته با حس مهندسی و شماتیک نیز قابل تشخیص است که کدام فازها با توجه به درصد حجمی‌شان متعلق به کدام رنگ هستند.

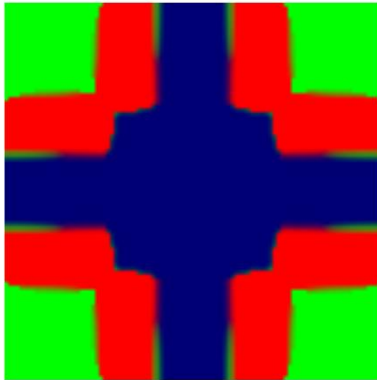
### 3-3- بهینه‌سازی سفتی محوری<sup>2</sup>

طی این مرحله از تحقیق نتایج بهینه‌سازی سفتی محوری در حالت دو بعدی ریزساختار چندفازی به نمایش گذارده می‌شود. طبیعی است در این بخش باید تابع هدف به منظور حصول نتیجه در حالت دو بعدی پیاده‌سازی شود. مطابق رابطه‌ای که در زیر می‌آید مجموع دو تانسور<sup>3</sup> ماتریس همگن‌سازی شده الاستیسیته می‌بایست بهینه شود.

$$Max. Axial. Stiff. = (Q(1,1) + Q(2,2)) \quad (11)$$

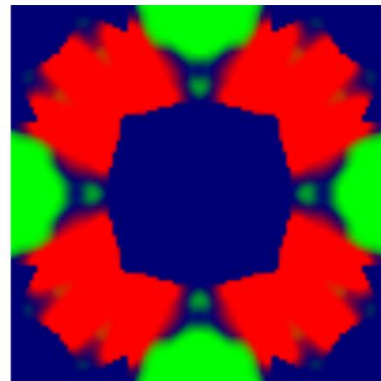
1. bulk  
2. Axial stiffness

3. tensor



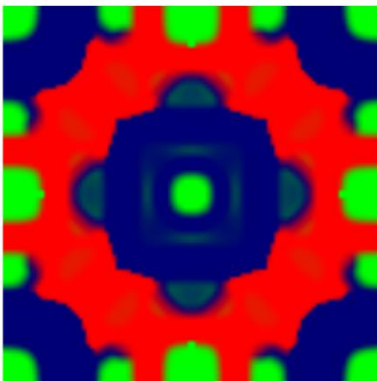
**Fig. 14** The designed microstructure with a volume fraction of 0.35 (red) and 0.40 (blue and 0.25 for the void phase) of phase 1 and phase 2 of solid phases and axial stiffness equal to 0.2966 in two dimensions

شکل 14 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی به ترتیب 0.35 (قرمز) و 0.40 (آبی) و 0.25 سبز برای فاز تهی (از فاز 1 و فاز 2 از فازهای جامد و سفتی محوری برابر با 0.2966 در دو بعد



**Fig. 12** The designed microstructure with a volume fraction of 0.40 (red) and 0.45 (blue and 0.15 void for green) of phase 1 and phase 2 of solid phases and volume modulus equal to 0.5083 in two dimensions and 0.3008 in three dimensions

شکل 12 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی به ترتیب 0.40 (قرمز) و 0.45 (آبی) و 0.15 تهی برای سبز (از فاز 1 و فاز 2 از فازهای جامد و مدول حجمی برابر با 0.5083 در دو بعد و 0.3008 در سه بعد

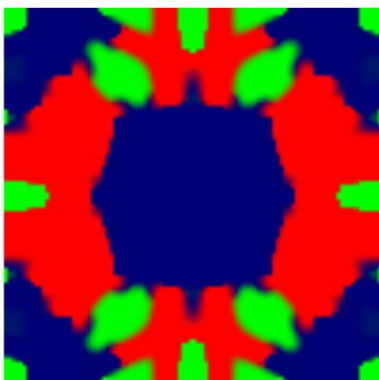


**Fig. 15** The designed microstructure with a volume fraction of 0.425 of phase 1 (red) and phase 2 (blue and 0.15 green for the void phase) of solid phases and axial stiffness equal to 0.2767 in two dimensions and 0.3359 in three dimensions

شکل 15 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی 0.425 از فاز 1 (قرمز) و فاز 2 (آبی) و 0.15 سبز برای فاز تهی (از فازهای جامد و سفتی محوری برابر با 0.2767 در دو بعد و 0.3359 در سه بعد

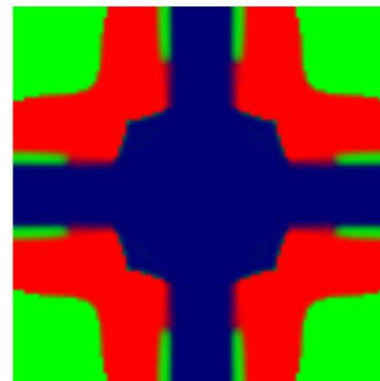
سعی شده است در این قسمت برای درصدهای حجمی مختلف و البته ممکن گردآوری شود. در هر قسمت از نمونه‌گیری درصدهای حجمی بر مبنای وجود ماده و تغییرات در فازهای مادی و صرف نظر از فاز تهی (حفره<sup>1</sup>) صورت گرفته است.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی سفتی محوری برای طراحی ریزساختار متناوب در شکل‌های 13 تا 16 آمده است که در آن‌ها سفتی محوری تابع هدف لحاظ شده است که همان‌طور که اشاره شد ترتیب جاگذاری فازها در مواردی به جابه‌جایی نیاز پیدا کرده است تا هم‌گرایی حاصل و تقارن ماتریس سازنده تامین شود.



**Fig. 16** The designed microstructure with a volume percentage of 0.40 of phase 1 (red) and 0.45 (blue and 0.15 green for the void phase) of phase 2 of solid phases and axial stiffness equal to 0.2944 in two dimensions

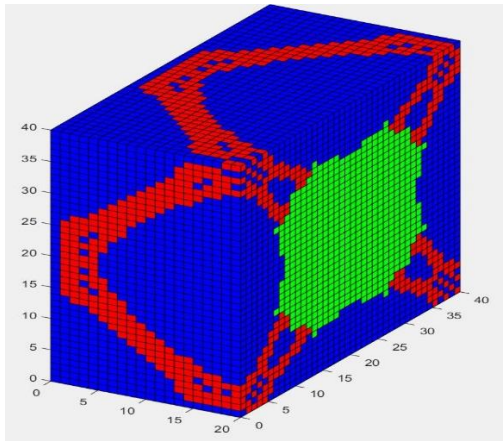
شکل 16 ریزساختار طراحی شده با درصد حجمی 0.40 از فاز 1 (قرمز) و 0.45 (آبی) و 0.15 سبز برای فاز تهی (از فازهای جامد و سفتی محوری برابر با 0.2944 در دو بعد



**Fig. 13** The designed microstructure with a volume fraction of 0.375 of phase 1 (red) and phase 2 (blue and 0.25 green for the void phase) of solid phases and axial stiffness equal to 0.2889 in two dimensions and 0.3062 in three dimensions

شکل 13 ریزساختار طراحی شده با کسر حجمی 0.375 از فاز 1 (قرمز) و فاز 2 (آبی) و 0.25 سبز برای فاز تهی (از فازهای جامد و سفتی محوری برابر با 0.2889 در دو بعد و 0.3062 در سه بعد

1. void



**Fig. 17** The designed microstructure with volume percentage of 30 of phase 2 and 20 of phase 1 of solid phases and volume modulus equal to 0.7264 (Hashin-Shtrikman criterion: 0.7869)

شکل 17 ریزساختار طراحی شده با درصد حجمی 30 از فاز 2 و 20 از فاز 1 از فازهای جامد و مدول حجمی برابر با 0.7264 (معیار هشین-اشتریکمان: 0.7869)

روش به کار برده شده برای طراحی از آن چنان دقتی برخوردار است که تنها کمتر از 7٪ با معیار هشین-اشتریکمان تفاوت دارد.

این الگو (معیار هشین-اشتریکمان) برای محاسبه مدول حجمی (بالک) ریزساختاری که تقارن مکعبی دارد (مانند ریزساختارهایی که در بالا ارائه شد) به ترتیب زیر نگاشته می‌شود:

$$K_{max}^{HS} = \frac{1}{\frac{\rho^1}{K^1+4/3G_{max}} + \frac{\rho^2}{K^2+4/3G_{max}} + \frac{\rho^3}{K^3+4/3G_{max}}} \quad (13)$$

به طوری که مقدار  $G_{max}$  از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$G_{max} = \frac{E_{max}}{2(1+\nu)} \quad (14)$$

در رابطه بالا صورت کسر سفتی بیشینه است و  $\nu$  نسبت پواسون همان است، که برای حل مسئله 0.3 فرض می‌شود.

### 5- نتیجه‌گیری

طی این فرآیند تحقیق و تحلیل دست‌یابی به خواص بهینه مکانیکی مدول برشی، حجمی و سفتی محوری مورد مطالعه قرار گرفت. و مدول برشی (=0.7264) ریزساختار با دقتی بالا نسبت به معیار هشین-اشتریکمان (=0.7869) منتج شد. به علاوه امکان‌سنجی دسترسی به ضریب پواسون منفی با تابع هدفی که ژیا معرفی کرده است مورد چالش واقع شد. این الگوریتم طراحی ریزساختار به محققان امکان می‌دهد که بتوانند مواد و ساختارهای دلخواه را با اعمال توابع هدف گوناگون دست‌یافتنی‌تر بدانند. همچنین می‌توان با الگوریتم زیر توابع هدفی جدید را برای ساختارهای جدید مورد آزمون و خطا و حتی ابداع قرار دهند.

**جدول 1** نتایج بهینه‌سازی ریزساختاری

**Table 1** Microstructural optimization results

مقدار عددی خاصیت مکانیکی بهینه شده	درصد حجمی فاز 1 و فاز 2 (به ترتیب)	خاصیت مکانیکی
0.2291	(37.5 و 37.5)	مدول برشی
0.2689	(55 و 20)	مدول برشی
0.3319	(60 و 15)	مدول برشی
0.1580	(32.5 و 32.5)	مدول برشی
0.1522	(45 و 20)	مدول برشی
0.2004	(50 و 15)	مدول برشی
0.1910	(37.5 و 37.5)	مدول حجمی (بالک)
0.1965	(40 و 35)	مدول حجمی (بالک)
0.2915	(42.5 و 42.5)	مدول حجمی (بالک)
0.3008	(45 و 40)	مدول حجمی (بالک)
0.3062	(37.5 و 37.5)	سفتی محوری
0.3270	(40 و 35)	سفتی محوری
0.3359	(42.5 و 42.5)	سفتی محوری
0.4447	(45 و 40)	سفتی محوری

با بررسی نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی سفتی محوری این امر مشهود است که با افزایش درصد حجمی کل، سفتی محوری نیز افزایش می‌یابد؛ چرا که توزیع همه آن روی کل چینش ریزساختار و تانسور سازنده همگن‌سازی شده تاثیر مستقیم دارد، اما برای درصد حجمی فاز سفت‌تر به طور قطع نمی‌توان این ادعا را طرح کرد.

واضح است که نتایج درصد حجمی کم‌تر از 75٪ که آورده نشده به این دلیل است که ریزساختارهایی با آن مشخصات برای نمونه 65٪ فاز جامد برای بهینه‌سازی سفتی محوری تشکیل نشده است. البته بر خلاف شکل 7 که برای مدول حجمی یک عدم پیوستگی در نتایج پدید آمده بود، خوش‌بختانه در این جا حتی با نبود ریزساختارهایی کم‌تر از 75٪ فاز جامد، این عدم پیوستگی دیده نمی‌شود و پیوسته با افزایش درصد حجمی کلی و هم‌چنین فاز 2، سفتی محوری نیز افزوده می‌شود (جدول 1).

### 4- اعتبارسنجی

به منظور پیگیری کارایی و اعتبار روش مورد استفاده، ریزساختاری را در فضای سه بعدی طراحی شد (شکل 17) تا بتوان آن را با الگویی به نام هشین-اشتریکمان<sup>1</sup> که مورد ارجاع است. تطبیق داد. این طراحی حداقل می‌بایست یک المان 40تایی متقارن باشد و البته شدت و زمان محاسبات را چندین برابر می‌کند. به علاوه با توجه به حجم سنگین محاسباتی که این طراحی سه بعدی به دنبال داشت و انتظار می‌رفت که در ماتریس سازنده احیانا عدم تقارن‌هایی (هر چند بسیار نزدیک به صفر) مشاهده شود اما همان‌گونه که در رابطه 12 دیده می‌شود کاملا تقارن دارد.

$$[E^H]_{50\%(30\%-20\%)} = \begin{bmatrix} 0.7546 & 0.3379 & 0.3379 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.3379 & 0.7546 & 0.1748 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.3379 & 0.1748 & 0.7546 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.3171 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.3171 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.3171 \end{bmatrix} \quad (12)$$

1 Hashin-Shtrikman (HS)

- [16] Hassani B, Hinton E (1998) A review of homogenization and topology optimization II—analytical and numerical solution of homogenization equations. *Comput Struct* 69(6):719–738
- [17] Xia L, Breitkopf P (2015) Design of materials using topology optimization and energy-based homogenization approach in Matlab. *Struct Multidiscip Optim* 52(6):1229–1241
- [18] Bendsøe MP, Sigmund O (1995) Optimization of structural topology, shape, and material, vol 414. Springer

## 6- فهرست علائم

Q	مجموع انرژی‌های متقابل المان‌ها ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$E^H$	تانسور الاستیسیته همگن شده
rf	عدد شعاع فیلتر
u	جاب‌جایی
r	باقی‌مانده درصد حجمی
q	ضریب جبران‌ساز
p	فاز
N	تعداد المان

## علائم یونانی

$\rho$	درصد حجمی
$\varepsilon$	کرنش
$\Omega$	حجم المان ( $\text{m}^3$ )

## 7- مراجع

- [1] Fu Y-F, Rolfe B, Chiu LN, Wang Y, Huang X, Ghabraie K (2019) Design and experimental validation of self-supporting topologies for additive manufacturing. *Virtual Phys Prototyp* 14(4):382–394.
- [2] Liu J, Gaynor AT, Chen S, Kang Z, Suresh K, Takezawa A, Li L, Kato J, Tang J, Wang CC (2018) Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Struct Multidiscip Optim* 57(6):2457–2483
- [3] Osanov, Mikhail, and James K. Guest. "Topology Optimization for Architected Materials Design." *Annual Review of Materials Research* 46 (2016): 211-233.
- [4] Nkansah, M.A., Evans, K.E. and Hutchinson, I.J.. Modelling the mechanical properties of an auxetic molecular network(1994).
- [5] Fujii D, Chen BC, Kikuchi N (2001).
- [6] Wu CH, Tseng KY Topology optimization of structures using modified binary differential evolution. *Struct Multidisc Optim* 42:939–953(2010)
- [7] Sigmund, O. Tailoring Materials with Prescribed Elastic Properties(1995).
- [8] Wang, Yu. "Topological shape optimization of microstructures materials using level set methods." PhD diss., 2015.
- [9] Xia, Liang, and Piotr Breitkopf. "Design of materials using topology optimization and energy-based homogenization approach in Matlab." *Structural and multidisciplinary optimization* 52, no. 6 (2015): 1229-1241.
- [10] M. P. Bendsøe, O. Sigmund. "Material interpolation schemes in topology optimization". *Archive of Applied Mechanics* 69 (1999) 635–654 Springer-Verlag 1999
- [11] Ghabraee, K. "Optimizing the topology of plate structures using the SIMP method and removing checkered areas by stress and strain smoothing" *Journal of Technical Faculty of Tehran University*(2007)
- [12] O. Sigmund (2001) A 99 line topology optimization code written in matlab. *Struct Multidiscip Optim* 21(2):120–127
- [13] R Tavakoli, SM Mohseni - ALTERNATING ACTIVE-PHASE ALGORITHM FOR MULTIMATERIAL TOPOLOGY OPTIMIZATION PROBLEMS A 115-LINE MATLAB IMPLEMENTATION, 2014
- [14] Bendsoe MP, Sigmund O (2013) Topology optimization: theory, methods, and applications. Springer Science & Business Media, Berlin
- [15] Hassani B, Hinton E (1998) A review of homogenization and topology optimization I—homogenization theory for media with periodic structure. *Comput Struct* 69(6):707–717



## بررسی تجربی عملکرد تیرهای بتنی مقیاس و تقویت شده به روش تقویت نصب در نزدیک سطح با کامپوزیت های FRP تحت بارگذاری ضربه ای متوالی

امیرعلی حسین نیا<sup>1</sup>، محمد زمان کبیر<sup>2\*</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-4413، mzkabir@aut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/12/15

پذیرش: 1403/04/20

### کلیدواژگان

تیر بتن آرمه،

کامپوزیت

روش نصب در نزدیک سطح،

بارگذاری ضربه با سرعت پایین

در این تحقیق، مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی عملکرد تیرهای بتنی تقویت شده با مصالح کامپوزیتی به روش تقویت نصب در نزدیک سطح صورت گرفته است. در این روش جدایش کامپوزیت به تعویق افتاده و این مصالح کمتر در برابر شرایط محیطی نامناسب قرار می گیرند. در این پژوهش، پس از دستیابی به طرح اختلاط مناسب برای بتن و انجام آنالیز ابعادی به منظور مقیاس نمودن نمونه های آزمایشگاهی، شش نمونه تیر بتنی ساخته شد. این شش نمونه به دو گروه تقسیم شده و یک گروه تحت بارگذاری ضربه با سرعت پایین و گروه دیگر تحت بارگذاری خمشی استاتیکی قرار گرفتند. در هر گروه یک نمونه کنترل بدون تقویت در نظر گرفته شده است. همچنین دو عدد از تیرها با استفاده از میلگرد کامپوزیتی شیشه و دو عدد دیگر با استفاده از صفحات کامپوزیتی کربن تقویت شده اند. طبق نتایج، تیرهای تقویت شده با صفحات کربن و آرماتور کامپوزیتی شیشه به ترتیب 15.3٪ و 24.7٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت خمشی را تحت بارگذاری خمشی استاتیکی تجربه نمودند. علاوه بر این، میزان تغییر مکان حداکثر این نمونه ها در وسط دهانه تحت بارگذاری ضربه به ترتیب 23.36٪ و 40٪ کاهش یافته است. بر این اساس، می توان نتیجه گیری کرد که تیرهای بتنی تقویت شده با مصالح کامپوزیتی به روش تقویت نصب در نزدیک سطح عملکرد مطلوبی را تحت بارگذاری های استاتیکی و دینامیکی از خود نشان می دهند.

## Experimental performance assessment of scaled-down FRP-retrofitted reinforced concrete beams under consecutive low-velocity impact loading using near surface mounted method

Amirali Hosseinnia<sup>1</sup>, Mohammad Zaman Kabir<sup>1\*</sup>

1- Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, mzkabir@aut.ac.ir

### Keywords

Reinforced concrete beam,  
FRP composites,  
Near Surface Mounted method,  
Low-velocity impact loading

### Abstract

In this research, experimental and numerical studies have been conducted to investigate the performance of concrete beams reinforced with FRP materials using the Near Surface Mounted (NSM) reinforcement method. In this method, the separation of FRP is delayed, and these materials are less exposed to adverse environmental conditions. In this study, after achieving a suitable mix design for concrete and performing dimensional analysis for scaling laboratory samples, six concrete beam samples were constructed. These six samples were divided into two groups, one subjected to low-velocity impact loading and the other to static bending loading. In each group, a control sample without reinforcement was considered. Additionally, two of the beams were reinforced using GFRP rebars, and the other two were reinforced with CFRP composite plates. According to the results, the beams reinforced with CFRP plates and GFRP rebars experienced an increase in flexural strength by 15.3% and 24.7%, respectively, compared to the control sample under static bending loading. Furthermore, the maximum displacement of these samples at the mid-span under impact loading decreased by 23.36% and 40%, respectively. Also, due to the increased stiffness of the FRP-reinforced samples, the acceleration at the center of the span in these beams significantly increased compared to the control sample. Based on this, it can be concluded that concrete beams reinforced with FRP materials using the NSM method show satisfactory performance under static and dynamic loading.

Please cite this article using:

Hosseinnia, A., Kabir, M. Z., "Experimental performance assessment of scaled-down FRP-retrofitted reinforced concrete beams under consecutive low-velocity impact loading using near surface mounted method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2401-2407, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2024091.1878>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

آمار قابل توجه خسارت‌های جانی و مالی ناشی از عملکرد نامناسب سازه‌های موجود، اهمیت موضوع مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح را دوچندان کرده است. از مهم‌ترین دلایل مقاوم‌سازی و تقویت سازه‌های بتن مسلح می‌توان به زوال بتن، خوردگی آرماتورها، قدیمی شدن سازه‌های بتنی، به روز شدن آیین‌نامه‌ها، نواقص اجرایی و طراحی، تغییر کاربری و وقوع حوادث غیرقابل پیش‌بینی مانند زلزله‌های شدید اشاره نمود.

یک روش بسیار کارآمد برای بهبود ظرفیت باربری سازه‌های بتن مسلح موجود، استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف<sup>1</sup> می‌باشد. این مواد از قرار دادن الیاف داخل ماتریس رزین ساخته می‌شوند که هر بخش از اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت‌ها، دارای خواص مکانیکی ویژه‌ای می‌باشد [1]. طی سال‌های اخیر، استفاده از این مصالح به عنوان روش جایگزین سایر تکنیک‌های مقاوم‌سازی مرسوم مورد توجه بسیاری از مهندسين قرار گرفته است. مقاومت در برابر خوردگی، نسبت مقاومت به وزن بالا، عدم افزایش قابل توجه بار مرده سازه و دوام بالا از مهم‌ترین مزایای این مصالح می‌باشند [2].

تحقیقات گسترده‌ای در سراسر جهان بر روی روش مقاوم‌سازی تسلیح خارجی<sup>2</sup> به وسیله کامپوزیت صورت گرفته است که در آن این مصالح توسط رزین اپوکسی به وجه کششی عضو بتنی متصل می‌شوند. در این روش، احتمال جداشدگی زودرس ورق‌های کامپوزیتی وجود داشته و این مصالح در معرض شرایط زیست‌محیطی نامناسب مانند خوردگی و تغییرات دما قرار دارند. به منظور جبران معایب روش تسلیح خارجی، روش مقاوم‌سازی نصب در نزدیک سطح<sup>3</sup> معرفی گردید. در سال 2004، ال‌هاجا و ریزکالا [3] در تحقیقی عملکرد تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده به روش تقویت نصب در نزدیک سطح و تسلیح خارجی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش هشت عدد تیر T شکل با تکیه‌گاه‌های ساده تحت بارگذاری خمشی قرار گرفته‌اند. یکی از نمونه‌ها به منظور کنترل بدون هیچ تقویتی ساخته شده و سایر نمونه‌ها با انواع مختلف مصالح کامپوزیتی تقویت‌شده‌اند. در این تحقیق اثر نوع الیاف (شیشه و کربن) و شکل تقویت‌کننده (میلگرد و نوار) و همچنین عملکرد میلگردها و نوارهای کامپوزیتی در این دو روش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، طول اتصال و سفتی محوری تمام میلگردها و نوارهای کامپوزیتی ثابت در نظر گرفته شده است. طبق نتایج، مقاومت نهایی نمونه‌هایی که به روش نصب در نزدیک سطح تقویت‌شده‌اند از 69٪ تا 99٪ افزایش یافته است. از سوی دیگر، استفاده از این روش باعث کاهش خیز و عرض ترک می‌گردد. بدین ترتیب طبق این بررسی، روش تقویت نصب در نزدیک سطح نسبت به تسلیح خارجی مؤثرتر می‌باشد. از سوی دیگر، ژینگ و همکاران [4] در سال 2018 در تحقیقی تیرهای بتنی را با استفاده از میلگردهای پلیمری شیشه و آلومینیوم به روش نصب در نزدیک سطح تقویت کردند. طبق نتایج، با وجود اینکه تیرهای بتنی تقویت‌شده با میلگرد کامپوزیتی شیشه مقاومت خمشی بیشتری را تجربه کرده‌اند، اما تیرهای تقویت‌شده با میلگردهای آلومینیوم رفتار شکل‌پذیرتری را از خود بروز دادند. علاوه بر لزوم بررسی عملکرد اعضای بتنی تقویت‌شده با مصالح کامپوزیتی تحت بارهای استاتیکی، ارزیابی رفتار دینامیکی این اعضا نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به عنوان مثال، عامل اصلی شروع خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها برخورد مصالح طبقات فوقانی بر روی المان‌های سازه‌ای بوده که شناسایی رفتار اعضای سازه‌ای در برابر این برخوردها مهم می‌باشد.

همچنین، حرکت وسایل نقلیه و گاهی برخورد آن‌ها با المان‌های سازه‌ای پل‌ها نمونه‌ای از بار ضربه‌ای می‌باشد. رفتار اعضای بتنی در برابر بارهای آنی مانند ضربه با عملکرد آن‌ها در برابر بارهای استاتیکی متفاوت می‌باشد. این اعضا در برابر این شکل از بارگذاری فرصت تغییر شکل کافی نداشته و عملکرد تردتری را از خود بروز می‌دهند. در این خصوص، ارکی و همکاران [5] رفتار چهار عدد تیر بتنی به طول 8 متر را تحت بار ضربه مورد ارزیابی قرار دادند. در این آزمایش دو عدد از تیرها با صفحات کامپوزیتی کربن و دو تیر دیگر با صفحات فولادی مقاوم‌سازی شده بودند. اعمال بار ضربه در این تحقیق به صورت بلند کردن یک سر تیر و رها کردن آن بوده است. طبق نتایج، با یکسان بودن میزان مقاومت کششی فولاد و کامپوزیت کربن در این تحقیق، تیرهای بتنی تقویت‌شده با صفحات کامپوزیتی با توجه به عدم جذب انرژی مشابه با تیرهای تقویت‌شده با صفحات فولادی، رفتار قابل قبولی را از خود نشان داده‌اند. همچنین، تنگ و سعادت منش [6] در تحقیقی عملکرد تیرهای بتنی بدون آرماتور برشی را تحت بارگذاری ضربه با سرعت پایین مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، از چندلایه‌های کولار و کربن برای تقویت تیرهای بتنی استفاده شده بود. این صفحات به منظور مقاومت در برابر ممان‌های مثبت و منفی در دو وجه فوقانی و تحتانی نمونه‌ها متصل شده بودند. طبق نتایج، تیرهای تقویت‌شده نسبت به تیرهای بدون مقاومت عملکرد بهتری در برابر ضربه از خود نشان داده و تغییرمکان حداکثر نمونه‌های تقویت‌شده با کامپوزیت تحت بار ضربه بین 30٪ تا 40٪ کاهش داشته است. فام و هو [7] نیز عملکرد تیرهای بتنی بدون آرماتور برشی را تحت ضربه و خمش مورد بررسی قرار داده‌اند. تفاوت این تحقیق با پژوهش‌های قبلی بررسی تأثیر آرایش نوارهای کربن بر عملکرد این نمونه‌ها می‌باشد. طبق این تحقیق، دو آرایش U شکل و نوارهای مورب با زاویه 45 درجه به عنوان طرح تقویت برشی تیرهای بتنی در نظر گرفته شدند. طبق نتایج این آزمایش، با ثابت بودن تعداد نوارهای کامپوزیتی کربن، استفاده از آرایش 45 درجه تأثیر بهتری نسبت به آرایش U شکل در زمینه افزایش ظرفیت باربری در برابر بارهای ضربه‌ای دارد. همچنین، امین اکبری و همکاران در سال 2024 در پژوهشی بهبود رفتار تیرهای بتنی ساخته شده با میلگردهای کامپوزیتی شیشه تحت بار ضربه را در کاهش خیز حداکثر و پسماند نسبت به تیرهای بتنی ساخته شده با میلگردهای فولادی اثبات نمودند [8]. یکی دیگر از تحقیقاتی که در آن از بارگذاری خمش استاتیکی و ضربه در کنار هم استفاده شده است مربوط به پژوهش کیشی و همکاران [9] می‌باشد. در این آزمایش، از ورق‌های کربن و آرامید برای مقاوم‌سازی تیرهای بتنی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این آزمایش سفتی محوری کامپوزیت‌ها تا حد امکان برابر در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، با توجه به تقویت خمشی، میزان تغییرمکان حداکثر و پسماند در تیرهای تقویت‌شده به ترتیب 30٪ و 60٪ نسبت به تیر بدون تقویت کاهش یافته است. از طرفی، عملکرد تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح را می‌توان با استفاده از آنالیز عددی پیش‌بینی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود. در این راستا، حسین‌نیا و کبیر [10] با استفاده از تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس این امر را محقق ساختند.

## 2- ضرورت انجام پژوهش و اهداف طرح

با توجه به موارد عنوان شده، تا کنون تحقیقی در زمینه عملکرد تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح تحت بارگذاری ضربه انجام نشده

<sup>3</sup> Near Surface Mounted

<sup>1</sup> Fiber Reinforced Polymers

<sup>2</sup> Externally Bonded Reinforcement

خاموت‌ها مقیاس شده است. همچنین، با توجه به اینکه مصالح استفاده شده در مدل‌های آزمایشگاهی مقیاس شده با مصالح مورد استفاده در صنعت ساختمان تفاوتی نداشته، لذا فرض بر این شد که ضریب مقیاس مصالح معادل واحد نظر گرفته شود. از طرفی، بر اساس آیین‌نامه ژاپن [12]، اگر نسبت مقاومت برشی به مقاومت خمشی یک تیر بتنی از عدد 3 بیشتر باشد، مود شکست تیر بتنی خمشی خواهد بود. با توجه به اینکه تقویت خمشی در این تحقیق مد نظر می‌باشد، لذا نمونه‌های بتنی با توجه به این موضوع و محدودیت‌های آزمایشگاهی طراحی خواهند شد. در شکل 1 نمونه مقیاس شده و نمونه اصلی نمایش داده شده‌اند.

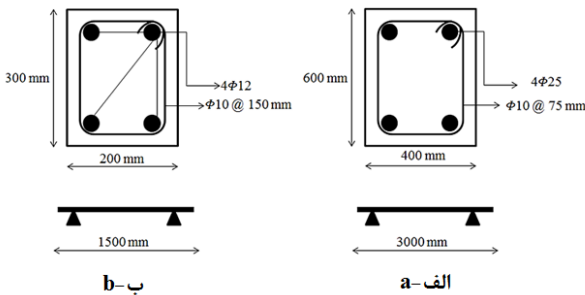


Fig. 1 Cross section of: (a) Prototype; (b) Scaled-down model  
شکل 1 مشخصات هندسی الف) نمونه اصلی و ب) نمونه مقیاس شده

### 2-3- مشخصات مصالح

در این بخش، مصالح مصرفی در این تحقیق معرفی و آزمایش‌های پایه جهت شناسایی رفتار مصالح تشریح خواهند شد. بتن مورد استفاده در این تحقیق بر اساس طرح ملی مخلوط بتن ایران [13] تولید و مقاومت فشاری هدف 25 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. با این وجود، با توجه به دقت وسایل اندازه‌گیری در روز انجام آزمایش‌های سازه‌ای، مقاومت فشاری نمونه استاندارد استوانه‌ای 38.93 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. همچنین، آرماتورهای مصرفی در این پروژه از نوع AII بوده و در دو قطر 10 و 12 میلی‌متر می‌باشند. جهت محاسبه مقاومت تسلیم و مقاومت حدی نهایی این میلگردها، از آزمایش کشش مستقیم بر اساس استاندارد ISO 6935-2 [14] استفاده شده است. در این آزمایش، میلگردها توسط دستگاه یونیورسال با ظرفیت 100 تن در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر مورد آزمایش قرار گرفتند.

سرعت بارگذاری در این آزمایش 15 mm/min تعیین شده است. لازم به ذکر است که از هر قطر آرماتور، دو نمونه مورد آزمایش کشش قرار گرفت و با توجه به نزدیک بودن نتایج تنها نمودار تنش کرنش یکی از نمونه‌ها در این قسمت گزارش شده است.

میزان مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی این میلگردها برای هر گروه از طریق میانگین‌گیری در جدول 1 گزارش شده است.

جدول 1 نتایج آزمون کشش میلگرد

ازدیاد طول (%)	مقاومت نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	قطر میلگرد (mm)
22.59	533.03	344.74	10
12.37	656.83	532.58	12

است. علاوه بر این، به صورت موازی آزمایش‌های خمشی استاتیکی صورت گرفته و مودهای شکست در دو شکل از بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مقایسه خواهند شد.

### 3- مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش به توضیح روند طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی، نحوه مقاوم‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های خمشی و ضربه و تفسیر نتایج آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد.

#### 1-3- آنالیز ابعادی و طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی

شرایطی از جمله محدود بودن فضای آزمایشگاهی، ظرفیت دستگاه‌های بارگذاری و همچنین ملاحظات اقتصادی در اغلب موارد باعث می‌شود تا در مهندسی سازه نتوان نمونه‌ها را در مقیاس واقعی مورد ارزیابی و آزمایش قرار داد. از این رو، باید نمونه‌های مورد آزمایش به صورت مناسب مقیاس شوند. یکی از متداول‌ترین اصول مقیاس نمودن سازه‌ها، استفاده از نظریه باکینگهام<sup>1</sup> می‌باشد. بر اساس این نظریه، هر پدیده فیزیکی را می‌توان بر اساس متغیرهای آن به شکل زیر تعریف نمود.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0 \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $x_1, x_2, \dots, x_k$  متغیرهای فیزیکی مسئله می‌باشند. این رابطه را می‌توان به شکل زیر بازنویسی نمود.

$$g(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{k-r}) = 0 \quad (2)$$

که در آن  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{k-r}$  متغیرهای بدون بعد مسئله می‌باشند. منظور از  $\Gamma$  در رابطه فوق تعداد کمیت‌های اصلی مسئله می‌باشد. این کمیت‌ها شامل زمان، طول و جرم می‌باشند. پارامتر زمان در تحلیل‌های دینامیکی کاربرد داشته و بجای پارامتر جرم می‌توان از پارامتر نیرو استفاده نمود. با توجه به اینکه سه کمیت اصلی طول، جرم و زمان در تمامی متغیرهای اصلی مانند مقاومت فشاری، ارتفاع پرتابه، شتاب و غیره وجود داشته، می‌توان با یک سری عملیات ریاضی ابتدایی به این عبارات‌های بدون بعد دست یافت. بر اساس نظریه باکینگهام، ترم‌های بدون بعد پی در پی در نمونه واقعی و نمونه مقیاس شده باید برابر باشند. از برابری این عبارات می‌توان ضرایب مقیاس مورد نظر را محاسبه نمود. در صورتی که مصالح مورد استفاده در مدل اصلی و نمونه‌های مقیاس شده را یکسان در نظر گرفته شوند، با توجه به یکسان بودن شتاب آزمایش ضرایب مقیاس به شکل زیر خلاصه خواهند شد.

$$S_{W_p} = S_{P_u} = S_{f_p}^2 \quad (3)$$

که در روابط فوق منظور از  $S_{W_p}$  نسبت وزن پرتابه در نمونه اصلی به نمونه مقیاس شده،  $S_{f_p}$  نسبت ارتفاع سقوط پرتابه در نمونه اصلی نسبت به نمونه مقیاس شده و  $S_{P_u}$  نسبت ظرفیت باربری محوری نمونه اصلی به نمونه مقیاس شده می‌باشند. در ادامه با انتخاب ضریب مقیاس هندسی 2 و ضریب مقیاس مصالح 1، مدل اصلی و مدل مقیاس شده به صورت زیر انتخاب خواهند شد. با توجه به آنکه در زمان آماده‌سازی نمونه‌ها، خاموت‌هایی با قطر کمتر از 6 میلی‌متر در بازار موجود نبود، لذا بجای مقیاس کردن قطر خاموت، فاصله میان

<sup>1</sup> Buckingham Pi Theorem

### 3-3- تقویت نمونه‌های آزمایشگاهی به روش نصب در نزدیک سطح

پس از معرفی مصالح مورد استفاده در این تحقیق، در این مرحله به تشریح فرآیند ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی پرداخته خواهد شد. در مجموع شش عدد تیر بتنی برای این پژوهش در نظر گرفته شده است که سه عدد تحت بارگذاری خمش سه محوره و سه عدد تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت پایین قرار خواهند گرفت. تنها تفاوت میان این دو گروه نوع بار اعمال شده می‌باشد. در هر گروه یک عدد نمونه شاهد بدون تقویت در نظر گرفته شده است. نمونه بعدی توسط چندلایه کربن و نمونه آخر توسط میلگرد شیشه به روش تقویت نصب در نزدیک سطح تقویت‌شده‌اند. شکل 4 بیانگر سطح مقطع نمونه‌های آزمایشگاهی و شکل 5 نمایانگر نمونه‌های تقویت‌شده به روش تقویت نصب در نزدیک سطح می‌باشند.

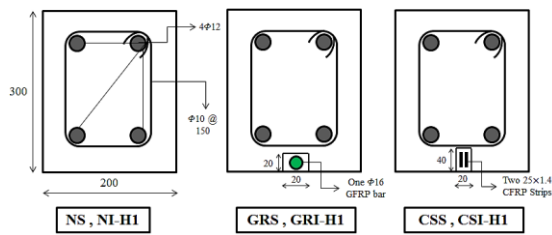


Fig. 4 Cross-sectional shape of test specimens

شکل 4 نمای مقاطع نمونه‌های آزمایشگاهی

از سوی دیگر، شکل 5 نمونه‌های تقویت‌شده به روش تقویت نصب در نزدیک سطح را نمایش می‌دهد.

### 4-4- آزمایش خمش استاتیکی

آزمایش‌های خمش استاتیکی در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر با استفاده از دستگاه بارگذاری تک محوره به ظرفیت 100 تن انجام شده است. نوع بارگذاری به صورت جابجایی کنترل با سرعت 0.004 mm/s بوده و به صورت خمش سه نقطه‌ای به تیرهای بتنی اعمال شده است. خروجی‌های این آزمایش شامل منحنی بار محوری نسبت به تغییرمکان وسط دهانه، الگوهای رشد ترک و میدان کرنش در بتن می‌باشند. شکل 6 پیکربندی آزمایش خمش سه نقطه‌ای را نمایش می‌دهد.

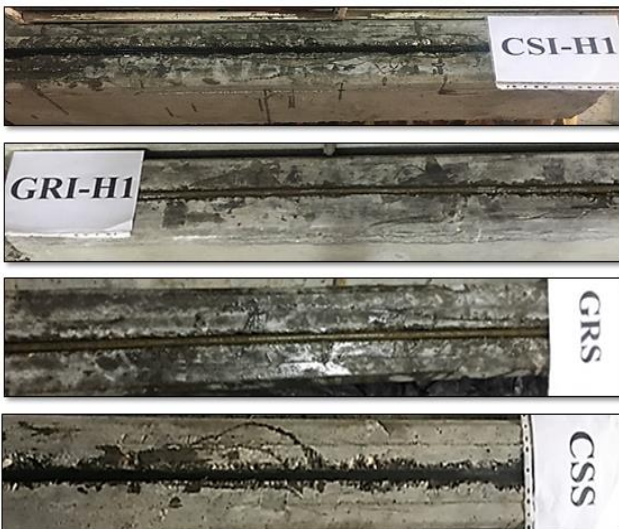


Fig. 5 NSM-retrofitted concrete beams

شکل 5 تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش NSM

به منظور تعیین مشخصات مکانیکی چندلایه‌های کربن، از آزمون کشش مطابق استاندارد [15] ASTM D3039 استفاده شده است. این آزمایش توسط دستگاه یونیورسال با ظرفیت 15 تن در آزمایشگاه کامپوزیت دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه امیرکبیر انجام شده است. سرعت بارگذاری مطابق استاندارد 2 mm/min بوده و از فک پنوماتیکی جهت انجام آزمایش استفاده شده است. با توجه به اطلاعات فنی این محصول، روش ساخت به صورت پالتروژن و کسر حجمی الیاف 60٪ گزارش شده است. ضخامت لایه‌ها 1.4 میلی‌متر بوده و عرض ورق 50 میلی‌متر گزارش شده است. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش کشش دارای طول 300 و عرض 25 میلی‌متر بوده و چهار نمونه مورد آزمایش کشش مستقیم قرار گرفت. با این وجود، با توجه به خرابی زودرس یکی از این چهار نمونه به دلیل عدم تنظیم مناسب دستگاه، نتایج سه نمونه دیگر گزارش شده است. نتایج آزمایش کشش در شکل 2 خلاصه شده است.

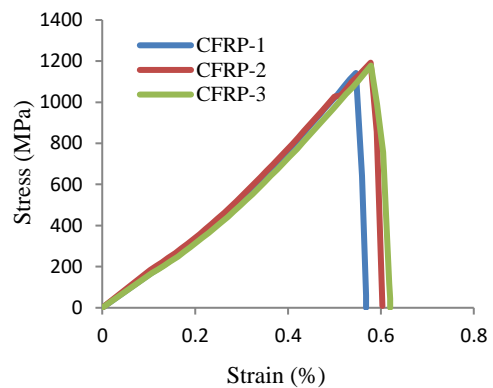


Fig. 2 Stress-strain graph of CFRP

شکل 2 منحنی تنش کرنش CFRP

از طرفی، جهت اندازه‌گیری مقاومت کششی رزین، از استاندارد [16] ASTM D638-14 استفاده شده است. بر این اساس، ترکیب رزین و سخت‌کننده داخل قالب سیلیکونی با ابعاد استاندارد ریخته شده و پس از گذشت 72 ساعت، نمونه‌های دمبلی شکل تحت بارگذاری کششی با سرعت 2 mm/min قرار گرفتند. شکل 3 نمودار تنش کرنش رزین را نمایش می‌دهد. نحوه آماده‌سازی نمونه‌های رزین جهت انجام آزمایش کشش مطابق تحقیق مسائلی و همکاران [17] می‌باشد.

روند مقاوم‌سازی نمونه‌ها به روش تقویت نصب در نزدیک سطح به این صورت می‌باشد که در ابتدا شیاری در وجه کششی تیرهای بتنی ایجاد و پس از تمیز کردن این شیار از گرد و غبار، رزین اپوکسی داخل شیار تزریق و در ادامه مصالح تقویت‌کننده کامپوزیتی درون شیار قرار گرفته و در نهایت تمام شیار با رزین پر می‌شود.

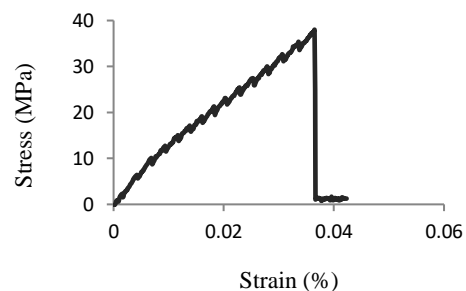


Fig. 3 Stress-strain graph of epoxy

شکل 3 منحنی تنش کرنش رزین

توسط جرثقیل به ارتفاع مورد نظر انتقال داده شده و توسط ضامن به سمت مرکز تیر رها می‌شود. به منظور حفظ راستای برخورد و عدم انحراف از دو پروفیل ناودانی که به صورت عمودی به دستگاه متصل شده‌اند، استفاده شده است. پیکربندی آزمایش ضربه در شکل 9 نمایش داده شده است.

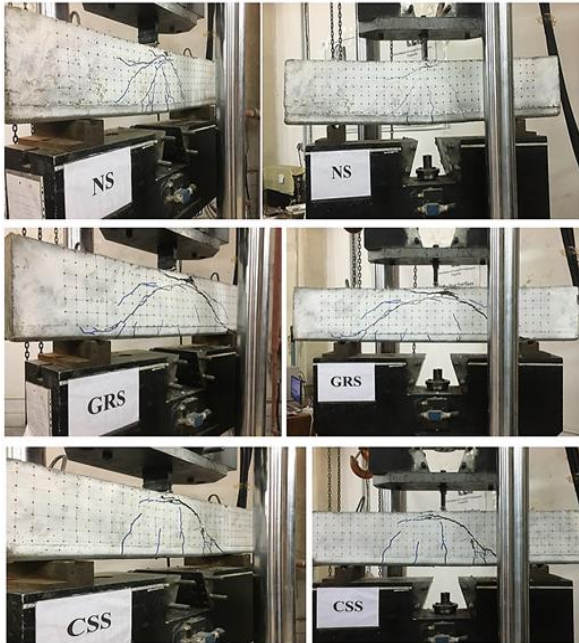


Fig. 8 Failure mode of test specimens under flexural loading

شکل 8 مود گسیختگی نمونه‌های تحت بارگذاری خمشی



Fig. 9 Impact loading test setup

شکل 9 پیکربندی آزمایش ضربه

جهت ثبت میزان تغییرمکان نمونه‌های آزمایشگاهی تحت اثر ضربه، از تغییرمکان‌سنج<sup>1</sup> لیزری و مکانیکی استفاده شده است. تغییرمکان‌سنج لیزری



Fig. 6 Test setup for flexural loading

شکل 6 پیکربندی آزمایش خمشی استاتیکی

از طرفی، شکل 7 نمودار نیرو بر حسب تغییرمکان وسط دهانه را برای نمونه‌های تحت بارگذاری استاتیکی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، میزان ظرفیت باربری محوری نمونه‌های تقویت‌شده با چندلایه کربن و میلگرد شیشه به ترتیب 15.26% و 24.71% نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. از سوی دیگر، وضعیت نهایی نمونه‌های تحت خمشی در شکل 8 نمایش داده شده است. طبق این شکل، مود گسیختگی نمونه شاهد به صورت خمشی بوده که با تقویت خمشی نمونه‌های دیگر، مود شکست از خمشی به برشی تغییر پیدا کرده است.

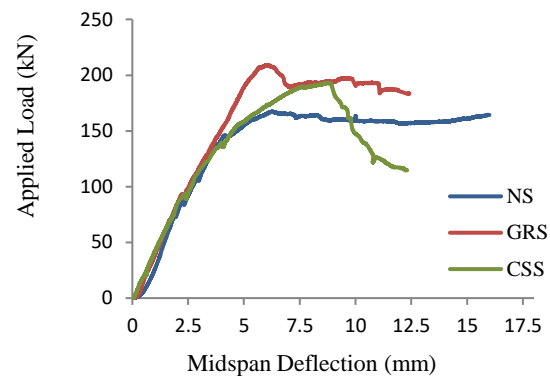


Fig. 7 Load-displacement graph for flexural loading experiment

شکل 7 نمودار نیرو - تغییرمکان آزمایش خمشی استاتیکی

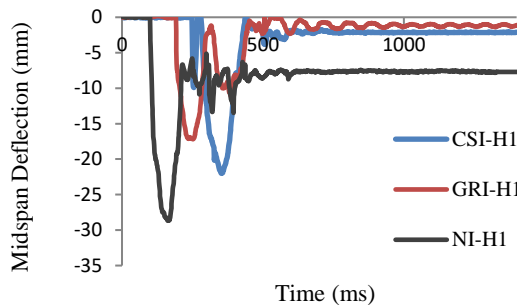
### 5-3- آزمایش ضربه با سرعت پایین

به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی تیرهای بتنی، نمونه‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت پایین قرار گرفته‌اند. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش مشابه نمونه‌های آزمایش خمشی سه نقطه‌ای می‌باشند. تمامی نمونه‌ها دارای شرایط تکیه‌گاهی دو سر ساده می‌باشند. با توجه به استاندارد بارگذاری ضربه [18]، جهت جلوگیری از بلندشدگی تیرها در اثر ضربه و عدم انتقال نیرو به تکیه‌گاه‌ها، دو انتهای نمونه توسط پروفیل‌های ناودانی و پیچ و مهره مقید شده‌اند. علاوه بر این، به منظور ایجاد شرایط مرزی ساده، تیرها بر روی دو غلتک فولادی به قطر 75 میلی‌متر قرار گرفته‌اند. پرتابه مورد استفاده در این آزمایش از جنس فولاد بوده و دارای جرم 150 کیلوگرم می‌باشد. ارتفاع سقوط نیز در تمامی آزمایش‌های ضربه ثابت و برابر با یک متر در نظر گرفته شده است. این پرتابه

<sup>1</sup> Linear Vertical Displacement Transducer

در ادامه نمونه با کد GRI-H1 تحت آزمایش ضربه قرار گرفت. الگوی رشد ترک در این نمونه مشابه نمونه با کد CSI-H1 بوده با این تفاوت که در بتن ناحیه فشاری و در محل اعمال ضربه شاهد خرابی کمتری بوده‌ایم. در مجموع با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، نمونه با کد GRI-H1 عملکرد بهتری را در بین نمونه‌های تحت ضربه از خود نشان داده است.

شکل 12 نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان وسط دهانه تیرهای مورد آزمایش تحت ضربه را نشان می‌دهد. طبق مشاهدات آزمایشگاهی انتظار می‌رفت که نمونه بدون تقویت بیشترین میزان جابجایی حداکثر و پسماند را تجربه کند. میزان تغییرمکان حداکثر و پسماند برای نمونه شاهد به ترتیب برابر  $28.68 \text{ mm}$  و  $7.69 \text{ mm}$  می‌باشد. مقادیر فوق برای نمونه با کد CSI-H1 به ترتیب برابر  $21.98 \text{ mm}$  و  $2.14 \text{ mm}$  و برای نمونه با کد GRI-H1 به ترتیب برابر  $17.19 \text{ mm}$  و  $1.23 \text{ mm}$  می‌باشد. به عبارت دیگر، میزان تغییرمکان حداکثر تیرهای CSI-H1 و GRI-H1 نسبت به نمونه شاهد به ترتیب  $23.36\%$  و  $40\%$  کاهش یافته است.



**Fig. 12** Time histories of displacement under impact loading  
شکل 12 نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان تحت بارگذاری ضربه

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح تحت دو نوع بارگذاری مختلف استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

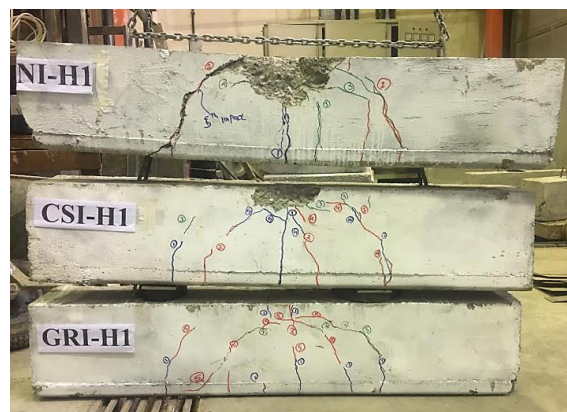
- تحت بارگذاری استاتیکی خمش سه نقطه‌ای میزان مقاومت خمشی تیرهای بتنی تقویت‌شده با استفاده از صفحات کربن نسبت به نمونه بدون تقویت حدود  $15.3\%$  و مقاومت خمشی نمونه تقویت‌شده با میلگرد شیشه نسبت به نمونه شاهد  $24.7\%$  افزایش یافته است.
- میزان خیز حداکثر وسط دهانه در نمونه با کد CSI-H1 تحت اثر ضربه نسبت به نمونه شاهد حدود  $23.36\%$  و این مقدار در نمونه با کد GRI-H1 حدود  $40\%$  نسبت به نمونه بدون تقویت کاهش یافته است.
- با پیشروی در تعداد ضربات، نمونه شاهد تحت اثر پنج ضربه به صورت کامل گسیخته گردید. با این وجود نمونه‌های تقویت‌شده تحت اثر همین پنج ضربه عملکرد به مراتب بهتری را از خود نشان داده‌اند. در این میان، میزان خرابی و ترک در نمونه GRI-H1 نسبت به نمونه CSI-H1 کمتر می‌باشد.
- علیرغم برابر بودن میزان سفتی محوری مصالح کامپوزیتی در نمونه‌های آزمایشگاهی، نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با میلگرد شیشه عملکرد بهتری را نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده با ورق‌های کربن از خود نشان دادند. این موضوع را می‌توان به شکل کامپوزیت نسبت داد، به عبارت دیگر

در قسمت تحتانی و در وسط نمونه‌ها (محل اعمال بار) قرار داده شده است. دقت این نوع از تغییرمکان سنج توسط شرکت سازنده  $2$  میکرومتر گزارش شده است. علاوه بر این، از دو عدد تغییرمکان سنج مکانیکی جهت صحت‌سنجی و کالیبراسیون تغییرمکان لیزری استفاده شده است. همچنین، جهت اندازه‌گیری شتاب وارده به تیرهای بتنی، یک عدد شتاب‌سنج تک‌جهته در مرکز دهانه و ضخامت عضو بتنی نصب شده است. شکل 10 جانمایی حسگرهای اندازه‌گیری تغییرمکان را نشان می‌دهد.



**Fig. 10** Displacement measurement devices  
شکل 10 حس‌گرهای اندازه‌گیری تغییرمکان

اولین آزمایش ضربه مربوط به تیر بدون تقویت می‌باشد. این نمونه مورد برخورد پنج ضربه متوالی از ارتفاع یکسان یک متری قرار گرفته و پس از اعمال پنج ضربه آزمایش به دلیل گسیختگی نمونه متوقف گردید. با توجه به این موضوع، تصمیم بر این شد که دو نمونه تقویت‌شده نیز تحت همین تعداد ثابت ضربه قرار گرفته تا بتوان مقایسه بهتری انجام داد. تحت اعمال بار ضربه ترک‌ها به صورت همزمان از وجه تحتانی تیر و محل برخورد پرتابه آغاز شده و با پیشروی ضربات، در ضخامت نمونه ادامه پیدا می‌کنند که در مورد نمونه بتنی شاهد نیز این موضوع صادق می‌باشد. اولین نوع ترک در اثر اعمال ضربه ترک خمشی بوده و با ادامه یافتن ضربات ترک‌های برشی خمشی نیز ایجاد شدند. الگوی رشد ترک در این نمونه در شکل 11 نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل 11 شماره هر ترک مربوط به شماره ضربه اعمال شده می‌باشد. پس از پایان آزمایش ضربه نمونه شاهد، نمونه با کد CSI-H1 مورد اعمال همان پنج ضربه که باعث گسیختگی نمونه بدون تقویت‌شده بود قرار گرفت. پس از پایان پنج ضربه، میزان گسیختگی بتن فشاری در این تیر نسبت به نمونه بدون تقویت کاهش چشمگیری داشته و همچنین به صورت ظاهری تغییرشکل پسماند این نمونه تحت اثر ضربه کاهش یافته است.



**Fig. 11** Failure mode of test specimens under impact loading  
شکل 11 مود گسیختگی نمونه‌های تحت بارگذاری ضربه

- [17] Masayeli, J., Davar, A., Heydari Beni, M., Eskandari Jam, J., "Experimental and Numerical Study of the Effect of Environmental Conditions on the Tensile Strength of Adhesive, Riveted and Hybrid Joints of E-Glass/Epoxy Composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2273-2296, 2024.
- [18] Standard Test Method for Measuring Relative Resistance of Wall, Floor, and Roof Construction to Impact Loading, Annual Book of ASTM Standard, E 695-03, 2015.

استفاده از آرمتور در مقایسه با شکل چندلایه آن می‌تواند عملکرد بهتری را در تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح باعث شود.

- در مجموع آزمایش‌های ضربه و خمش به دلیل ماهیت روش تقویت نصب در نزدیک سطح هیچ‌گونه جدایش کامپوزیت از بتن مشاهده نگردید.

## 5- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از همکاری سرپرست‌ها و کارکنان آزمایشگاه ملی سازه و آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه امیرکبیر کمال قدردانی را ابراز می‌دارند.

## 6- منابع

- [1] Amirirnejad, A., Kazemirad, S., Shokrieh, M. M., "Evaluation of matrix cracking in cross-ply composites using the finite element simulation of guided Lamb wave propagation," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2257-2265, 2024.
- [2] Ghasemi, P., Kazemirad, S., "Nondestructive evaluation of corrosion in pipes with composite coating with the finite element simulation of guided wave propagation," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2312-2319, 2024.
- [3] El-Hacha, R. and Rizkalla, S., "Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures," ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 5, pp. 717-726, 2004.
- [4] Xing, G., Chang, Z., and Ozbulut, O. E., "Behavior and failure modes of reinforced concrete beams strengthened with NSM GFRP or aluminum alloy bars," Structural Concrete, Vol. 19, No. 4, pp. 1023-1035, 2018.
- [5] Erki, M. A. and Meier, U., "Impact Loading of Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates," Journal of Composites for Construction, Vol. 3, No. 3, pp. 117-124, 1999.
- [6] Tang, T. and Saadatmanesh, H., "Behavior of concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer laminates under impact loading," Journal of Composites for Construction, Vol. 7, No. 3, pp. 209-218, 2003.
- [7] Pham, T. M. and Hao, H., "Impact Behavior of FRP-Strengthened RC Beams without Stirrups," Journal of Composites for Construction, Vol. 20, No. 3, pp. 1-13, 2016.
- [8] Aminakbari, N., Kabir, M. Z., Rahai, A., and Hosseinnia, A., "Experimental and numerical evaluation of GFRP-reinforced concrete beams under consecutive low-velocity impact loading," International Journal of Civil Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 145-156, 2024.
- [9] Kish, N., Komuro, M., Kawarai, T., and Mikami, H., "Low-Velocity Impact Load Testing of RC Beams Strengthened in Flexure with Bonded FRP Sheets," Journal of Composites for Construction, Vol. 24, No. 5, pp. 1-10, 2020.
- [10] Hosseinnia, A., and Kabir, M. Z., "Evaluation of ultimate strength and damage progress of strengthening RC beams using NSM technique under low-velocity impact loading," Composites Part C: Open Access, Vol. 13, pp. 1-15, 2024.
- [11] Harris, H. G. and Sabnis, G., "Structural modeling and experimental techniques" CRC press, 1999.
- [12] Standard specification for concrete structures, Japon Society of Civil Engineers (JSCE), 2007.
- [13] The national method for concrete mix design (3rd edition), Road, housing and urban development research center, 2017 (In Persian).
- [14] Steel for the Reinforcement of Concrete, Part 2: Ribbed bars (ISO 6935-2), International Organization for Standardization, 1991.
- [15] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, D 3039, 2000.
- [16] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, D 638-14, 2015.



## بررسی نظری و تجربی استحکام رشته نانوکامپوزیتی

رهام رفیعی<sup>1\*</sup>، هیراد اموحاجی<sup>2</sup>

1-استاد، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، کد پستی 14399-57131، Roham.Rafiee@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/12/21

پذیرش: 1403/03/30

### چکیده

در این مقاله به بررسی استحکام رشته تولیدشده به روش اکستروژن پرداخته شده است. برای این منظور نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از ABS و نانولوله کربن به عنوان رشته نانوکامپوزیت قابل چاپ در چاپگر سه‌بعدی تولید گردید. ابتدا، با ترکیب ذرات نانو و ABS، رشته نانوکامپوزیتی تولید و استحکام آن‌ها اندازه‌گیری شد. به منظور پیش‌بینی استحکام رشته، مدل چندمقیاسی مناسب توسعه داده شد. مدل مذکور از مقیاس میکرو آغاز گشته و پس از گذار از مقیاس میانی مزو به مقیاس نهایی ماکرو ختم شده است. برای هر مقیاس، المان حجمی معرف مناسب تعریف و استحکام آن پیش‌بینی شده است. در این تحقیق، دو پارامتر طول و جهت‌گیری نانولوله کربن در مقیاس میکرو و توزیع یا تفرق نانولوله کربن، در مقیاس مزو بررسی شده است. در نهایت در مقیاس ماکرو به کمک الگوریتم ژنتیک استحکام نهایی رشته محاسبه شده است. در این پژوهش استحکام نانوکامپوزیت با دو کسر وزنی 0.1 و 0.5 درصد محاسبه گردید و مشاهده شد که استحکام نهایی نانوکامپوزیت با کسر وزنی 0.1 و 0.5 درصد به ترتیب 14 و 20 درصد افزایش یافتند و همچنین مقادیر به‌دست‌آمده از آزمون کشش همخوانی بسیار خوبی با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی داشتند.

### کلیدواژگان:

مدل‌سازی چندمقیاسی،  
 الگوریتم ژنتیک،  
 نانولوله کربن،  
 استحکام،  
 مدل‌سازی تصادفی،  
 رشته

## Theoretical and experimental investigation of nanocomposite filament strength

Roham Rafiee<sup>1\*</sup>, Hiran Amohaji<sup>2</sup>

1, 2- College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

\*Postal Code: 1439957131, Tehran, Iran, roham.rafiee@ut.ac.ir

### Keywords

Multiscale modeling,  
 Genetic algorithm,  
 Carbon nanotube,  
 Strength,  
 Stochastic modeling,  
 Filament

### Abstract

In this article, the strength of the filament produced by the extrusion method has been investigated. For this purpose, testing samples were produced using ABS and carbon nanotubes as printable nanocomposite filaments in 3D printer. Carbon nanotubes were incorporated into ABS, and nanocomposite filaments were produced and their strengths were measured. In order to predict the strength of a nanocomposite filament, a suitable multi-scale model was developed. This model started from the microscale and after passing the in-between scale of meso, ended at the macroscale. For each scale, a suitable and separate representative volume element was defined, and its strength was predicted. Two parameters, CNT length and orientation, were captured at the microscale, and CNT agglomeration was taken into account at the mesoscale. Finally, at the macroscale, the strength of the nanocomposite filament was estimated using a genetic algorithm. In this study, the strength of the nanocomposite was calculated with two weight fractions of 0.1% and 0.5%, and it was observed that the final strength of the nanocomposite with weight fractions of 0.1% and 0.5% increased by 14% and 20%, respectively. The outputs of the modeling procedure were in very good agreement with experimental observations.

### 1- مقدمه

سهولت ساخت و هزینه کم، در کاربردهای متنوع و گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [2].

توسعه روش‌های ساخت و از جمله شیوه ساخت افزودنی، افق جدیدی در برابر دید صنایع و محققین برای تولید اشکال پیچیده هندسی فراهم نموده است.

کامپوزیت‌ها، از جمله مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص مهمی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و دامنه گسترده تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [1]. مواد کامپوزیتی با زمینه پلیمری یکی از پرمصرف‌ترین مواد در صنایع پیشرو هستند که به دلیل دارا بودن ویژگی‌های خاص همانند نسبت استحکام به وزن بالا،

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Rafiee, R., Amohaji, H., "Theoretical and experimental investigation of nanocomposite filament strength," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2408-2418, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2024217.1880>

سختی را به ترتیب 90، 153 و 99 درصد افزایش می‌دهد [12]. دوریگاتو و همکاران نشان دادند که به‌کارگیری نانولوله‌های کربنی در ABS باعث افزایش استحکام کششی، هدایت الکتریکی و حرارتی می‌شود [13].

گسترش استفاده از نانوکامپوزیت‌ها در روش ساخت افزایشی در گرو شناخت صحیح از رفتار ماده نانوکامپوزیت و پیش‌بینی خواص مکانیکی آن با استفاده از ابزارهای مناسب می‌باشد. تا کنون مطالعات مختلفی به منظور پیش‌بینی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها بر اساس شیوه‌های مختلف مدل‌سازی صورت پذیرفته است. مطالعات مختلفی تا کنون در حوزه پیش‌بینی خواص نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربن انجام شده است [14-27]. علیرغم توسعه مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی مدول، موارد بسیار کمی به پیش‌بینی استحکام نانوکامپوزیت پرداخته‌اند [28-32].

آصف و همکاران یک المان حجمی معرف سه‌بعدی از نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده سیلیس چاپ‌شده سه‌بعدی در یک بسته تجاری اجزا محدود ایجاد کرده‌اند و بر این اساس منحنی تنش-کرنش را پیش‌بینی کرده‌اند. مدل محاسباتی با در نظر گرفتن نانو ساختار و پراکندگی نانوذرات توسعه یافت [28]. یائو و همکاران یک مدل استحکام تعمیم‌یافته جدید برای پیش‌بینی استحکام شکست کششی بین لایه‌ای برای مواد افزوده‌شده به پلی‌لاکتیک‌اسید<sup>4</sup> در روش ساخت رشته ذوب‌شده<sup>5</sup> را ارائه دادند. مشاهده شد که مقدار خطا بین نتایج و داده‌های تجربی کمتر از 10 درصد است [29]. رحمتی و همکاران یک مدل شکست محافظه‌کارانه جدید برای تولید به روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده ارائه دادند. نتایج نشان داد که مدل شکست در 95.2 درصد از موارد استحکام کششی نهایی را درست پیش‌بینی نمی‌کند و به این معنی است که حتی اگر مدل نتواند یک مقدار محافظه‌کارانه را برای استحکام کششی پیش‌بینی کند؛ با این وجود مقدار خطا کمتر از 5 درصد است [30]. ژائو و همکاران دو مدل نظری جدید برای پیش‌بینی استحکام کششی و مدول یانگ مواد افزودنی به پلی‌لاکتیک‌اسید در روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده ارائه کردند و مشاهده شد که مدول یانگ و استحکام کششی را با زوایای چاپ متفاوت و ضخامت‌های مختلف لایه به‌طور دقیق پیش‌بینی می‌کند [31]. رفیعی و ذهاب‌زاده یک مدل‌سازی چند مقیاسی پایین به بالا به‌منظور تخمین استحکام نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربن را توسعه دادند که عدم قطعیت‌های ناشی از فرآیند تولید را با مدل‌سازی تصادفی لحاظ می‌نماید. مدل‌سازی از مقیاس میکرو<sup>6</sup> آغاز گردیده و پس از گذار از مقیاس مزو<sup>5</sup> به مقیاس نهایی ماکرو ختم می‌گردد. در این تحقیق مشاهده شد که مقدار خطای بین نتایج تجربی با مدل توسعه داده شده در حدود 5 درصد است [32].

هدف اصلی این تحقیق، بررسی استحکام رشته نانوکامپوزیتی مورد استفاده در چاپگر سه‌بعدی به‌منظور ساخت افزایشی مبتنی بر فرآیند ساخت رشته ذوب‌شده می‌باشد. برای این منظور علاوه بر اندازه‌گیری استحکام نمونه رشته نانوکامپوزیتی تولیدشده، به توسعه مدل چند مقیاسی مناسب برای تخمین استحکام آن پرداخته خواهد شد. با توجه به ماهیت تصادفی برخی پارامترهای حاکم بر مسئله همانند جهت‌گیری، طول و میزان تفرق آن در ماده زمینه رزین، مدل‌سازی به‌صورت تصادفی با شیوه نوینی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک تحقق خواهد یافت که در آن با تولید داده‌های تصادفی استحکام نهایی نانوکامپوزیت تخمین زده می‌شود.

از کاربردهای چاپ افزودنی می‌توان به پانل‌های ساندویچی که از ساختار سبک و مقاوم به منظور کاهش وزن و افزایش کارایی سازه در صنعت هوافضا، ساختمان‌سازی، صنایع دریایی و همچنین خودروسازی اشاره کرد. در ضمن اینکه این شیوه ساخت حتی در پزشکی و دندان‌پزشکی نیز کاربرد دارد و به‌طور مثال در تولید ایمپلنت‌های سفارشی با دقت بالا و ساختار پیچیده نیز استفاده می‌شود [3-4].

به‌منظور کاهش وزن قطعات مختلف تولیدشده به روش ساخت افزایشی، استفاده از پلیمرها در این حوزه رونق فراوانی پیدا کرده است. خواص مکانیکی قطعات پلیمری تولیدشده به روش ساخت افزایشی عموماً پایین‌تر از قطعات تولیدشده با روش قالب‌گیری می‌باشد [5-6]. به همین دلیل، افزودن نانوذرات به پلیمرهای رایج در صنعت برای چاپ سه‌بعدی قطعات نانوکامپوزیتی نه‌تنها برای افزایش خواص مکانیکی؛ بلکه به‌منظور ایجاد قابلیت‌های بیشتر عملکردی، پلیمرهای مورد استفاده در فرآیند ساخت افزایشی، مورد توجه قرار گرفته است. افزودن نانولوله کربن به رزین‌های مرسوم نوع گرم‌نرم برای افزایش خواص مکانیکی آن‌ها به جهت چاپ سه‌بعدی قطعات نانوکامپوزیتی با خواص مناسب، یکی از زمینه‌های نوظهور در حوزه فناوری نانوکامپوزیت و فرآیند ساخت افزایشی می‌باشد [6].

نانولوله‌های کربنی، استحکام فوق‌العاده و مدول کشسانی بسیار قابل‌توجهی نسبت به سایر مواد دارند. این خواص فوق‌العاده و منحصربه‌فرد، برگرفته از پیوندهای کووالانسی در ساختار اتمی آن‌ها می‌باشد. مدول یانگ نانولوله‌های کربنی در راستای محورشان بسیار زیاد است. نانولوله‌ها به دلیل طول بسیار زیادشان از قابلیت انعطاف‌پذیری بالایی برخوردارند. مقاومت کششی نانولوله کربن برابر 63 گیگاپاسکال و مدول الاستیک نانولوله کربن بالغ بر یک تریاپاسکال گزارش شده است [7]. با در نظر گرفتن این که نانولوله‌های کربنی چگالی وزنی پایینی دارند<sup>3</sup>  $1.3-1.4 \text{ gr/cm}^3$ ، استحکام ویژه آن‌ها در میان تمام مواد شناخته‌شده، بهترین است [7-8].

شوفنر و همکاران نانولوله کربن چند جداره با کسر وزنی 10 درصد را به ABS اضافه کردند و گزارش کردند که 7.5 درصد افزایش در استحکام کششی قطعه چاپی در مقایسه با پلیمر خالص دیده شد؛ درحالی‌که رفتار ترد بیشتری نیز مشاهده شد. رشد 13.2 درصدی در استحکام کششی کامپوزیت‌های چاپ‌شده به روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده<sup>1</sup> در مقایسه با پلیمر خالص توسط پرز و همکاران مشاهده شد [9]. نانسکرن و همکاران نانوکامپوزیت‌های نانولوله کربن چند جداره و پلی‌بوتیلن‌ترفتالات تقویت‌شده با گرافن (PBT) را با استفاده از مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده چاپ کردند. گزارش شده است که PBT تقویت‌شده با نانولوله کربن خواص کشسانی و رسانایی بالاتر و همچنین چاپ‌پذیری بهتری نسبت به PBT تقویت‌شده با گرافن نشان می‌دهد [10]. دیور و همکاران نانولوله کربن را به کامپوزیت‌های پلیمری اضافه کرده و رشته‌های نانوکامپوزیت را از طریق اکستروژن تولید کردند. رشته‌های اکستروژن شده به روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده چاپ شدند. آن‌ها خواص مکانیکی کمتری را برای نمونه‌های چاپ‌شده سه‌بعدی نسبت به نمونه‌های قالب‌گیری فشرده مشاهده کردند، درحالی‌که رسانایی الکتریکی یکسانی برای هر دو نمونه مشاهده شد [11]. کاپور و همکاران اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به ABS را بر خواص مکانیکی و حرارتی مطالعه کردند و نشان دادند که به‌کارگیری 5 درصد وزنی نانولوله کربن در ABS، مقادیر مدول الاستیک، مدول ذخیره و

<sup>1</sup> Fused Deposition Modeling (FDM)

<sup>2</sup> Polylactic acid

<sup>3</sup> Fused Filament Fabrication (FFF)

<sup>4</sup> Micro  
<sup>5</sup> Meso

2-مطالعه تجربی

1-2- مواد مورد استفاده

در این تحقیق از پلیمر ABS (اکریلونیتریل- بوتادین- استایرن) به دلیل برخوردار بودن از خواص نسبتاً خوب مکانیکی و کاربردهای فراوان آن در صنایع مختلف، استفاده شده است [35-33]. رزین ABS با چگالی 1.06 الی 1.08 گرم بر سانتی متر مکعب، دمای انتقال شیشه‌ای 108-109 °C و وزن مولکولی 251.105 g/mol استفاده و نانولوله کربن نیز با خلوصی بیش از 95 درصد وزنی که بیش از 98 درصد آن نانوذره تک دیواره است؛ استفاده شده است. نانولوله‌ها دارای قطر بیرونی 1-3nm، قطر داخلی 0.9-2 nm میانگین قطر 1.1 nm، طول 30-5 nm، چگالی 1.4 g/cm<sup>3</sup>، رسانایی الکتریکی 100 S/cm و هدایت گرمایی 200 W/m.K 50- می‌باشند.

2-2- تولید رشته

نانولوله کربن در کسر وزنی‌های مختلف به‌طور جداگانه به محلول آب مقطر که حاوی گرانول ABS است؛ اضافه می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه التراسونیک، نانولوله به‌خوبی در محلول توزیع می‌گردد. در ادامه نمونه‌ها به‌طور جداگانه در دستگاه مخلوط‌کن قرار می‌گیرد. مخلوط‌کردن در دمای 190 درجه سانتی‌گراد و سرعت دوران 90 دور بر دقیقه و به مدت 10 دقیقه انجام شده است. سپس، مخلوط وارد دستگاه پرس داغ شده و به‌وسیله خردکن به تکه‌های کوچک تقسیم می‌شود. برای اینکه به تکه‌ها آسیبی وارد نشود؛ در این مدت دمای پرس روی 180 درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌گردد. در نهایت تکه‌ها را در دستگاه اکسترودر تک‌پیچ قرار داده و با تنظیم سرعت و دمای مناسب رشته تولید می‌شود. دما برای فیلامنت نانوکامپوزیت‌های حاوی 0.1 درصد وزنی و 0.5 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی (CNTs) به ترتیب در محدوده 215 تا 220 درجه سانتی‌گراد و 230 تا 240 درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌شود. دلیل انتخاب این محدوده‌های دمایی این است که ماده به‌طور کامل ذوب شود بدون اینکه بیش از حد گرم شود و از سوختن و تغییر شکل نامناسب جلوگیری شود. همچنین، تنظیم دمای مناسب باعث ایجاد خواص فیزیکی و مکانیکی بهینه در فیلامنت نهایی می‌شود. رشته تولیدشده در شکل 1 قابل مشاهده است. شایان ذکر است که تنظیم پارامترهای تولید با هدف دستیابی به رشته‌های قابل چاپ در فرآیند مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده صورت پذیرفته است و از امکان چاپ آن‌ها در چاپگر سه‌بعدی موردنظر اطمینان حاصل شده است.

2-3- آزمون کشش

آزمون کشش با دستگاه SANTAM مدل STM-150 و با بارگذاری 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. برای هر کدام از رشته از جنس ABS و رشته نانوکامپوزیتی با دو کسر وزنی مختلف نانولوله کربن، 4 نمونه و مجموعاً 12 نمونه تهیه و آزمون کشش بر روی آن‌ها صورت پذیرفت (شکل 2). میانگین استحکام‌های اندازه‌گیری شده برای رشته‌های مختلف در جدول 1 ارائه شده است.

علاوه بر استحکام‌های اندازه‌گیری شده و ذکر شده در جدول 1، مدول الاستیک رشته خالص ABS نیز که برای مراحل بعدی مدل‌سازی مورد نیاز است؛ اندازه‌گیری گردید و مقدار 1.967 گیگاپاسکال برای آن به دست آمد.



Fig. 2 A sample of the tensile test piece with the device  
شکل 2 نمونه رشته آزموده شده با دستگاه

جدول 1 استحکام رشته از جنس پلیمر خالص ABS و CNT/ABS  
Table 1 Strength of pure ABS and CNT/ABS filaments

نوع رشته	کسر وزنی نانولوله کربن %	استحکام (MPa)
ABS	0	32.2
CNT/ABS	0.1	35.7
CNT/ABS	0.5	37.17

3-مدل‌سازی چند مقیاسی

با توجه به اینکه نانولوله کربنی در مقیاس نانو می‌باشد و استحکام نهایی در بالاترین مقیاس مادی، یعنی مقیاس ماکرو اندازه‌گیری می‌شوند؛ توسعه یک مدل چند مقیاسی مدنظر قرار می‌گیرد. مدل دربرگیرنده سه مقیاس میکرو، مزو و ماکرو می‌باشد و خروجی مدل‌سازی هر مقیاس به‌عنوان ورودی مقیاس بعدی لحاظ می‌گردد. در مقیاس میکرو، برهمکنش بین نانولوله و رزین موردنظر قرار گرفته و استحکام فاز میانی (فاز واسط بین رزین و نانولوله) مشخص



Fig.1 Produced filaments

شکل 1 رشته‌های تولیدشده

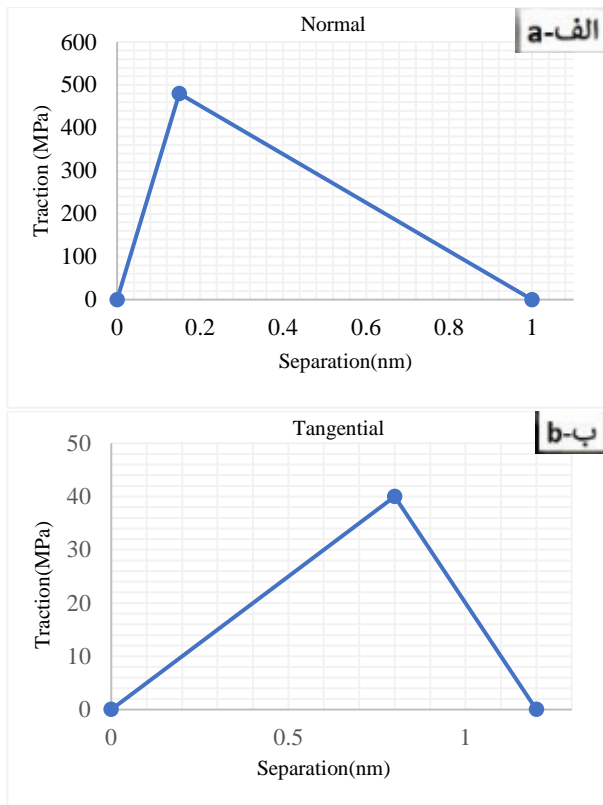


Fig. 3 traction-separation diagrams in a) vertical and b) tangential direction

شکل 3 نمودار کشش - جدایش در راستای الف) عمودی و ب) مماسی

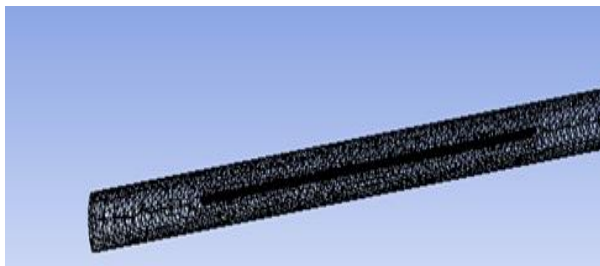


Fig. 4 Meshed RVE

شکل 4 المان حجمی معرف مش بندی شده

با توجه به مقادیر گفته شده در بخش 1-2 و مقدار کسر وزنی نانولوله که در دو حالت 0.5 و 0.1 درصد است. مقدار کسر حجمی برابر با 0.07 و 0.27 درصد برای المان حجمی معرف در این مقیاس محاسبه شده است. برای محاسبه استحکام کششی المان حجمی معرف، یک طرح مدل تحت بارگذاری محوری قرار گرفته است و درجه آزادی حرکتی طرف مقابل در امتداد بارگذاری مقید و سایر درجات آزادی دورانی نیز مقید گردیدند. نمودار تنش - کرنش المان حجمی معرف مقیاس ماکرو برای طول های مختلف نانولوله کربن، بر اساس خروجی تحلیل المان محدود در شکل 5 نمایش داده شده است. همان طور که در شکل 5 مشاهده می شود، با افزایش طول نانولوله مقدار استحکام نیز افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود که نمودار تنش - کرنش نانوکامپوزیت غیرخطی است و هرچقدر که این طول بلندتر شود، این رفتار بیشتر خود را نشان می دهد. با توجه به اینکه رفتار نانولوله و رزین به صورت خطی در نظر گرفته شده است؛ روند غیرخطی در نمودارهای شکل 5، ناشی از رخداد جدایش بین نانولوله و رزین در ناحیه صفحه واسط می باشد.

می شود. سپس در مقیاس مزو، المان حجمی معرف حاوی چند نانولوله مدل سازی می گردد و استحکام آن پیش بینی می گردد. در نهایت در مقیاس نهایی ماکرو، مقادیر خروجی از مقیاس های میکرو و مزو تحت عنوان ورودی در نظر گرفته شده و استحکام نهایی رشته نانوکامپوزیتی تخمین زده می شود.

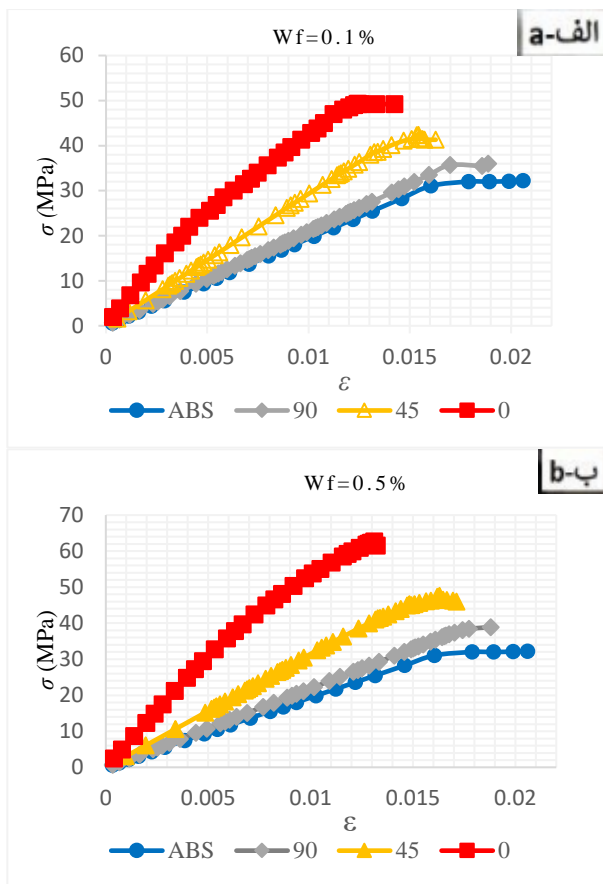
### 1-3- مقیاس میکرو

برهمکنش بین نانولوله و ماتریس نقش بسیار زیادی بر استحکام نهایی دارد. بنابراین در نظر گرفتن برهمکنش بین نانولوله و رزین بسیار قابل اهمیت است. در صورت استفاده از نانولوله عادی (نانولوله عامل دار نشده)، برهمکنش بین نانولوله و رزین از طریق پیوندهای ضعیف واندروالسی صورت می گیرد [36]. پژوهشگران با مدل سازی دینامیک مولکولی و یا از طریق بیرون کشیدگی تجربی نانولوله از رزین به مطالعه انرژی شکست و استحکام برشی فاز میانی بین نانولوله و رزین پرداخته اند. مدل ناحیه چسبیده در دسته ای از روش ها است که توانایی بالایی از منظر دقت و سرعت تحلیل بر روی بررسی برهمکنش بین نانولوله و رزین دارد. در این تحقیق نیز برای مدل سازی برهمکنش بین نانولوله و رزین از مدل سازی ناحیه چسبیده استفاده شده است. المان حجمی معرف مقیاس میکرو دربرگیرنده نانولوله، رزین و صفحه واسط بین نانولوله و رزین می باشد. برای مدل سازی المان حجمی معرف در مقیاس میکرو، از نرم افزار المان محدود انسیس استفاده شده است. برای این منظور، نانولوله به صورت یک ماده پیوسته و با مدول الاستیک یک تراپاسکال و ضریب پواسون 0.3 در نظر گرفته می شود. رزین احاطه کننده نانولوله نیز به صورت یک ماده پیوسته و با مدول الاستیک 1.967 گیگاپاسکال و ضریب پواسون 0.38 مدل می گردد. برهمکنش بین نانولوله و رزین نیز با استفاده از ناحیه چسبیده با ضخامت صفر و به صورت صفحه واسط بین نانولوله و رزین مدل می گردد. رفتار ساختاری ناحیه چسبیده صفحه واسط، با قانون دوخطی نمایش داده شده در شکل 3 مدل گردیده است. حداکثر تنش مماسی بین نانولوله کربن و ABS، 40 MPa گزارش شده است [37]. در تحقیق دیگری جدایش متناظر با حداکثر تنش برشی 0.8 nm و جدایش کامل را 1.2 nm محاسبه کرده اند [38-39]. همچنین تان و همکاران مقدار حداکثر تنش قائم را 480 MPa و جدایش متناظر با آن را 0.15 nm و جدایش کامل را 1 nm به دست آورده اند [40]. شکل 4 هندسه مش زده شده مدل المان حجمی معرف مقیاس میکرو را نشان می دهد. به منظور بررسی تأثیر طول بر روی استحکام نهایی در المان معرف، مدل های مختلفی حاوی نانولوله های با طول های 150 تا 500 نانومتر ساخته شدند.

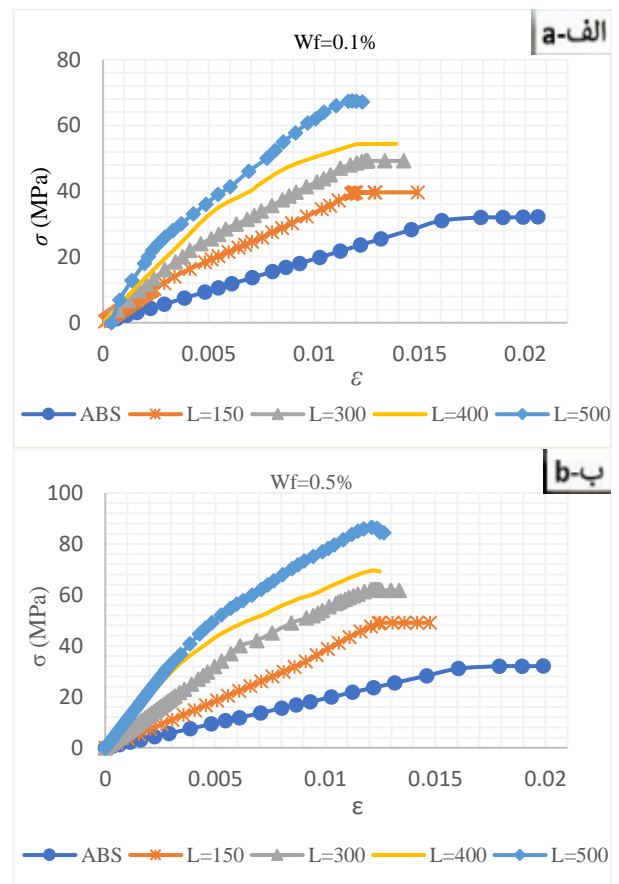
ابعاد نانولوله و رزین، به گونه ای در نظر گرفته می شود که بیان کننده کسر حجمی در تطابق کامل با مطالعه آزمایشگاهی باشد. با توجه به اینکه در آزمون تجربی از دو کسر وزنی 0.5 و 0.1 درصد استفاده شده است؛ کسر وزنی نانولوله کربن به کسر حجمی با استفاده از رابطه ذیل تبدیل می گردد

$$v_f = \frac{M_f/\rho_f}{M_f/\rho_f + M_m/\rho_m} \quad (1)$$

که در آن  $M_f$  و  $M_m$  به ترتیب کسر وزنی نانولوله و کسر وزنی رزین و  $\rho_f$  و  $\rho_m$  چگالی نانولوله و چگالی رزین هستند.



**Fig. 6** The effect of nanotube orientation on the final strength of nanocomposite. a) weight fraction 0.1% and b) weight fraction 0.5%  
 شکل 6 تأثیر جهت گیری نانولوله بر استحکام نهایی المان حجمی معرف مقیاس میکرو. الف) کسر وزنی 0.1 درصد و ب) کسر وزنی 0.5 درصد



**Fig. 5** The effect of nanotube length on the final strength of nanocomposite. a) weight fraction 0.5% and b) weight fraction 0.1%  
 شکل 5 تأثیر طول نانولوله بر استحکام نهایی المان حجمی معرف مقیاس میکرو. الف) کسر وزنی 0.1 درصد و ب) کسر وزنی 0.5 درصد

شایان ذکر است که در این تحقیق از بررسی موج دار بودن نانولوله صرف نظر شده است. علت این امر این است که در طی تحقیق انجام شده توسط رفیعی نشان داده شده است که انحنای نانولوله در رزین، بین حالت های جهت گیری نانولوله مستقیم با زاویای 0 و 90 قرار دارد [41]. لذا بررسی قرار گیری نانولوله کربن مستقیم در زاویای 0، 45 و 90 درجه که در این بخش بررسی گردید؛ معادل اثر شکل موج دار نانولوله می باشد. از این مطلب در مدل سازی مقیاس ماکرو متعاقباً استفاده خواهد شد.

### 2-3- مقیاس مزو

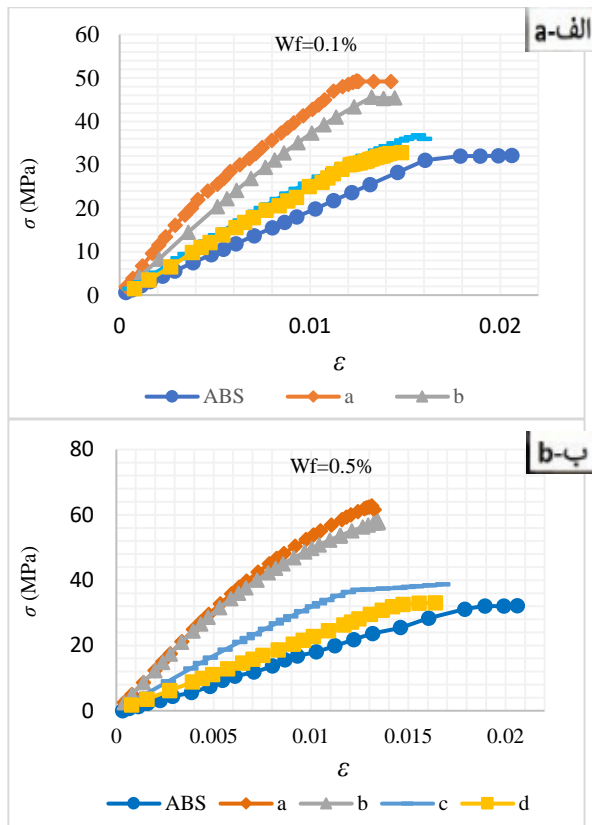
المان حجمی معرف مقیاس میکرو که در بخش قبل مورد تحلیل قرار گرفت؛ تنها دربرگیرنده یک نانولوله کربن می باشد. لذا این مدل فرض می کند که هر رخدادی در این المان مانند جدایش دو فاز از یکدیگر، به صورت مشابه در تمامی بخش های دیگر تکرار می گردد. این پیش بینی ساده، تنها در حالتی معتبر است که نانولوله ها به صورت کاملاً منظم و با فواصل مشخص از هم قرار گرفته باشند یا به عبارت دیگر به صورت کاملاً ایده آل در رزین پراکنده شده باشند. درحالی که، توزیع نانولوله در داخل رزین از الگوی یکسانی تبعیت نمی نماید و نانولوله ها تمایل شدیدی به تجمع موضعی و کلوخه های شدن دارند. در این راستا، انتخاب ابعاد المان حجمی با ابعادی بزرگتر، باید نمایشگر حدودی این موضوع باشد و توزیع متفاوت و نامنظم تنش را نشان می دهد. با توجه به این امر که در این حالت، به جای یک نانولوله، تعداد بیشتری مورد تحلیل واقع می شوند، می توان عنوان نمود که مدل سازی در مقیاس مزو صورت می گیرد. مقیاس مزو مقیاسی واسط میان مقیاس میکرو و ماکرو می باشد.

حال در طول ثابت 300 نانومتر و در همان دو کسر وزنی، تأثیر جهت گیری نانولوله در رزین بر استحکام نهایی بررسی می شود. برای این منظور، مدل هایی با جهت گیری نانولوله در زوایای 45 و 90 نیز ساخته و تحلیل می گردد. نمودار تنش- کرنش آن ها در شکل 6 قابل مشاهده است. با توجه به شکل واضح است که هر چقدر از زاویه صفر درجه به سمت زاویه 90 درجه جهت گیری نانولوله تغییر پیدا کند، استحکام نهایی آن کاهش می یابد؛ تا جایی که می توان دید که در زاویه 90 درجه نمودار تنش-کرنش تقریباً با رزین خالص منطبق است. زمانی که نانولوله در راستای 90 درجه واقع می گردد؛ قبل از اینکه بار به نانولوله منتقل شود؛ رزین دچار تخریب می شود. با توجه به این امر که استحکام مماسی صفحه واسط از استحکام قائم به مراتب کمتر است (شکل 3)، در زاویه 45 درجه نیز، صفحه واسط زودتر از حالتی که نانولوله در زاویه صفر درجه قرار گرفته است، تخریب می گردد.

در شکل 7 کانتور تنش برای نانولوله قرار گرفته در راستای 45 و 90 درجه و کسر وزنی 0.5 درصد قابل مشاهده است. همان طور که در شکل 7-الف مشاهده می شود؛ بار متحمل توسط نانولوله در حالتی که نانولوله با راستای بارگذاری زاویه 90 درجه بسازد با رزین اطراف برابر است و قبل از شروع انتقال بار، رزین دچار تخریب می گردد. عامل اصلی کاهش استحکام نهایی، تغییر الگوی انتقال بار به نانولوله است. توزیع تنش و فرآیند انتقال بار به نانولوله با چرخش نانولوله تحت تأثیر قرار می گیرد. با توجه به شکل 7-ب مشاهده می شود که تمرکز تنش در دو انتهای نانولوله در جهت گیری 45 درجه بیشترین میزان است.

برای حالت توزیع کاملاً پراکنده (الف)، همان المان حجمی معرف مقیاس میکرو در کنار همدیگر تکثیر شده‌اند. از آنجایی که المان حجمی معرف مقیاس میکرو با فرض عدم رخداد تجمع موضعی به علت ماهیت خود استوار گردیده است؛ المان حجمی معرف مقیاس مزو که از تکثیر المان حجمی معرف مقیاس میکرو ایجاد می‌گردد نیز، بر اساس همان فرض توزیع کاملاً پراکنده استوار می‌گردد. فواصل نانولوله‌های کربن در المان حجمی معرف مقیاس مزو نوع (الف)، به میزان مختلف کاهش داده می‌شود تا حالت‌های دیگر توزیع نانولوله و رخداد پدیده تجمع موضعی برای حالت‌های (ب)، (ج) و (د) به وجود آید.

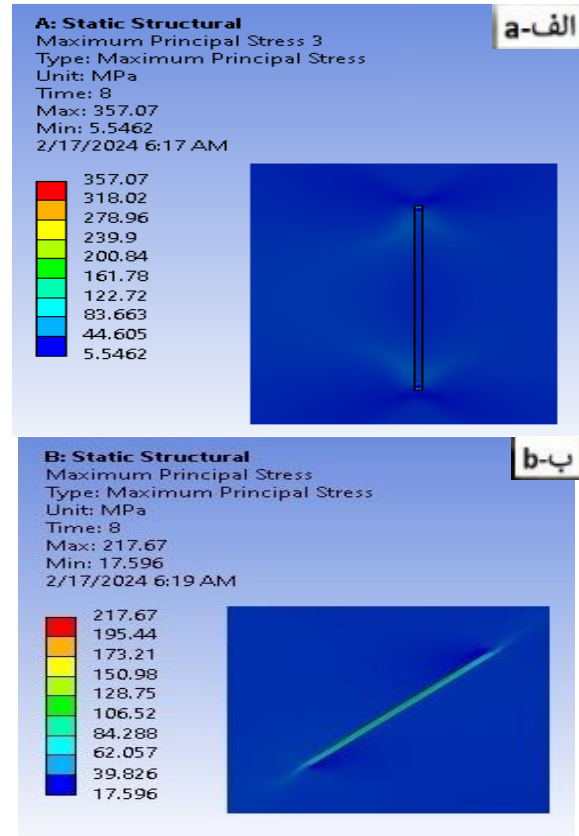
نمودارهای تنش- کرنش در حالت‌های مختلف توزیع نانولوله در رزین برای 2 کسر وزنی مختلف در شکل 9 نشان داده شده است. با توجه به شکل 9 مشاهده می‌گردد که هرچقدر نانولوله‌ها از هم فاصله بیشتری داشته باشند؛ استحکام نهایی نانوکامپوزیت بیشتر شده، هرچقدر که نانولوله‌ها به هم نزدیک شوند؛ به علت تمرکز تنش ایجاد شده در بین آن‌ها استحکام نهایی کاهش می‌یابد. به طوری که در حالت کاملاً متراکم با استحکام رزین خالص تقریباً برابر شد و کرنش نهایی آن نیز کاهش یافته است. در حقیقت در این حالت، نانولوله کربن نقشی در تقویت ماده زمینه ایفا نمی‌نماید.



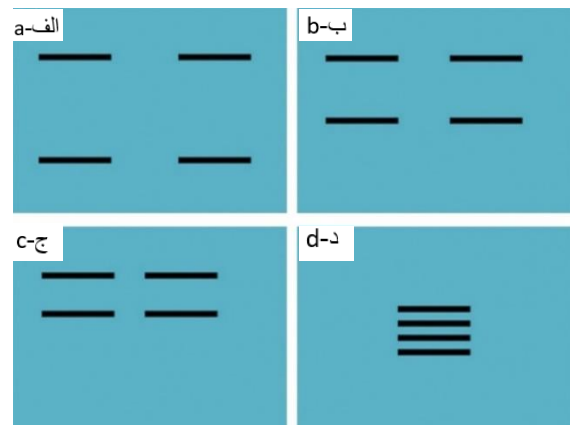
**Fig. 9** The effect of nanotube agglomeration on the final strength of nanocomposite. a) weight fraction 0.1% and b) weight fraction 0.5%  
 شکل 9 تأثیر توزیع نانولوله بر استحکام نهایی نانوکامپوزیت. الف) کسر وزنی 0.1 درصد و ب) کسر وزنی 0.5 درصد

شایان ذکر است که برای تمامی مدل‌های المان محدود ساخته شده در این تحقیق، مطالعه همگرایی صورت پذیرفته است و چگالی المان بندی به نحوی انتخاب شده است که پاسخ مستقل از چگالی المان باشد. با توجه به اینکه برای هر حالت، تعداد المان متفاوتی استفاده شده است؛ به منظور پرهیز از طولانی شدن مطلب، از ذکر جزئیات آن خودداری می‌گردد.

در مقیاس میکرو تأثیرات طول و جهت‌گیری نانولوله در رزین بررسی و در مورد تأثیر آن بر روی استحکام نهایی بحث شد. حال در این مقیاس، تأثیر توزیع نانولوله در رزین بر روی استحکام نهایی بررسی شود. برای این منظور، چهار حالت توزیع مطابق شکل 8 مورد بررسی قرار گرفته است که معرف حالت‌های توزیع کاملاً پراکنده (الف)، توزیع تقریباً پراکنده (ب)، توزیع نسبتاً متراکم (ج) و توزیع کاملاً متراکم (د) تغییر می‌کند.



**Fig.7** Stress distribution in the weight fraction of 0.5% in the orientation angle of a) 90 and b) 45 degrees of nanotubes in resin  
 شکل 7 توزیع تنش در کسر وزنی 0.5% در زاویه جهت‌گیری الف) 90 و ب) 45 درجه نانولوله در رزین



**Fig. 8** Different modes of nanotube agglomeration in the volume element representative of the meso scale a) fully dispersed, b) partially dispersed, c) moderately agglomerated, d) highly agglomerated

شکل 8 حالت‌های مختلف توزیع نانولوله در المان حجمی معرف مقیاس مزو الف) توزیع کاملاً پراکنده، ب) توزیع تقریباً پراکنده، ج) توزیع نسبتاً متراکم، د) توزیع کاملاً متراکم

## 3-3- مقیاس ماکرو

در این قسمت تمرکز بر روی آخرین مقیاس مادی یا همان مقیاس ماکرو است. المان حجمی معرف در این مقیاس، خود محیط مادی مورد بررسی می‌باشد. در مقیاس میکرو تأثیر طول و جهت‌گیری نانولوله بر روی استحکام نهایی در حالی که هربار یکی از این پارامترها ثابت در نظر گرفته شد؛ مورد بررسی قرار گرفت. در مقیاس بعدی یعنی مزو، تأثیر توزیع نانولوله بر استحکام نهایی نانوکامپوزیت در حالی که پارامترهای طول و جهت‌گیری ثابت در نظر گرفته شدند محاسبه شد. حال از آنجایی که طول، جهت‌گیری و توزیع نانولوله پارامترهای تصادفی هستند؛ در این مقیاس تأثیر هم‌زمان این پدیده‌ها به‌صورت تعاملی و همچنین به‌صورت تصادفی مدنظر قرار می‌گیرد. برای پیش‌بینی استحکام در این مقیاس نیازمند به مدل‌سازی تصادفی می‌باشد. در این مقیاس از روش سطح پاسخ<sup>1</sup> که شاخه‌ای مهم از روش‌های ریاضی و آماری است و در توسعه روش‌های جدید بهینه‌سازی و مدل‌سازی تصادفی به‌صورت مؤثر عمل می‌کند [42-43]؛ استفاده شده است. این روش به دلیل دقت بالا، هزینه کم

تحلیل و سادگی، انتخاب بسیار مناسبی است. در مرحله اول برای این روش باید پارامترهای ورودی و خروجی تعیین شوند. با توجه به مدل‌سازی و تحلیل انجام‌شده در این پژوهش، پارامترهای طول، جهت‌گیری و توزیع به‌عنوان پارامتر ورودی یا متغیر و استحکام نهایی به‌عنوان پارامتر خروجی یا هدف انتخاب می‌شود. در مرحله بعد یک شبیه‌سازی پارامتری/اعددی برای یافتن پاسخ‌های تعیین‌شده به‌عنوان تابعی از پارامتر ورودی برای ساخت ماتریس طراحی انجام می‌شود. در این مرحله با توجه به شبیه‌سازی اصلی که در نرم‌افزار انسیس انجام شده است؛ بدون انجام شبیه‌سازی مستقیم پاسخ‌های طیف‌های وسیع‌تری از پارامترهای ورودی پیش‌بینی می‌شود. به‌طور معمول ارتباط بین پاسخ و متغیرهای مستقل مشخص نیست و برازش مدل در روش سطح پاسخ، مستلزم یک تقریب مناسب از رابطه دقیق بین پاسخ و پارامترهای ورودی است. برخی از روش‌های تخمین این رابطه عبارتند از: الگوریتم ژنتیک، چندجمله‌ای مرتبه دو، شبکه عصبی، رگرسیون ناپارامتری. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به دلیل دقت قابل‌قبول در فرآیندهای بهینه‌سازی و مدل‌سازی تصادفی استفاده شده است.

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی مؤثر در فضاها بسیار وسیع برای پیدا کردن جواب است. در این الگوریتم‌ها باید فضای طراحی به فضای ژنتیک تبدیل شود. اصول الگوریتم ژنتیک بر پایه پردازش تصادفی یا به عبارت بهتر پردازش تصادفی هدایت‌کننده استوار است [44-46]. از دلایل دیگر استفاده از الگوریتم ژنتیک در این تحقیق ماهیت تصادفی پارامترهای متغیر است. مزیت استفاده از الگوریتم ژنتیک در مدل‌سازی تصادفی نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی تصادفی این است که این الگوریتم می‌تواند در فضاها بسیار وسیع با استفاده از عملگرهای انتخاب، ترکیب و جهش بهترین جواب‌ها را در فضای جستجوی مسئله پیدا کند؛ زیرا که قابلیت تطبیق با تغییرات مسئله را دارد و زمانی که شرایط مسئله تغییر کند این الگوریتم می‌تواند با تغییر جمعیت و اجرای مراحل تکاملی بهترین جواب را تخمین بزند. همچنین این الگوریتم نیاز کمتری به اطلاعات و داده‌های قبلی برای مدل‌سازی تصادفی نسبت به سایر روش‌های معمول دارد و می‌تواند با اجرای تکاملی به‌صورت خودکار پارامترها و ساختارهای مدل را تنظیم کند و بهترین عملکرد را بر اساس خصوصیات داده‌ها بگیرد. در نهایت این الگوریتم به دلیل قابلیت اجرای موازی باعث افزایش سرعت محاسبه در فضاها بزرگ و پیچیده می‌گردد [47-49]. در این تحقیق مقادیر

## 4- بحث و نتایج

قبل از اینکه به نتایج حاصل از مدل‌سازی تصادفی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته شود؛ ابتدا باید صحت این مدل‌سازی بررسی شود. دقت مقادیر تخمین زده شده از مدل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را می‌توان از مقایسه مقادیر محاسبه شده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس و داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل چند مقیاسی توسعه داده شده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک نشان داد. برای انجام این کار در نرم‌افزار انسیس برای 30 حالت مختلف طول، جهت‌گیری و توزیع نانولوله در رزین، مقدار استحکام نهایی پیش‌بینی می‌گردد و مقادیر محاسبه شده در نرم‌افزار انسیس تحت عنوان داده‌های واقعی با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک مقایسه می‌گردد. همان‌طور که در شکل‌های 10، 11 و 12 مشاهده می‌شود مدل با دقت بسیار خوبی می‌تواند حالت‌های مختلف پارامترهای متغیر یعنی: طول، جهت‌گیری و توزیع نانولوله در رزین را در نظر گرفته و استحکام نهایی را تخمین بزند.

<sup>3</sup> Mode value<sup>1</sup> Response Surface Method (RSM)<sup>2</sup> Coefficient of Variation (CoV)

صورت منفی بودن به معنی رابط عکس در پارامترها می‌باشد. هرچقدر که این مقدار به 1 نزدیک‌تر باشد به معنی ارتباط بیشتر یا همبستگی بیشتر بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است. همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، مقدار ضریب همبستگی در کسر وزنی 0.1 و 0.5 درصد به ترتیب برابر با 0.9964 و 0.9962 و همچنین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با 3.028 و 4.63 است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل در کسر وزنی 0.1 درصد با دقت بالاتری داده‌ها را پیش‌بینی می‌کند اما به‌طور کل با توجه از مقادیر به دست آمده برای ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا در شکل 12 می‌توان گفت که مدل در هر دو کسر وزنی دارای دقت بالایی است. بنابراین با توجه به شکل‌های 10-12 می‌توان نتیجه گرفت که مدل با دقت بالایی استحکام نهایی رشته نانوکامپوزیت را در حالت‌های مختلف برای پارامترهای تصادفی طول، جهت‌گیری و توزیع نانولوله در رزین تخمین می‌زند.

حال پس از آنکه دقت مدل سنجیده شد، میزان تولید نمونه تصادفی بر اساس معیار همگرایی تبیین شده، بررسی می‌گردد. همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، برای کسر وزنی 0.1% بعد از 400 داده تصادفی، همگرایی حاصل شده است. برای کسر وزنی 0.5% نیز بعد از 408 داده تصادفی، شرط همگرایی احراز گردیده است. در شکل 13، n به معنی تعداد داده‌های تصادفی انتخاب شده می‌باشد.

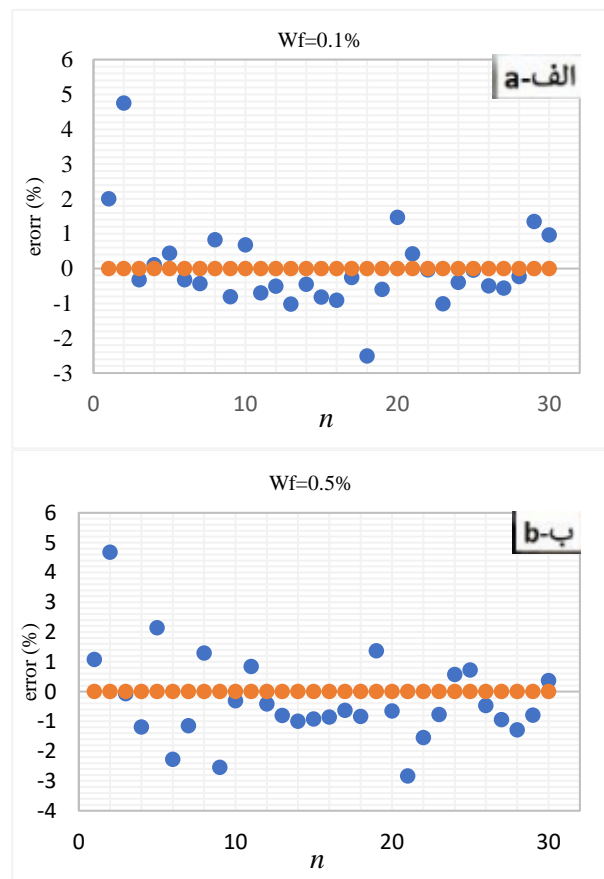


Fig. 11 Relative error diagram of observed and predicted strength values. a) weight fraction 0.1% and b) weight fraction 0.5%

شکل 11 نمودار خطای نسبی مقادیر استحکام محاسبه‌شده و پیش‌بینی‌شده. الف) کسر وزنی 0.1 درصد و ب) کسر وزنی 0.5 درصد

با توجه به شکل 10 مشاهده می‌شود مقدارهای اصلی و محاسبه‌شده با نرم‌افزار انسیس با مقادیر پیش‌بینی‌شده استحکام توسط مدل چند مقیاسی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک کاملاً منطبق است. این بدان معنی است که به‌جای اینکه تعداد بسیار زیادی از حالت مختلف در نرم‌افزار تحلیل شود و استحکام آن‌ها پیش‌بینی شود، می‌توان چند حالت مختلف را در نرم‌افزار شبیه‌سازی کرده، مابقی را به کمک مدل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیش‌بینی کرد. این کار باعث صرفه‌جویی زیادی در هزینه محاسباتی می‌شود.

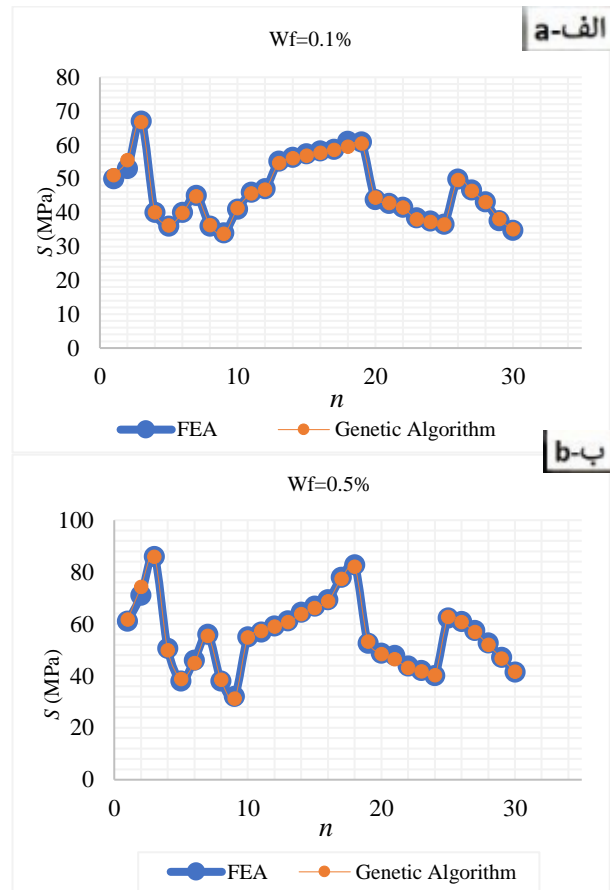


Fig. 10 Chart of observed and predicted strength values. a) weight fraction 0.1% and b) weight fraction 0.5%

شکل 10 نمودار مقادیر استحکام محاسبه‌شده و پیش‌بینی‌شده. الف) کسر وزنی 0.1 درصد و ب) کسر وزنی 0.5 درصد

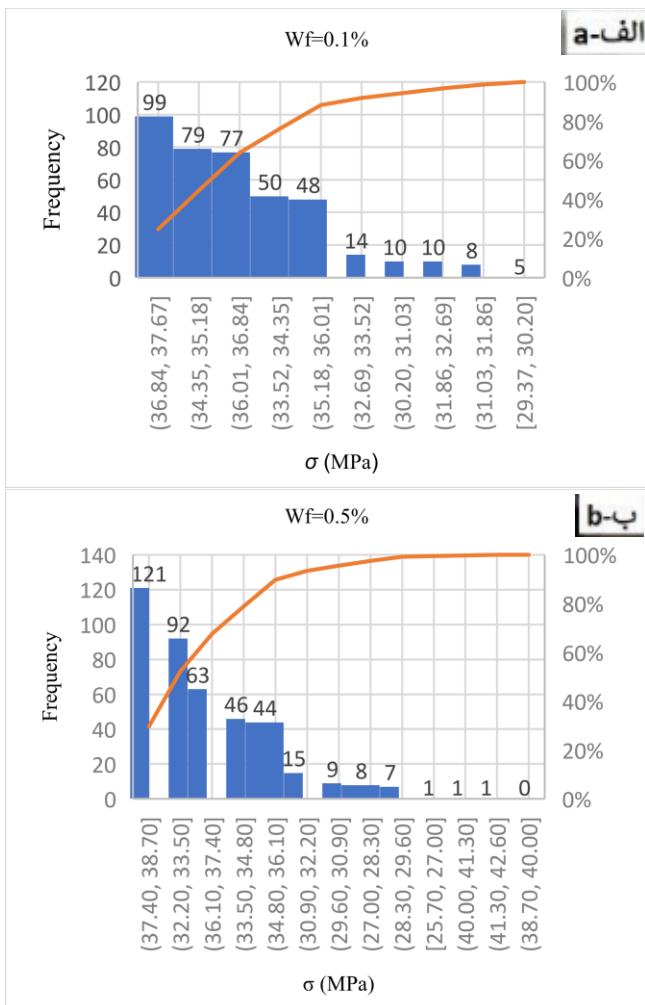
همچنین مقدار اختلاف بین مقادیر واقعی (محاسبه شده در انسیس) و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل ناچیز است. همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود مقدار خطا در هر دو کسر وزنی از 5 درصد تجاوز نمی‌کند که این به این معنی است که مدل چندمقیاسی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک توانایی خوبی در تخمین و پیش‌بینی استحکام نانوکامپوزیت دارد.

در ادامه ضریب همبستگی و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا<sup>1</sup> بین داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده محاسبه می‌گردد که در شکل 12 ارائه گردیده است. ریشه میانگین مربعات خطا میزان خطای بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین ضریب همبستگی نیز، یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی و ارتباط دو متغیر است. مقدار این ضریب از 1- تا 1 تغییر می‌کند؛ اگر این مقدار مثبت باشد به معنی ارتباط مستقیم و در

<sup>1</sup> root-mean-square error

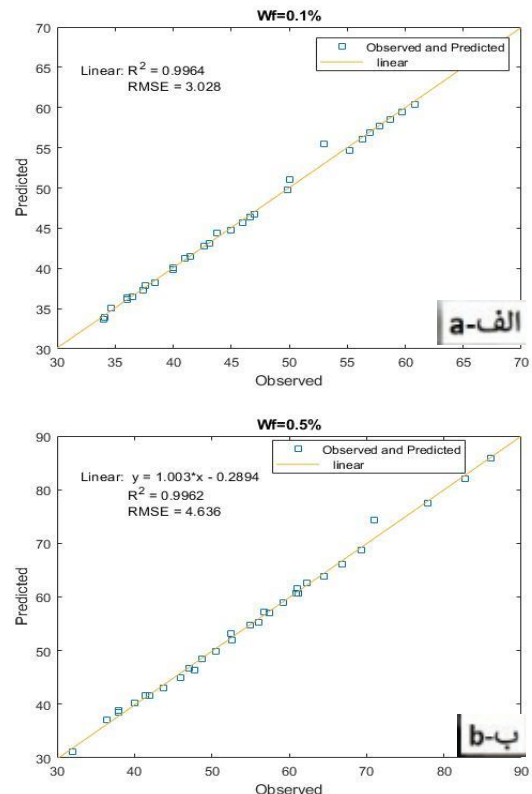
توزیع فراوانی استحکام‌های پیش‌بینی‌شده، برای استخراج مقدار استحکام غالب در شکل 14 نمایش داده شده است. منظور از استحکام غالب، استحکامی است که بیشترین فراوانی را در داده‌های موجود داشته است. شکل 14 نشان می‌دهد که توزیع خروجی‌ها وسعت محدودی دارد و این از خصوصیات مثبت مدل‌سازی است. چنانچه قله‌ی نمودار فراوانی در حوزه‌ی میانگین استاندارد نباشد، نتایج دور از حدود قابل‌قبول قرار خواهند گرفت. در مدل‌سازی صورت گرفته، محدوده‌ی متوسط و غالب نتایج به یکدیگر نزدیک می‌باشند. با توجه به شکل 14 مشاهده می‌شود که مقدار استحکام غالب در کسر وزنی 0.1 و 0.5 درصد به ترتیب برابر 36.84 و 37.40 مگاپاسکال می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در کسر وزنی 0.1 درصد در حدود 90 درصد داده‌ها بین 35.18 و 37.67 مگاپاسکال و در کسر وزنی 0.5 درصد در حدود 94 درصد داده‌ها بین 34.80 و 38.70 مگاپاسکال است.

شایان‌ذکر است که این محاسبه با رایانه‌ای مجهز به پردازنده با سرعت 3.2 گیگاهرتز انجام پذیرفته است. و حدود 20 دقیقه برای کسر وزنی 0.1% و در حدود 21 دقیقه برای کسر وزنی 0.5% زمان برده است.

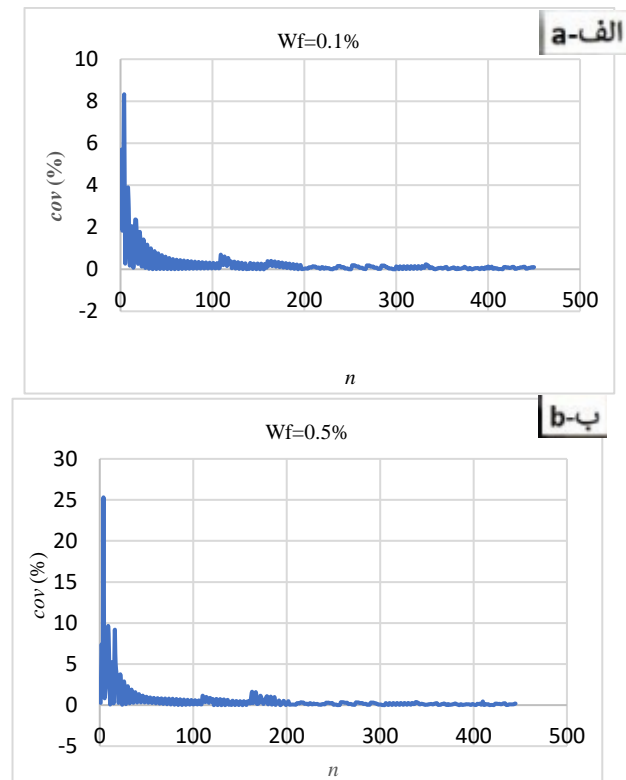


**Fig. 14** Frequency distribution of modeling results for robustness. a) weight fraction 0.1% and b) weight fraction 0.5%  
 شکل 14 توزیع فراوانی نتایج مدل‌سازی برای استحکام نهایی. الف) کسر وزنی 0.1 درصد و ب) کسر وزنی 0.5 درصد

در نهایت در جدول 2 مقادیر استحکام غالب و میانگین همراه با درصد اختلاف آن‌ها با داده‌های تجربی مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده



**Fig. 12** Correlation coefficient between the observed values and the predicted values. a) weight fraction 0.1% and b) weight fraction 0.5%  
 شکل 12 ضریب همبستگی بین مقادیر محاسبه‌شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده. الف) کسر وزنی 0.1 درصد و ب) کسر وزنی 0.5 درصد



**Fig. 13** Convergence trend of stochastic modeling. a) weight fraction 0.1% and b) weight fraction 0.5%  
 شکل 13 همگرایی مدل‌سازی تصادفی. الف) کسر وزنی 0.1 درصد و ب) کسر وزنی 0.5 درصد

## 6-مراجع

- [1] Babazade, A., Hadad, M.J., Safarabadi, M., "Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1197-1206, 2021.
- [2] Bavafa Bigdilou, M. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimzhad-Khaljiri, H., "The Effect of Carbon Nanotubes on High Velocity Impact Behavior of Hybrid Kevlar- Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fibers Composite with Interlayer Configuration," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 533-540 2020.
- [3] Shahkarami, M. and Zeinedini, A., "Flexural Properties of 3d-Printed Hierarchical-Sinusoidal Corrugated Core Sandwich Panels with Natural Fiber Reinforced Skins," Polymers and Polymer Composites, Vol. 30, pp. 09673911221101299, 2022.
- [4] Pirouzfard, S. and Zeinedini, A., "Effect of Geometrical Parameters on the Flexural Properties of Sandwich Structures with 3d-Printed Honeycomb Core and E-Glass/Epoxy Face-Sheets," in Proceeding of Elsevier, pp. 2724-2738.
- [5] Espalin, D., Muse, D. W., MacDonald, E. and Wicker, R. B., "3d Printing Multifunctionality: Structures with Electronics," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, pp. 963-978, 2014.
- [6] Penumakala, P. K., Santo, J. and Thomas, A., "A Critical Review on the Fused Deposition Modeling of Thermoplastic Polymer Composites," Composites Part B: Engineering, Vol. 201, pp. 108336, 2020.
- [7] Niyogi, S., "Chemistry of Single-Walled Carbon Nanotubes," Accounts of Chemical Research, vol. 35, no. 12, pp. 1105-1113, 2002.
- [8] Sun, C., Liu, K., "Dynamic Torsional Buckling of a Double Walled Carbon Nanotube Embedded in an Elastic Medium," European Journal of Mechanics-A/Solids, Vol. 27, No. 1, pp. 40- 49, 2008.
- [9] Shofner, M., Lozano, K., Rodríguez-Macías, F. and Barrera, E., "Nanofiber-Reinforced Polymers Prepared by Fused Deposition Modeling," Journal of applied polymer science, Vol. 89, No. 11, pp. 3081-3090, 2003.
- [10] Gnanasekaran, K., Heijmans, T., Van Bennekom, S., Woldhuis, H., Wijnia, S., De With, G. and Friedrich, H., "3d Printing of Cnt-and Graphene-Based Conductive Polymer Nanocomposites by Fused Deposition Modeling," Applied materials today, Vol. 9, pp. 21-28, 2017.
- [11] Daver, F., Baez, E., Shanks, R. A. and Brandt, M., "Conductive Polyolefin-Rubber Nanocomposites with Carbon Nanotubes," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 80, pp. 13-20, 2016.
- [12] Kapoor, S., Goyal, M. and Jindal, P., "Enhanced Thermal, Static, and Dynamic Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes-Reinforced Acrylonitrile Butadiene Styrene Nanocomposite," Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 35, No. 2, pp. 216-280, 2022.
- [13] Dorigato, A., Moretti, V., Dul, S., Unterberger, S. and Pegoretti, A., "Electrically Conductive Nanocomposites for Fused Deposition Modelling," Synthetic Metals, Vol. 226, pp. 7 -14, 2017.
- [14] Shokrieh, M. M. and Moshrefzadeh-Sani, H., "A Novel Laminate Analogy to Calculate the Strength of Two-Dimensional Randomly Oriented Short-Fiber Composites," Composites Science and Technology, vol. 147, pp. 22-29, Jul. 2017.
- [15] Shokrieh, M. M. and Moshrefzadeh-Sani, H., "On the Constant Parameters of Halpin-Tsai Equation," Polymer, vol. 106, pp. 14-20.
- [16] Rafiee, R., Zehtabzadeh, H. and Amini, M. R., "Predicting Mechanical Properties of 3d Printed Nanocomposites Using Multi-Scale Modeling," Additive Manufacturing, pp. 104055, 2024.
- [17] Esbati, A. H. and Irani, S., "Multiscale Modeling of Fracture in Polymer Nanocomposite Reinforced by Intact and Functionalized CNTs," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 35-46, 2017.

می‌شود؛ درصد خطا استحکام نهایی پیش‌بینی شده با کمک الگوریتم ژنتیک با داده‌های تجربی بسیار کم است. در کسر وزنی 0.1 درصد، مقادیر استحکام میانگین و استحکام غالب به ترتیب 2.8 و 3.19 درصد، با مقدار تجربی اختلاف دارند و در کسر وزنی 0.5 درصد مقادیر استحکام میانگین و استحکام غالب به ترتیب 3.3 و 0.61 درصد با مقدار تجربی اختلاف دارند.

جدول 2 مقایسه نتایج نظری و تجربی به دست آمده برای استحکام نهایی

Table 2 Comparison of theoretical and experimental results obtained for ultimate strength

کسر وزنی نانولوله کربنی (درصد)	استحکام (مگاپاسکال)	میانگین (درصد خطا)	مقدار غالب (درصد خطا)
0.1	35.70	36.70 (2.8%)	36.84 (3.19%)
0.5	37.17	38.40 (3.3%)	37.40 (0.61%)

## 5-جمع‌بندی

در این پژوهش استحکام رشته نانوکامپوزیت مناسب برای استفاده در روش ساخت افزایشی، به دو روش تئوری و تجربی مورد تحلیل قرار گرفته است. ابتدا رشته رزین خالص ABS و رشته نانوکامپوزیتی با 2 کسر وزنی مختلف، تولید شد. سپس رشته از جنس رزین خالص ABS تحت آزمون کشش قرار گرفت و خواص مکانیکی آن محاسبه شد. در ادامه رشته‌های نانوکامپوزیتی در 2 کسر وزنی مختلف تحت آزمون کشش قرار گرفته و استحکام آن‌ها محاسبه شد. در بخش مدل‌سازی، یک مدل چند مقیاسی توسعه یافت که دربرگیرنده سه مقیاس مایکرو، مزو و ماکرو می‌باشد. در مقیاس مایکرو تأثیر طول و جهت‌گیری نانولوله در رزین بر استحکام نهایی بررسی شد. در مقیاس مزو تأثیر توزیع نانولوله در رزین بر استحکام نهایی بررسی شد. در نهایت در مقیاس ماکرو با توجه به اینکه پارامترهای متغیر در مقیاس قبلی تصادفی بودند یک مدل‌سازی تصادفی با کمک الگوریتم ژنتیک انجام شد؛ همچنین با توجه به ماهیت تصادفی پارامترها و الزام به اینکه استحکام نهایی مستقل از تعداد داده‌های تصادفی باشد یک معیار همگرایی مناسب نیز تعریف شد و استحکام نهایی میانگین و غالب رشته نانوکامپوزیتی تخمین زده شد. ابتدا برای اینکه دقت مدل سنجیده شود؛ مقادیر استحکام نهایی تخمین زده شده توسط مدل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای 30 حالت دلخواه دستی، در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده‌اند. از مقایسه نتایج مقادیر اصلی و پیش‌بینی شده، مشاهده شد که مدل با دقتی بالا مقادیر استحکام نهایی را پیش‌بینی کرده است. در نهایت برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی نظری، مقادیر استحکام نهایی به دست آمده از طریق مدل با نتایج تجربی مقایسه شدند؛ با توجه به درصد خطای ناچیز بین نتایج روش تجربی و نظری می‌توان گفت که مدل توسعه داده شده از دقت بسیار بالایی برخوردار است. مدل چندمقیاسی توسعه یافته بر مبنای الگوریتم ژنتیک علاوه بر دقت بسیار مناسب در تخمین استحکام رشته نانوکامپوزیت، از لحاظ زمان اجرا نسبت به مدل‌های تصادفی متداول بسیار مقرون به صرفه می‌باشد. از مزیت‌های بسیار مهم مدل توسعه داده شده، در نظر گرفتن ماهیت تصادفی پارامترهای غیرقطعی ناشی از فرآیند ساخت و در نظر گرفتن اثر تعاملی بین آن‌ها می‌باشد.

- [36] Lordi, V., Yao, N., , "Molecular Mechanics of Binding in Carbon-Nanotube-Polymer Composites," *Journal of Materials Research*, Vol. 15, No. 12, pp. 2770-2779, 2000.
- [37] Al-Saleh, M. H., Al-Saidi, B. A. and Al-Zoubi, R. M., "Experimental and Theoretical Analysis of the Mechanical and Thermal Properties of Carbon Nanotube/Acrylonitrile-Styrene-Butadiene Nanocomposites," *Polymer*, Vol. 89, pp. 12-17, 2016.
- [38] Kulkarni, M., Carnahan, D., Kulkarni, K., Qian, D. and Abot, J. L., "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.
- [39] Needleman, A., Borders, T., Brinson, L., Flores, V. and Schadler, L., "Effect of an Interphase Region on Debonding of a Cnt Reinforced Polymer Composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 15, pp. 2207-2215, 2010.
- [40] Tan, H., Jiang, L., Huang, Y., Liu, B. and Hwang, K., "The Effect of Van Der Waals-Based Interface Cohesive Law on Carbon Nanotube-Reinforced Composite Materials," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 14, pp. 2941-2946, 2007.
- [41] Rafiee, R., "Influence of Carbon Nanotube Waviness on the Stiffness Reduction of Cnt/Polymer Composites," *Composite Structures*, Vol. 97, pp. 304-309, 2013.
- [42] Allen, D. M., "Mean Square Error of Prediction as a Criterion for Selecting Variables," *Technometrics*, Vol. 13, pp. 469-475, 1971.
- [43] Allen, D. M., "The Relationship between Variable Selection and Data Augmentation and a Method for Prediction," *Technometrics*, Vol. 16, pp. 125-127, 1974.
- [44] Taguchi, G. "Introduction to Quality Engineering," *Asian Productivity Organization*, White Plains, New York, Vol. 198-210, 1986.
- [45] Taguchi, G. "System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost," *White Plains, New York*, pp. 52-59, 1987.
- [46] Falkenauer, E., *Genetic Algorithms and Grouping Problems*, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd. New York, 1998.
- [47] Immanuel, S. D. and Chakraborty, U. K., "Genetic Algorithm: An Approach on Optimization," 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), pp. 701-708, 2019.
- [48] Eklund, S. E., "A Massively Parallel Architecture for Distributed Genetic Algorithms," *Parallel Comput.*, Vol. 30, pp. 647-676, 2004.
- [49] Ghazfan, D. F., Srinivasan, B. and Nolan, M., "Massively Parallel Genetic Algorithms," *Citeseer*, 1994.
- [18] Arasteh, M., Ojaghnezhad, F., "Young Modulus and Longitudinal Damping Coefficient of the Composite Copper Reinforced by Carbon Nanotubes," *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No.7, pp. 931-940, 2020.
- [19] Mozaffari, S., Panahizadeh, V., "Experimental Analysis of Impact Strength, Tensile Strength and Elastic Modulus of Polyamide 6 / Polyolefin Elastomer / Carbon Nanotubes / Carbon Nanotubes," *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 3, pp. 1668-1676, 2022.
- [20] Bashiri Goodarzi, H. and Yarmohammad Tooski, M., "An Experimental Study of the Effects of Carbon Nanotube and Graphene Addition on the Impact Strength of Epoxy/Basalt Fiber Composite," *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No.3, pp. 411-418, 2019.
- [21] Setoodeh, A.R. Sokhandani, N. and Zebarjad, S.M., "Theoretical and Experimental Study on the Effect of Multi-walled Carbon Nanotubes on Improving the Tensile Properties and Toughness of Vinyl Ester Resin," *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 539-550, 2019.
- [22] Eslami-Farsani, R. Shahrabi-Farahani, A. Khosravi, H. and Zamani, M. R., "A Study on the Flexural Response of Grid Composites Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes," *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 101-108, 2017.
- [23] Akar, A. O., Yildiz, U. H., Tirkes, S., Tayfun, U. and Hacivelioglu, F., "Influence of Carbon Nanotube Inclusions to Electrical, Thermal, Physical and Mechanical Behaviors of Carbon-Fiber-Reinforced Abs Composites," *Carbon Letters*, Vol. 32, No. 4, pp. 987-998, 2022.
- [24] Tambrallimath, V., Keshavamurthy, R., Saravanabavan, D., Koppad, P. G. and Sethuram, D., "Mechanical Characterization of Pc-Abs Reinforced with Cnt Nanocomposites Developed by Fused Deposition Modelling," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1455, No. 1, pp. 012003, 2020.
- [25] Dul, S., Fambri, L. and Pegoretti, A., "Filaments Production and Fused Deposition Modelling of Abs/Carbon Nanotubes Composites," *Nanomaterials*, Vol. 8, No. 1, pp. 49, 2018.
- [26] Yang, L., Li, S., Zhou, X., Liu, J., Li, Y., Yang, M., Yuan, Q. and Zhang, W., "Effects of Carbon Nanotube on the Thermal, Mechanical, and Electrical Properties of Pla/Cnt Printed Parts in the Fdm Process," *Synthetic Metals*, Vol. 253, pp. 122-130, 2019.
- [27] Pinto, V., Ramos, T., Alves, S., Xavier, J., Tavares, P., Moreira, P. and Guedes, R. M., "Comparative Failure Analysis of Pla, Pla/Gnp and Pla/Cnt-CooH Biodegradable Nanocomposites Thin Films," *Procedia Engineering*, Vol. 114, pp. 635-642, 2015.
- [28] Asif, M., Ramezani, M., Khan, K. A., Khan, M. A. and Aw, K. C., "Experimental and Numerical Study of the Effect of Silica Filler on the Tensile Strength of a 3d-Printed Particulate Nanocomposite," *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 347, No. 9, pp. 615-625, 2019.
- [29] Yao, T., Zhang, K., Deng, Z. and Ye, J., "A Novel Generalized Stress Invariant-Based Strength Model for Inter-Layer Failure of Fff 3d Printing Pla Material", *Materials & Design*, Vol. 193, pp. 108799, 2020.
- [30] Rahmati, A., Heidari-Rarani, M. and Lessard, L., "A Novel Conservative Failure Model for the Fused Deposition Modeling of Polylactic Acid Specimens," *Additive Manufacturing*, Vol. 48, pp. 102460, 2021.
- [31] Zhao, Y., Chen, Y. and Zhou, Y., "Novel Mechanical Models of Tensile Strength and Elastic Property of Fdm Am Pla Materials: Experimental and Theoretical Analyses," *Materials & Design*, Vol. 181, pp. 108089, 2019.
- [32] Rafiee, R. and Zehtabzadeh, H., "Predicting the Strength of Carbon Nanotube Reinforced Polymers Using Stochastic Bottom-up Modeling," *Applied Physics A*, Vol. 126, No. 8, pp. 595, 2020.
- [33] Prasad, P. N., Mark, J. E. and Fai, T., "Polymers and Other Advanced Materials," *Plemun Press*, New York, 1995.
- [34] Richardson, T. L. and Lokensgard, E., "Industrial Plastics: Theory and Applications," *Cengage Learning*, 2004.
- [35] Kulich, D. M., Gaggari, S., Lowry, V. and Stepien, R., "Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Polymers," *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, Vol. 1, 2002.



## کامپوزیت دمابالای سیانات استر/الیاف کربن با استحکام برشی بین لایه‌ای بالا بر پایه مونومر سنتز شده 2,2'-بیس(4-سیاناتوفنیل) پروپان

مهدی احمدی<sup>1</sup>، حسن فتاحی<sup>2\*</sup>، مهرزاد مرتضایی<sup>3</sup>، سید محمد جواد میرباقری<sup>1</sup>

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استادیار، شیمی پلیمر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- دانشیار، مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-1774، fattahi@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله:	چکیده
دریافت: 1403/01/14	سیانات استرها به دلیل خواص حرارتی-مکانیکی ویژه مانند دمای انتقال شیشه‌ای بالا، مدول بالا و ذغال‌گذاری عالی، برای تولید کامپوزیت‌های دمابالا با الیاف کربن مناسب هستند. پخت سیانات استر حرارت بالایی آزاد می‌کند، از طرفی کنترل حرارت آزاد شده برای تولید کامپوزیت از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از چرخه پخت توانایی کنترل حرارت آزاد شده در پخت سیانات استر در کامپوزیت را دارد. سیانات استر چسبندگی بالایی با الیاف کربن حتی در مقادیر کم ارائه می‌دهد و می‌توان از سیانات استر برای تهیه کامپوزیت‌های با کارایی بالا استفاده نمود. مونومر 2,2'-بیس(4-سیاناتوفنیل) پروپان از واکنش سیانوزن برماید و بیس فنول A سنتز و با طیف‌سنجی‌های FT-IR، <sup>1</sup> H-NMR و <sup>13</sup> C-NMR مورد شناسایی ساختاری قرار گرفت. رفتار پخت سیانات استر سنتز شده توسط آزمون DSC پویا تعیین و چرخه پخت مناسبی تعریف و کارایی چرخه پخت به صورت برخط توسط طیف‌نمایی FT-IR دنبال شد. کامپوزیت دمابالای سیانات استر/الیاف کربن با محتوای رزین‌های 30% و 44% تهیه و استحکام برشی بین لایه‌ای آن‌ها توسط آزمون ILSS مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج آزمون ILSS، خواص حرارتی-مکانیکی و مقاومت حرارتی کامپوزیت انتخاب شده توسط آزمون‌های DMTA و TGA مورد بررسی قرار گرفت. چرخه پخت تعریف شده برای پخت سیانات استر، قابلیت کنترل آنتالپی بالا و پخت رزین به میزان 95.6% را داشت. کاهش محتوای رزین در کامپوزیت به میزان 14% باعث بیشتر شدن ILSS به میزان 9% شد. در دماهای بالا، حتی در 250°C، مدول خمشی کامپوزیت تنها به مقدار 16% افت پیدا کرد. میزان ذغال‌گذاری کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن برابر 82.6% بود.
پذیرش: 1403/05/04	
کلیدواژگان	
رزین دمابالا، سیانات استر، تری‌آزین، کامپوزیت دمابالا، استحکام برشی بین لایه‌ای	

## High temperature cyanate ester/carbon fiber composite with high ILSS based on synthesized 2,2'-bis(4-cyanatophenyl) propane resin

Mahdi Ahmadi<sup>1</sup>, Hassan Fattahi<sup>2\*</sup>, Mehrzad Mortezaei<sup>3</sup>, Seyyed Mohammad Javad Mirbagheri<sup>4</sup>

1,2,3,4-Department of Polymer Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, fattahi@mut.ac.ir

### Keywords

High temperature resin, Cyanate ester, Triazine, High temperature composite, Interlaminar Shear Strength

### Abstract

Cyanate esters are one of the most suitable matrices for production of high temperature composites with carbon fibers due to their excellent thermo-mechanical properties. Since the curing of this resin has a high heat release, applying a suitable curing cycle has the ability to control the heat release during the curing. Cyanate ester provides high adhesion to carbon fibers even in less resin content, so cyanate ester can be used as a matrix for preparing advanced composites. 2,2'-bis(4-cyanatophenyl)propane resin was synthesized by the reaction of cyanogen bromide and bisphenol A. The synthesized resin was characterized by FT-IR, <sup>1</sup>H-NMR and <sup>13</sup>C-NMR spectroscopies. The curing behavior of cyanate ester resin was determined by DSC and a suitable curing cycle was defined and its efficiency was monitored by FT-IR. Cyanate ester/carbon fiber composite with 30% and 44% resin contents was prepared and their ILSS was determined and thermal and mechanical properties were investigated by DMTA and TGA. The defined curing cycle for 2,2'-bis(4-cyanatophenyl)propane had the ability to control the high heat release of curing reaction with the curing ability of the resin up to 95.6%. Cyanate ester has a high adhesion to carbon fibers in the composite even in the relatively low resin content 30%. Hence, the amount of ILSS was increased about 9% compared to the ILSS for composite with 44% resin content. At temperatures as high as 250 °C, composite had only 16% decrease in flexural modulus. The cyanate ester/carbon fiber composite had a char yield of 82.6%.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Ahmadi, M., Fattahi, H., Mortezaei, M., Mirbagheri, S. M. J., "High temperature cyanate ester/carbon fiber composite with high ILSS based on synthesized 2,2'-bis(4-cyanatophenyl) propane resin," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2419-2428, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2024959.1881>

## 1- مقدمه

اکثر رزین‌های گرماسخت توانایی برطرف کردن نیاز روزافزون به رزین زمینه با خواص عالی، در کاربردهای صنایع با کارایی بالا برای تولید قطعات کامپوزیتی را ندارند. در نتیجه این نیاز مهم، سنتز رزین‌های گرماسخت با کارایی بالا مانند اپوکسی‌های چندعاملی [1،2]، سیانات استرها [3،4]، بنزوکسازین‌ها [5] و بیس‌مالثیمیدها [6] ضروری است. از طرفی چسبندگی ذاتی ضعیف سطح الیاف و ترشوندگی ضعیف آن توسط رزین به صورت کلی منجر به فصل مشترک ضعیف و در نتیجه استحکام برشی بین لایه‌ای<sup>1</sup> پایین، بین الیاف و رزین پخت شده می‌شود [7،8]. رزین‌های سیانات استر به عنوان یکی از مهم‌ترین رزین‌های گرماسخت، برای تولید قطعات با کارایی بالا در نظر گرفته می‌شوند [9-11]. این رزین‌ها به دلیل خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی بالا، جزو برترین دسته از رزین‌های گرماسخت قرار می‌گیرند که از دیدگاه کاربرد در صنایع دائماً در حال رقابت با رزین‌های اپوکسی، بیس‌مالثیمید، بنزوکسازین و فنولیک هستند [12،13].

سیانات استرها در حال حاضر به واسطه ترکیبی از خواص عالی از جمله مدول و ILSS بالا [13]، دمای انتقال شیشه‌ای<sup>2</sup> بالا [14،15]، دمای شروع تخریب حرارتی<sup>3</sup> و ذغال‌گذاری [9،16،17]، مقاومت شیمیایی بالا، انبساط حرارتی پایین [11]، ثابت دی‌الکتریک و جذب رطوبت پایین [13،17،18] در کاربردهای الکترونیکی (برد مدارهای چاپی) و هوافضا (پوشش فداشونده قطعات حساس یا قطعات الکتریکی در معرض حرارت بالا) مورد استفاده قرار می‌گیرند. نسبت به رزین‌های اپوکسی دوعاملی، رزین سیانات استر دارای مدول خمشی و استحکام کششی بالا حتی در دماهای بالا ( $200^{\circ}\text{C}$ ) است [18-21].

هنگامی که سیانات استرها با رزین‌های دیگر مانند سامانه‌های تقویت‌شده اپوکسی، فنولیک یا بیس‌مالثیمید مقایسه می‌شود، رزین‌های سیانات استر علاوه بر خواص بالای خود، فرایندپذیری بهتری نسبت به آن‌ها دارند [6،22]. از سوی دیگر، هنگامی که آن‌ها با رزین‌های کمتر تجاری شده مانند پلی‌ایمیدها و پلی‌فنیل اکساید مقایسه می‌شود، رزین‌های سیانات استر دارای قیمت پایین‌تر و در عین حال فرایندپذیری بهتر و حتی خواص بسیار بالا، هستند [15]. رزین‌های سیانات استر سالیان زیادی است که توجه زیادی را به خود جلب کرده و به عنوان یک رقیب کلیدی برای دیگر رزین‌ها در کامپوزیت‌های با کارایی بالا برای صنایع هوافضا و الکترونیک مورد توجه قرار گرفته‌اند. رزین‌های سیانات استرها علاوه بر خواص مکانیکی و حرارتی بالای خود به دلیل چسبندگی مناسب به الیاف کربن برای کامپوزیت‌های دما بالا بسیار ارزشمند هستند [23،24].

رزین‌های سیانات استر به عنوان یکی از مهم‌ترین رزین‌های جایگزین برای تولید قطعات با کارایی بالا در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند در معرض محیط‌های حساس مانند میکروالکترونیک، هوانوردی و فضانوردی قرار گیرند [13،24]. این شرایط به موادی با خواص دی‌الکتریک برجسته، مقاوم در برابر رطوبت و خواص حرارتی-مکانیکی بسیار بالا نیاز دارند.

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی به منظور بهبود خواص سیانات استر انجام شده است. در یک مطالعه، کامپوزیت‌های سیانات استر/نانو گرافن اکساید تهیه شد و کامپوزیت‌ها مقاومت حرارتی بهتری در مقایسه با رزین سیانات استر خالص نشان دادند [12]. در مطالعه‌ای دیگر، نانوکامپوزیت‌های سیانات استر/سیلیکا میله‌ای تهیه شد و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها در

محدوده 55%-40 نسبت به رزین سیانات استر خالص افزایش یافت [13]. تهیه کامپوزیت سیانات استر و نانوالماس نیز ذغال‌گذاری و  $T_g$  رزین سیانات استر را نسبت به نمونه خالص، بهبود داده است [15]. از طرفی رزین سیانات استر نشان داده است که برای بهبود خواص مکانیکی وابسته به کاربرد، در ترکیب با رزین‌های گرمانرم مانند آکریلیک [25] و یا پلی‌ایمید گرمانرم [26] بسیار مناسب عمل می‌کند.

برای کاربرد مواد کامپوزیتی در صنایع هوافضا، یکی از نگرانی‌های اصلی، پایداری حرارتی اکسیداتیو مواد به دلیل قرار گرفتن در معرض دمای بالا است [11]. طول عمر و دوام مواد کامپوزیتی را می‌توان با بررسی ویژگی‌های مکانیکی-حرارتی تخمین زد. در حال حاضر در هواپیماها و پهپادها به دلیل سبک‌سازی قطعات، کامپوزیت‌های پلیمری با دمای بالا بر پایه رزین‌هایی مانند سیانات استر، بیس‌مالثیمید و بنزوکسازین، تولید و وابسته به خواص مورد نیاز در شرایط کاربری قطعه تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان آن‌ها، رزین‌های سیانات استر به عنوان مواد مهندسی پیشرفته که دارای چقرمگی مطلوب، خواص حرارتی بالا، چسبندگی عالی و دی‌الکتریک پایین هستند، بیشتر استفاده می‌شوند [14]. این رزین‌ها قبلاً به دلیل خواص دی‌الکتریک عالی در صنعت الکترونیک برای ساخت بردهای مدار چاپی استفاده شده‌اند [23]. بنابراین، استفاده از آن‌ها در قطعات الکترومغناطیسی مانند رادوم‌ها نیاز این شاخه از مواد با کارایی بالا را به میزان بالایی رفع می‌کند [25]. هنگامی که انواع رزین‌های زمینه برای یک کاربرد خاص معرفی می‌شوند، فرآیندهای ارزیابی و اعتبارسنجی یا مقرون‌به‌صرفه بودن باید برای پیش‌بینی خواص بلندمدت با توجه به شرایط کاربری انجام شود، زیرا این شرایط می‌تواند تعمیر و جایگزینی کامپوزیت‌های پلیمری را دچار اختلال کند [16-19].

رزین‌های سیانات استر با کارایی بالا، از واکنش بیس‌فنول‌ها با سیانوزن هالیدها در حضور یک آمین نوع سوم سنتز می‌شوند [14،15]. پخت این رزین گرماسخت، از طریق سه‌تایی شدن حلقوی<sup>4</sup> (در فرایند افزایشی) بدون ایجاد محصول فرار برای ایجاد حلقه‌های تری‌آزین و پلیمریزه شدن این حلقه‌ها از طریق گروه‌های عاملی سیانات متصل به واحدهای بیس‌فنیل، برای تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی که پلی‌سیانورات نامیده می‌شوند، رخ می‌دهد [14،27]. این سازوکار پخت، امکان فرایندپذیری بدون ایجاد حفره و چسبندگی سطحی مناسب در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف را فراهم می‌کند. آنتالپی واکنش پخت رزین سیانات استر در حدود  $690 \pm 50 \text{ J/g}$  است که تقریباً نسبت به آنتالپی پخت رزین اپوکسی ( $210 \pm 50 \text{ J/g}$ ) سه برابر است [28-30]. از این رو باید برای پخت رزین سیانات استر روش مناسبی به کار گرفته شود. گرمای زیاد ایجادشده در طول پخت رزین ممکن است دما را به شدت افزایش دهد و منجر به تخریب رزین داخل کامپوزیت شود. شروع تخریب حرارتی رزین سیانات استر در دماهای بیش از  $350^{\circ}\text{C}$  اتفاق می‌افتد [16]. تخریب حرارتی رزین‌های سیانات استر از طریق یک سازوکار مشترک که با جدا شدن زنجیر اصلی رزین توسط حرارت است، شروع می‌شود و با حلقه‌زدایی حلقه‌های سیانورات برای تولید انواع گونه‌های فرار و ذغال‌گذاری (ساختار باقی‌مانده‌ی غنی از کربن)، به اوج خود می‌رسد [16]. به همین دلیل است که پخت در مراحل مختلف، از جمله پخت اولیه و پس‌پخت، انجام می‌شود [14،23]. تخریب حرارتی ساختار پلی‌سیانورات‌ها در هوا از طریق آب‌کافت (هیدرولیز) سریع پیوند اکسیژن اتری بین حلقه‌های فنیل و تری‌آزین در دمای  $350-420^{\circ}\text{C}$

<sup>4</sup> Cyclotrimerization

<sup>1</sup> ILSS  
<sup>2</sup>  $T_g$   
<sup>3</sup>  $T_{5\%}$

استحکام برشی بین لایه‌ای کامپوزیت‌های سیانات استر/الیاف کربن تهیه شده، به کمک دستگاه استحکام برشی بین لایه‌ای با سرعت جابجایی 2 mm/min بر اساس استاندارد ASTM D-2344 انجام شد. ابعاد نمونه‌های مورد آزمون ILSS برابر با  $2.51 \times 5.35 \times 14.91 \text{ mm}^3$  برش داده و آماده شد. برای هر نمونه سه تکرار در نظر گرفته شده و نتایج با پراکندگی محاسبه شده از معادله STDEV Population با استفاده از نرم‌افزار اکسل گزارش شد. استحکام برشی بین لایه‌ای کامپوزیت به روش سه نقطه‌ای (استحکام برشی تیر کوتاه) با استفاده از نیروی وارد شده بر قطعه کامپوزیتی از معادله (1) محاسبه می‌شود:

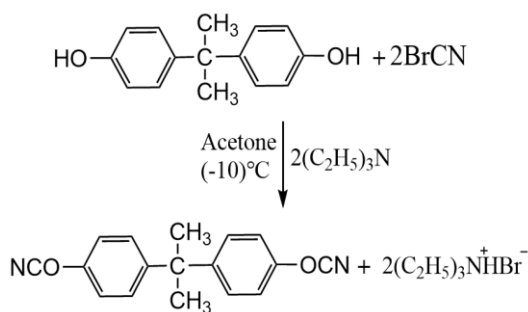
$$ILSS = \frac{3mg}{4bd} \quad (1)$$

در این معادله m بیشینه جرم نشان داده شده به وسیله نمایشگر دستگاه (kg)، و g نیروی گرانش زمین (9.82) و b عرض نمونه (mm) و d ضخامت نمونه (mm) است.

### 3- روش‌ها

#### 1-3- سنتز رزین 2،2-بیس(4-سیاناتوفنیل)پروپان

ابتدا برای خشک کردن استون، 400 mL استون درون ارلن ریخته شده و مقدار 10 g نمک سدیم سولفات به آن اضافه می‌شود. استون و سدیم سولفات مخلوط شده و به مدت 12 ساعت نگهداری شد. سپس نمک ته نشین شده و حلال خشک شده سرریز می‌شود. در یک بالن دو دهانه 100 mL مجهز به دستگاه همزن مغناطیسی، ورودی نیتروژن و آمپول برم، 4.423 g (0.015 mol) بیس فنول A را در دمای  $-15^\circ\text{C}$  در 50 mL استون خشک حل شد. در حین هم زدن 3.18 g (0.03 mol) سیانوژن برآمید به محلول واکنش اضافه شد. 4.2 mL (0.03 mol) تری اتیل آمین را که با 5 mL استون رقیق شده بود به کمک آمپول برم، به صورت قطره‌ای، به محیط واکنش در مدت زمان 30 دقیقه همراه با هم زدن مداوم، اضافه شد. پس از افزودن کامل تری اتیل آمین، مخلوط واکنش به مدت 4 ساعت در دمای  $-15^\circ\text{C}$  هم زده شد.



**Fig. 1** The mechanism of synthesis of 2,2-bis(4-cyanatophenyl)propane [15,31].

شکل 1 سازوکار سنتز مونومر 2،2-بیس(4-سیاناتوفنیل)پروپان [15,31].

سپس مخلوط تحت خلأ جداسازی شد تا نمک تری اتیل آمونیوم برآمید جداسازی شود. محلول جداسازی شده در آب مقطر سرد ریخته شد تا سیانات استر از محلول رسوب کند. رسوب تحت خلأ یکبار در آون با دمای  $50^\circ\text{C}$  و بار دیگر در دیسیکاتور برای جداسازی آب از رسوب، خشک شد. جامد بلوری سفیدرنگ بیس فنول A دی سیانات استر با بازده 93% و نقطه ذوب  $79 \pm 1^\circ\text{C}$ ، به دست آمد.

انجام می‌شود اما تجزیه حرارتی تحت شرایط بی اثر در دمای بالاتر ( $450^\circ\text{C}$ ) از طریق سازوکار هم کافت (همولیز) ساختار هیدروکربنی در محدوده دمایی ( $450-500^\circ\text{C}$ ) مستقل از ساختار شیمیایی گروه‌های پیونددهنده، بین حلقه‌های سیانورات صورت می‌گیرد [14,16].

در این کار پژوهشی، ابتدا مونومر سیانات استر بر پایه بیس فنول A سنتز و با روش‌های مختلف مورد شناسایی ساختاری قرار گرفت. سپس بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون DSC، چرخه پخت ویژه‌ای تعریف شد و کارایی چرخه پخت تعریف شده با تکنیک‌های DSC و FTIR مورد ارزیابی قرار گرفت. نهایتاً، کامپوزیت سیانات استر سنتز شده با الیاف کربن در دو ترکیب درصد مختلف تهیه و با آزمون ILSS مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت حرارتی و خواص مکانیکی-حرارتی کامپوزیت دما بالای تهیه شده با آزمون‌های TGA و DMTA مورد ارزیابی قرار گرفت.

### 2- تجربی

#### 1-2- مواد

بیس فنول A (99%)، سیانوژن برآمید (98%)، تری اتیل آمین (97%)، سدیم سولفات و استون (99.8%) برای سنتز رزین بیس فنول A دی سیانات استر از شرکت مرک آلمان تهیه شد. استون به عنوان حلال در سنتز رزین سیانات استر پیش از استفاده با سدیم سولفات خشک شد. برای تولید کامپوزیت بر پایه سیانات استر، از پارچه کربن (الیاف بلند) با جرم سطحی  $200 \text{ g/m}^2$  با بافت دوجهته (Plain) با ضخامت 0.25 mm استفاده شد.

#### 2-2- آزمون‌ها

برای ارزیابی سنتز رزین 2،2-بیس(4-سیاناتوفنیل)پروپان و نیز رفتار پخت آن طیف‌نمایی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR) مدل NICOLET 800 آمریکا ساخت شرکت Thermo Fisher Scientific در محدوده عدد موجی  $4000\text{cm}^{-1}$  تا  $400\text{cm}^{-1}$  استفاده شد. برای تحلیل نتایج آزمون FTIR و محاسبه درصد پخت طی انجام واکنش پخت به کمک محاسبه سطح زیر نمودار قله‌های مربوط به گروه‌های عاملی مدنظر، از نرم‌افزار Origin pro 2022 استفاده شد. برای بررسی دقیق‌تر نمونه‌ها، پخت بر روی یک قرص KBr انجام شد.

برای ثبت طیف‌های  $^1\text{H-NMR}$  و  $^{13}\text{C-NMR}$  از طیف‌نمایی تشدید مغناطیسی هسته 400 MHz مدل Bruker UltraShield ساخت آلمان و حلال دی متیل سولفوکسید دوتریم دار شده (DMSO-d6) استفاده شد. همچنین برای بررسی خواص حرارتی سیانات استر از دستگاه DSC مدل 200F3 ساخت شرکت NETZSCH آلمان در دمای محیط تا دمای  $350^\circ\text{C}$  با نرخ حرارت دهی  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  استفاده شد.

برای بررسی خواص مکانیکی-حرارتی کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن از دستگاه DMTA مدل DMA8000 ساخت شرکت Perkin-Elmer آمریکا، از دمای محیط تا دمای  $250^\circ\text{C}$  با نرخ حرارت دهی  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  و فرکانس Hz 1 با حالت بارگذاری خمشی استفاده شد. برای بررسی مقاومت حرارتی و میزان کاهش وزن رزین سیانات استر و کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن با دما از دستگاه TGA مدل STARe SW12 ساخت شرکت Mettler سوئیس، از دمای  $50^\circ\text{C}$  تا  $800^\circ\text{C}$  با نرخ حرارت دهی  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  استفاده شد.

<sup>1</sup> BADCy

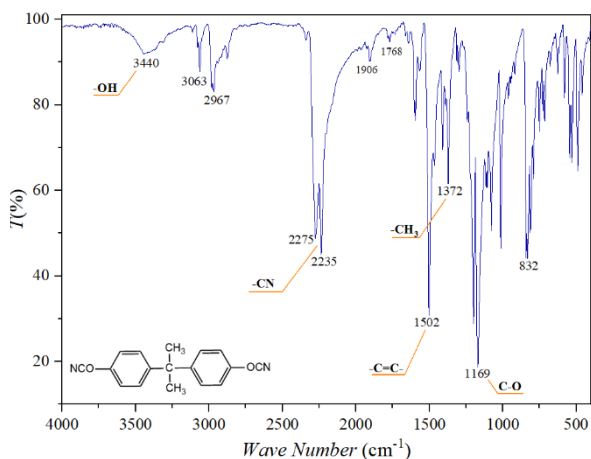


Fig. 2 FT-IR spectrum of synthesized 2,2'-bis(4-cyanatophenyl) propane monomer.

شکل 2 طیف FT-IR مونومر 2,2'-بیس (4-سیاناتوفنیل) پروپان سنتز شده.

### 3-4- طیف‌نمایی رزونانس مغناطیسی هسته

شکل 3 طیف  $^1\text{H-NMR}$  مربوط به رزین سیانات استر سنتز شده را نشان می‌دهد. قله تک شاخه در 1.64 ppm مربوط به هیدروژن‌های دو گروه متیل معادل است. قله‌های جذبی در 6.5 ppm تا 7.5 ppm مربوط به هیدروژن‌های حلقه بنزن است. به دلیل تراکم بالا برای وضوح بیشتر، ناحیه 6.5-7.5 ppm در شکل بزرگنمایی شده است. قله تک شاخه در 7.35 ppm مربوط به هیدروژن‌های آروماتیک حلقه بنزن است. این قله از همپوشانی قله‌های دودسته هیدروژن مربوط به حلقه بنزنی به وجود آمده که به دلیل معادل بودن دو طرف ساختار، اثر زیادی روی هم نداشته و به صورت تک شاخه در یک موقعیت ظاهر شده‌اند و الگوی شکافتگی مخصوص به خود، به حلقه‌های بنزن دو استخلافی از نوع پارا مربوط است. دو قله دوشاخه ضعیف واقع در محدوده جابه‌جایی شیمیایی 6.65-7 ppm با الگوی شکافتگی مخصوص به خود، به حلقه‌های بنزن دو استخلافی پارا برای بیس فنول A‌های واکنش نداده است. قله واقع شده در جابه‌جایی شیمیایی 9.25 ppm (که به صورت بزرگنمایی شده نیز نشان داده شده است)، مربوط به هیدروکسیل‌های بیس فنول A واکنش نداده می‌باشد.

انتگرال قله‌های سه دسته پروتون نشان داده شده در ساختار رزین در دو ناحیه 1.64 ppm و 7.3-7.4 ppm به ترتیب برابر 81.25 و 105.91 است (انتگرال دسته‌های پروتونی a و b قابل تمایز از یکدیگر نیستند). با تقسیم این اعداد به کوچک‌ترین مقدار، نسبت آن‌ها به صورت 1.3:1 درمی‌آید که با نسبت نظری 8:6 (نسبت پروتون‌های آروماتیک به آلیفاتیک) تطابق خوبی داشته و نشان از سنتز موفقیت‌آمیز رزین سیانات استر دارد.

شکل 4 طیف  $^{13}\text{C-NMR}$  مربوط به مونومر سیانات استر سنتز شده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در ساختار رزین 7 دسته کربن متفاوت از نظر موقعیت شیمیایی وجود دارد، در طیف  $^{13}\text{C-NMR}$  نیز 7 قله مشاهده می‌شود که مربوط به این دسته‌های کربنی می‌باشد. کربن مربوط به گروه سیانات در 108 ppm و کربن‌های مربوط به حلقه آروماتیک نیز در محدوده 115-150 ppm ظاهر شده‌اند. قله ظاهر شده در 32-43 ppm نیز مربوط به کربن‌های آلیفاتیک می‌باشد.

### 2-3- مطالعه چرخه پخت رزین سیانات استر

برای تعریف یک چرخه پخت مناسب برای رزین سنتز شده، ابتدا توسط آزمون DSC روی رزین خام، محدوده پخت رزین شناسایی شد و سپس با انتخاب دماهای حساس برای پخت و دنبال کردن هر کدام توسط آزمون FT-IR چرخه پخت برای رزین و کامپوزیت تعریف شد. رزین و کامپوزیت با چرخه پخت 150°C برای 1 ساعت، 180°C برای 1 ساعت، 210°C برای 3 ساعت، 240°C برای 2 ساعت و 270°C برای 5 ساعت با سرعت گرمادهی 1°C/min در مواقع پویا، پخت شدند.

3-3- تهیه کامپوزیت سیانات استر / الیاف کربن (BADCy/CF) به روش ذوبی  
برای تهیه کامپوزیت سیانات استر با الیاف کربن ابتدا رزین در دمای 90°C ذوب شد و سپس پارچه‌ی کربن با نسبت 1:1 با رزین آغشته شد. ابعاد پارچه کربن 15×8 cm<sup>2</sup> انتخاب شد تا 10 لایه به صورت مساوی حاصل شود. پس از اعمال رزین به سطح پارچه، اجازه داده شد تا پارچه آغشته شده به رزین در دمای محیط سرد شود و سپس به ابعاد 3×4 cm<sup>2</sup> به تعداد 10 عدد برش داده شد. به کمک حرارت جزئی، لایه‌چینی انجام شد. پس از لایه‌چینی، کامپوزیت-های تهیه‌شده با چرخه پخت تعریف‌شده در قبل، پخت شدند.

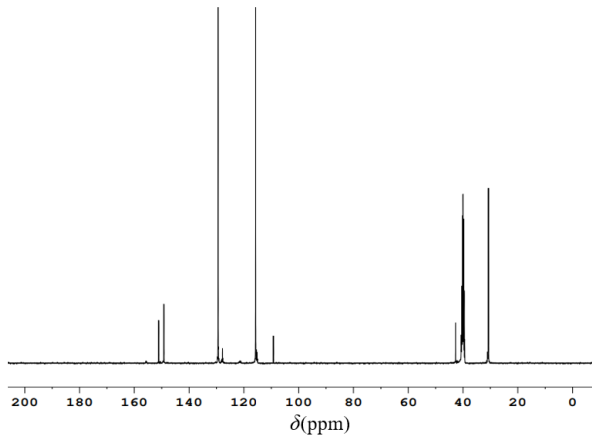
### 4- نتایج و بحث

#### 4-1- سنتز مونومر 2,2'-بیس (4-سیاناتوفنیل) پروپان

مکانیسم واکنش سنتز مونومر سیانات استر در شکل 1 نشان داده شده است. در این واکنش، حمله گروه هیدروکسیل بیس فنول A به کربن سیانوژن برماید باعث تولید هیدروژن برماید در محیط واکنش می‌شود. آمین نوع سوم به واسطه جذب هیدروژن برماید و رسوب دادن آن به صورت نمک آمونیوم برماید، باعث تسریع سنتز و جلوگیری از واکنش برگشت می‌شود. انجام واکنش در دمای پایین نیز از وقوع واکنش‌های جانبی جلوگیری کرده و منجر به خلوص بالای محصول می‌شود [23].

#### 4-2- طیف‌نمایی زیرقرمز تبدیل فوریه

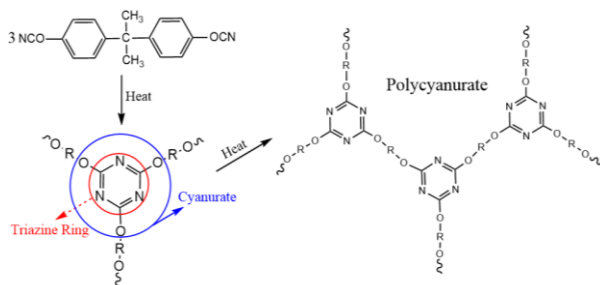
برای شناسایی ساختار مونومر سنتز شده BADCy از طیف‌نمایی FT-IR استفاده شد. طیف FT-IR رزین سنتز شده در شکل 2 نشان داده شده است. قله دوتایی در اعداد موجی 2275 cm<sup>-1</sup> و 2235 cm<sup>-1</sup> مربوط به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن گروه سیانات (-OCN) است. ارتعاشات کششی مربوط به C-H های آلیفاتیک و حلقه‌های بنزن نیز به ترتیب در اعداد موجی 3063 cm<sup>-1</sup> و 2967 cm<sup>-1</sup> ظاهر شده‌اند. نوار جذبی ظاهر شده در عدد موجی 1372 cm<sup>-1</sup> مربوط به ارتعاش خمشی متقارن گروه‌های متیل (-CH<sub>3</sub>) می‌باشد. نوار جذبی ظاهر شده در عدد موجی 832 cm<sup>-1</sup> مربوط به ارتعاشات خمشی خارج از سطح C-H های حلقه‌های آروماتیک دو استخلافی از نوع پارا می‌باشد. ارتعاش کششی پیوند C-O گروه سیانات در 1169 cm<sup>-1</sup> ظاهر شده است. نوارهای جذبی واقع شده در اعداد موجی 1502، 1567، 1595 و 1466 cm<sup>-1</sup> مربوط به ارتعاشات حلقه آروماتیک است. قله واقع در اعداد موجی 1768 cm<sup>-1</sup> و 1906 cm<sup>-1</sup> نیز نشان‌دهنده‌ی حلقه‌های بنزنی از نوع استخلاف پارا می‌باشد. قله‌ی جذبی واقع در 3440 cm<sup>-1</sup> نیز مربوط به گروه هیدروکسیل (-OH) بیس فنول A واکنش نداده می‌باشد.



**Fig. 4**  $^{13}\text{C}$ -NMR spectrum of synthesized 2,2-bis(4-cyanatophenyl) propane monomer.

شکل 4 طیف  $^{13}\text{C}$ -NMR مونومر 2,2-بیسیس (4-سیاناتوفنیل) پروپان سنتز شده.

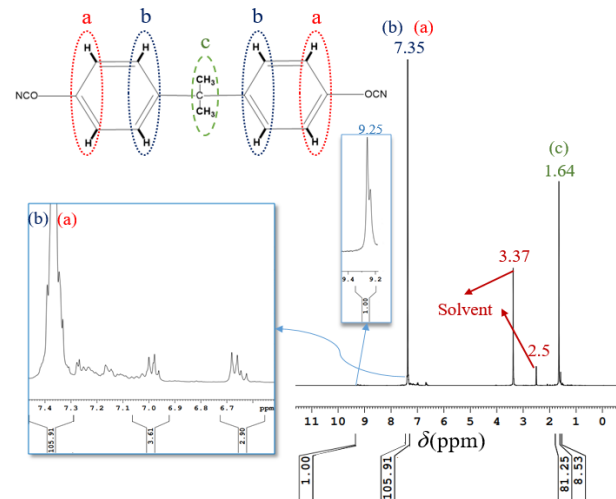
دما نگاشت DSC به دست آمده از مونومر سنتز شده سیانات استر در شکل 6 نشان داده شده است. قله گرماگیر در دمای  $79.6^\circ\text{C}$  مربوط به ذوب مونومر سیانات استر است. هدف از آزمون DSC بر روی نمونه خام، تعیین شرایط پخت مونومر و تعیین دماهای مهم برای پخت بود که همان طور که از منحنی مشخص است، محدوده پخت رزین از دمای  $152^\circ\text{C}$  شروع و تا حوالی  $334^\circ\text{C}$  ادامه داشته است و بیشینه دمای پخت که سرعت پخت و تشکیل حلقه‌های تری آزین در آن دما بیشترین مقدار را دارد، برابر  $235.7^\circ\text{C}$  است. بدیهی است که با تغییر سرعت حرارت دهی در آزمون DSC، دمای شروع و انتهای واکنش دستخوش تغییراتی می‌شود. رزین سیانات استر که خلوص 97% را طبق آزمون NMR نشان داده بود، آنتالپی‌های ذوب و پخت به ترتیب  $-71\text{ J/g}$  و  $691\text{ J/g}$  را نشان داد. این موضوع نشان می‌دهد که میزان ناخالصی در رزین سیانات استر سنتزی، بسیار پایین بوده و تقریباً بدون دخالت ناخالصی و یا عامل کاتالیزوری دیگری مانند بیس فنول A، رزین‌های نیمه سیانات دار شده بیس فنول A و یا واسطه‌ی ایمینوکربنات، پخت انجام و اتصال‌های عرضی به میزان بالایی ایجاد شده است.



**Fig. 5** Curing mechanism of cyanate ester and polycyanurate network formation [15,18].

شکل 5 سازوکار پخت رزین سیانات استر و تشکیل شبکه پلی سیانورات [15,18].

میزان آنتالپی بالای پخت رزین سیانات استر مشکلاتی را ایجاد می‌کند. یکی از مهم‌ترین مشکلات آنتالپی بالا، شعله‌ور شدن و تخریب کامپوزیت به واسطه آزاد شدن انرژی گرمایی بالا است. راه برطرف کردن این مشکل، انتخاب چرخه پخت مناسب برای پخت رزین سیانات استر است. زیرا قیل از دستیابی به برترین خواص مکانیکی و حرارتی، پخت مناسب یک رزین، اهمیت بسیار ویژه‌ای دارد. از طرفی انتخاب یک دما (پخت در دمای ثابت) معمولاً به



**Fig. 3**  $^1\text{H}$ -NMR spectrum of synthesized 2,2-bis(4-cyanatophenyl) propane monomer.

شکل 3 طیف  $^1\text{H}$ -NMR مونومر 2,2-بیسیس (4-سیاناتوفنیل) پروپان سنتز شده.

درصد خلوص مونومر سنتز شده یا به عبارت دیگر، مقدار بیس فنول A وارد واکنش نشده را می‌توان از روی انتگرال‌های مربوط به قیل مشاهده شده در طیف  $^1\text{H}$ -NMR (شکل 3) محاسبه نمود. بر اساس تعداد پروتون‌های OH بیس فنول A واکنش نداده و پروتون‌های آروماتیک رزین سنتز شده و انتگرال مشاهده شده برای هر دسته پروتون، می‌توان معادلات زیر را تشکیل داد.

$$\text{BPA:} \quad 2x = 1 \rightarrow x = 0.5 \quad (2)$$

$$\text{BADCy:} \quad 8y = 105.82 \quad (3)$$

$$x = 0.5, \quad y = 13.22$$

با حل معادلات فوق، مقادیر  $x$  و  $y$  به ترتیب به عنوان تعداد مول‌های بیس فنول A واکنش نداده و مونومر سیانات استر محاسبه می‌شود. با اعمال جرم مولی هر کدام از ترکیبات و با استفاده از معادله (4) می‌توان درصد خلوص رزین سیانات استر سنتز شده را محاسبه نمود. در این معادله،  $M_w(y)$  و  $M_w(x)$  به ترتیب نشان‌دهنده جرم مولی بیس فنول A ( $228.29\text{ g/mol}$ ) و مونومر سیانات استر ( $278.31\text{ g/mol}$ ) است.

$$P_{\text{BADCy}}\% = \frac{y \times M_w(y)}{x \times M_w(x) + y \times M_w(y)} \times 100 \quad (4)$$

بر اساس معادله (4)، خلوص محاسبه شده برای رزین سنتز شده برابر با 97% است که نشان از خلوص بالای مونومر سنتز شده و همچنین کارایی بالای روش انتخاب شده برای سنتز مونومر بدون انجام فرآیند خالص‌سازی می‌باشد.

#### 4-4 پخت مونومر 2,2-بیسیس (4-سیاناتوفنیل) پروپان

برای بررسی پخت سیانات استر سنتز شده از آزمون‌های DSC و FT-IR استفاده شد. سازوکار پخت سیانات استر در شکل 5 نشان داده شده است. برای تعیین و درک روند پخت سیانات استر، نیاز به مشاهده‌ی رفتار پخت می‌باشد. این موضوع به صورت دما دهی پویا به مونومر خام در آزمون DSC قابل انجام است تا پدیده‌ی گرماگیر ذوب و گرمازای پخت تعیین و اندازه‌گیری شود. از آنجایی که روند پخت و دماهای شروع، بیشینه و پایان پخت سیانات استر به شدت به میزان خلوص بستگی دارد [23]، برای تعیین دمای شروع و پایان پخت سیانات استر سنتز شده از آزمون DSC استفاده شد.

شده است. چرخه‌ی پخت تعریف شده از آزمون DSC، به قرص KBr آماده شده که رزین بر روی آن به صورت یک لایه‌ی نازک اعمال شده بود، در هر مرحله با دما و زمان‌های انتخاب شده، اعمال و سپس با انجام آزمون FT-IR روی قرص در هر مرحله، مورد بررسی قرار گرفت تا با بررسی روند کاهش شدت نوارهای جذبی مربوط به گروه سیانات و افزایش شدت نوار جذبی مربوط به حلقه‌ی تری‌آزین، میزان درجه پخت رزین دنبال شود (شکل 8). برای حذف اثر غلظت نمونه در شدت نوارهای جذبی طیف‌های ثبت شده، تمام مراحل پخت بر روی یک قرص انجام شد.

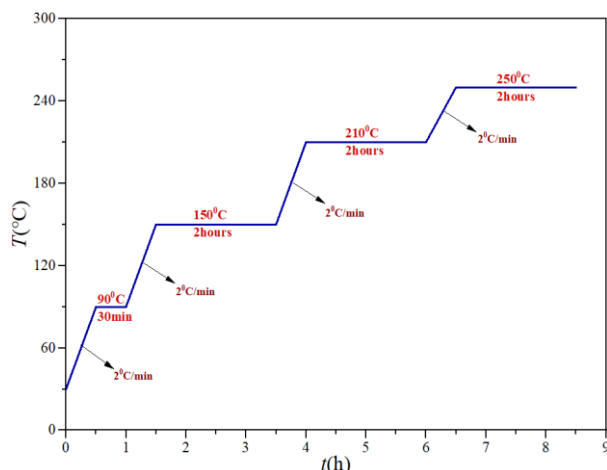


Fig. 7 Applied curing cycle for curing of cyanate ester and cyanate ester/carbon fiber composite.

شکل 7 چرخه پخت به کار رفته برای پخت سیانات استر و کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن.

همان‌طور که از شکل 8 مشخص است، باگذشت زمان و دما، شدت نوارهای جذبی واقع در اعداد موجی  $2235\text{ cm}^{-1}$  و  $2275\text{ cm}^{-1}$  که مربوط به گروه سیانات است، کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، شدت نوارهای جذبی واقع در اعداد موجی  $1375\text{ cm}^{-1}$  و  $1565\text{ cm}^{-1}$  که مربوط به حلقه‌های تری‌آزین است، افزایش می‌یابد. لذا از تغییرات شدت این قله‌ها می‌توان برای ارزیابی درجه پخت رزین استفاده نمود. برای این منظور، با انتگرال‌گیری از قله‌های شاخص مربوط به گروه سیانات، که هیچ تداخلی با نوارهای جذبی مجاور ندارد، به کمک رابطه (5) درجه پخت رزین (DOC) محاسبه شد [22]. میزان درجه پخت‌های محاسبه شده در جدول 1 خلاصه شده است.

$$DOC\% = \frac{A_0 - A_n}{A_0} \quad (5)$$

در این معادله، DOC میزان درجه پخت سیانات استر،  $A_0$  مساحت زیر قله  $2270\text{--}2230\text{ cm}^{-1}$  قبل از پخت و  $A_n$  مساحت زیر قله  $2270\text{--}2270\text{ cm}^{-1}$  در مرحله nام چرخه پخت است.

آزمون FT-IR برخط، نتایج مناسبی در ارتباط با میزان پخت نمونه و دنبال کردن گروه‌های عاملی شرکت‌کننده در فرایند پخت ارائه می‌دهد، اما برای اطمینان و بررسی این موضوع که آیا فرایند پخت به صورت کامل انجام شده است یا خیر، از مونومر پخت شده با چرخه‌ی پخت تعریف شده، آزمون DSC به عمل آمد تا از پخت کامل رزین و تشکیل شبکه‌ی پلی‌سیانورات اطمینان شود (شکل 9).

دلیل نیاز به مدت‌زمان‌های بسیار بالا، محدودیت‌هایی از نظر دستگاهی و اقتصادی ایجاد می‌کند. برای انتخاب یک چرخه پخت مناسب می‌توان از نتایج آزمون DSC که از نمونه خام گرفته شده است، استفاده کرد.

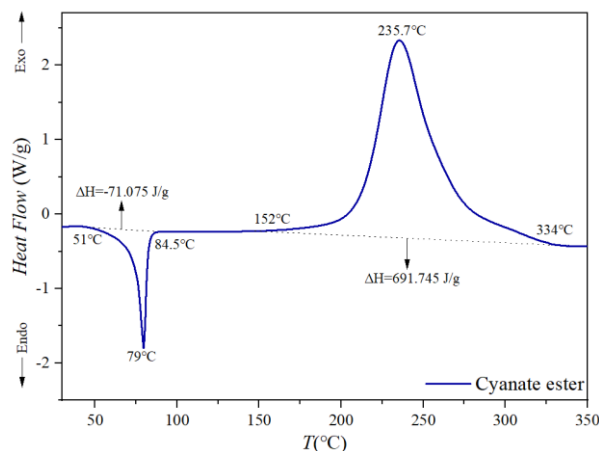


Fig. 6 DSC thermogram of synthesized cyanate ester.

شکل 6 دمانگاشت DSC برای سیانات استر سنتز شده.

#### 5-4- تعریف و ارزیابی چرخه پخت

بعد از ارزیابی دماهای مهم برای پخت رزین سیانات استر به کمک DSC، یک چرخه پخت مناسب برای پخت رزین به منظور دستیابی به خواص حرارتی و مکانیکی بالا تعریف شد. میزان حرارت‌دهی در چرخه پخت،  $1\text{ } \frac{\text{°C}}{\text{min}}$  در مواقع پویا در نظر گرفته شد. مطابق شکل 6، با توجه به اینکه شروع فرایند پخت دمای  $152\text{ }^\circ\text{C}$  است، حرارت‌دهی در دمای  $150\text{ }^\circ\text{C}$  به مدت 1 ساعت به عنوان اولین مرحله در چرخه پخت در نظر گرفته شد تا رزین قبل از شروع فرایند پخت، آماده وارد شدن به محدوده پخت رزین از دیدگاه حرارتی باشد. مرحله انتخابی دوم برای چرخه پخت، حرارت‌دهی در دمای  $180\text{ }^\circ\text{C}$  به مدت 1 ساعت است تا رزین‌های سیانات استر در تمامی بخش‌های سیستم بتوانند شرایط دمایی مورد نظر برای شروع پخت را به صورت یکسان داشته باشند. مرحله انتخابی سوم در چرخه پخت، حرارت‌دهی در دمای  $210\text{ }^\circ\text{C}$  به مدت 3 ساعت می‌باشد، زیرا در این دما سرعت پخت در حال بیشینه شدن است و این نشان می‌دهد که هرچه مدت‌زمان بالاتری به رزین داده شود، رزین‌های سیانات شرایط بهتری را برای تشکیل حلقه و ایجاد شبکه‌های منظم متشکل از تری-آزین، به دست خواهند آورد. مرحله چهارم چرخه پخت، دمای  $240\text{ }^\circ\text{C}$  به مدت 2 ساعت انتخاب شد تا بیشینه پخت اتفاق بیافتد و این اجازه را به تمامی زنجیره‌های موجود در شبکه بدهد تا شبکه‌ی پلیمری با بیشترین میزان اتصالات عرضی در تمام جهات شبکه حاصل شود. معمولاً رزین‌های گرماسخت برای پخت مناسب و تشکیل شبکه‌های منظم‌تر، نیازمند به پخت در محدوده دمای  $T_g$  خود هستند. از همین رو، دمای نهایی چرخه پخت نیز که به عنوان پس پخت شناخته می‌شود، دمای  $270\text{ }^\circ\text{C}$  به مدت 5 ساعت انتخاب شد تا پخت رزین در حوالی دمای  $T_g$  کامل شود. چرخه پخت به کار رفته برای پخت رزین به صورت شماتیک در شکل 7 نشان داده شده است.

#### 6-4- ارزیابی و تعقیب فرایند پخت سیانات استر توسط آزمون طیف‌نمایی زیرقرمز تبدیل فوریه

دنبال کردن برخط چرخه‌ی پخت توسط آزمون FT-IR یک روش ساده و کم هزینه برای اطمینان از مناسب بودن شرایط دمایی و زمانی چرخه پخت اعمال

جدول 1 سطح زیر قله‌ها در هر مرحله از چرخه پخت برای محاسبه درجه پخت سیانات استر.

**Table 1** The surface area of peaks at each stage of the curing cycle to calculate the degree of curing of cyanate ester resin.

2230-2270		عدد موجی (cm <sup>-1</sup> )					دما(°C)
270	240	210	180	25		سطح زیر قله	
215.72	382.92	664.86	799.15	2331.35	3086.84	4897.81	زمان پخت (h)
2	2	3	2	1	1	0	DOC (%)
95.6	92.1	86.4	83.6	52.4	38.2	0	

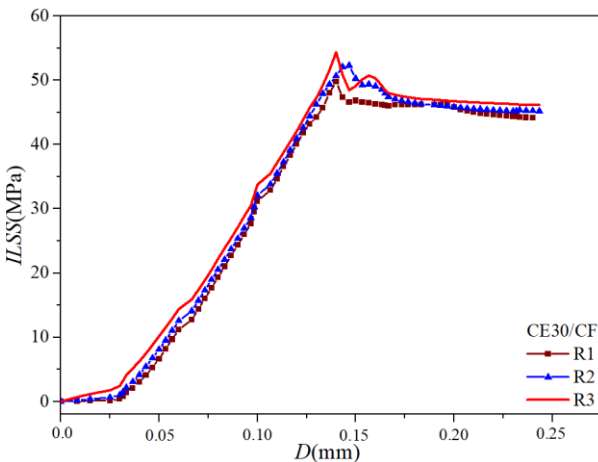
**7-4- ارزیابی خواص مکانیکی-حرارتی کامپوزیت دما بالای تهیه شده از سیانات**

**استر و الیاف کربن**

**1-7-4- استحکام برشی بین لایه‌ای**

برای بررسی تأثیر چرخه پخت بر روی میزان استحکام برشی بین لایه‌ای کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن از آزمون ILSS استفاده شد. دو نوع کامپوزیت با محتوای رزین 30% (CE30/CF) و 44% (CE44/CF) تولید شد. آزمون ILSS بر روی دو کامپوزیت تولید شده بر پایه‌ی رزین سیانات استر انجام شد (شکل‌های 10 و 11).

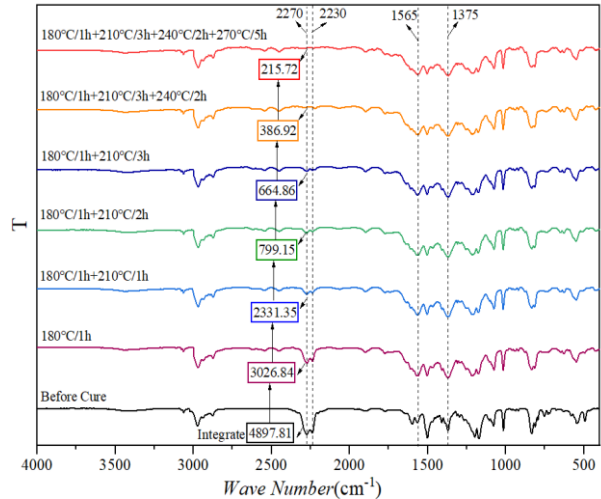
میزان ILSS محاسبه شده برای کامپوزیت‌ها (3 تکرار از نقاط متفاوت هر کامپوزیت) در جدول 2 خلاصه شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که کامپوزیت CE30/CF استحکام برشی بین لایه‌ای بالاتری دارد. این موضوع نشان می‌دهد که چسبندگی رزین سیانات استر به الیاف کربن بسیار مناسب است. از طرفی، میزان ILSS کامپوزیت CE30/CF نسبت به کامپوزیت‌های بر پایه رزین فنولیک بسیار بالاتر است.



**Fig. 10** Interlaminar shear strength of cyanate ester/carbon fiber composite (CE30/CF).

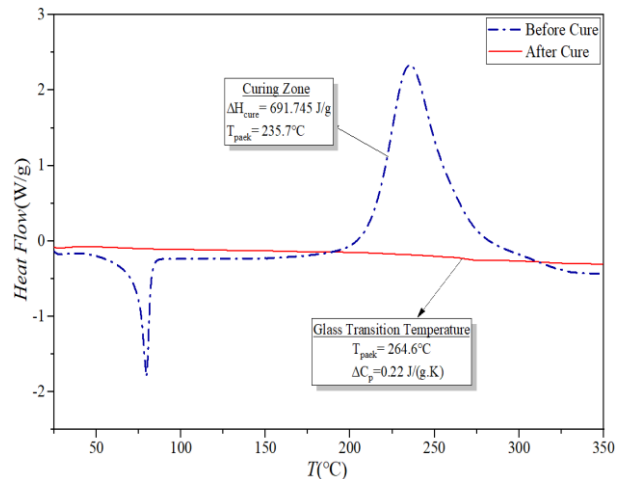
شکل 10 استحکام برشی بین لایه‌ای کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن (CE30/CF).

همان‌طور که در شکل 12 نیز قابل مشاهده است، رفتار شکست برشی بین لایه‌ای برای کامپوزیتی که محتوای رزین کمتری دارد رفتاری ترد و شکننده است، زیرا انتقال بار به الیاف در این کامپوزیت زودتر اتفاق می‌افتد. اما در کامپوزیت با محتوای رزین بیشتر، رفتار چقرمه‌تر است چون میزان رزین در بین لایه‌های کامپوزیت بیشتر است و رزین دیرتر بار را به الیاف منتقل می‌کند، به عبارت دیگر تمرکز تنش بر روی رزین اتفاق می‌افتد و همین موضوع باعث می‌شود تا بیشینه ILSS در کامپوزیت با محتوای رزین بیشتر، میزان پایین‌تری داشته باشد اما رفتار چقرمه‌تری نشان دهد.



**Fig. 8** FT-IR spectra in each step of applied curing cycle for curing of cyanate ester.

شکل 8 طیف‌های FT-IR در هر مرحله از چرخه پخت به کار رفته برای پخت سیانات استر.



**Fig. 9** Comparison of DSC thermogram of synthesized cyanate ester before and after Cure.

شکل 9 مقایسه دمانگاشت DSC برای سیانات استر سنتز شده قبل و بعد از پخت.

نتایج آزمون DSC برای رزین پخت شده نشان داد که هیچ‌گونه قله گرمایی در محدوده پخت رزین سیانات استر مشاهده نمی‌شود و این بیانگر آن است که رزین مورد نظر با چرخه پخت تعریف شده به‌طور کامل پخت شده است. به عبارت دیگر آزمون DSC نتایج آزمون FT-IR برای پخت رزین به‌صورت کامل را تأیید می‌کند.

#### 2-7-4- آنالیز حرارتی-مکانیکی پویا

در شکل 13، آزمون DMTA برای کامپوزیت CE30/CF نشان داده شده است. مدول خمشی کامپوزیت در دمای محیط، 15.13 GPa و در دمای 250°C، 12.61 GPa است. این موضوع نشان می‌دهد که افت مدول کامپوزیت سیانات استر با الیاف کربن حتی در دمای 250°C، تقریباً 16% است و در مقایسه با کامپوزیت‌های بر پایه رزین فنولیک که در دماهای بالاتر از 100°C افت شدید مدول دارند و خواص مکانیکی خود را تقریباً از دست می‌دهند، نشان‌دهنده خواص مکانیکی عالی کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن حتی در دماهای بالا است. این موضوع با ساختار زنجیره‌های پخت شده سیانات استر در ارتباط است. از دیدگاه ساختاری، انرژی گرمایی مورد نیاز برای جداسازی حلقه‌های تری‌آزین بسیار بالا است. از طرفی تشکیل حلقه‌های تری‌آزین به میزان بالا و شبکه‌ای شدن هرچه منظم‌تر و کارآمد این حلقه‌ها برای تشکیل شبکه پلی‌سیانورات در فرایند پخت، باعث می‌شود تا با مقاومت حرارتی بسیار مناسبی که تا دمای 250°C در ساختار شبکه پلی‌سیانورات ایجاد می‌شود (که نزدیک به دمای انتقال شیشه‌ای سیانات استر است)، اکثر نقاط شبکه به‌صورت مناسب به‌مانند دماهای پایین حفظ شود تا هم‌زمان، خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدشده میزان بسیار مناسبی را حتی در محیط‌های کاربری با دمای بالا داشته باشد.

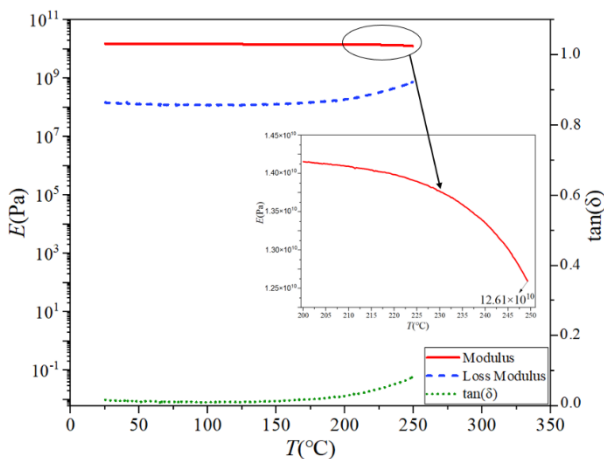


Fig. 13 DMTA curve for CE30/CF composite.

شکل 13 منحنی آزمون DMTA برای کامپوزیت CE30/CF.

برای مقایسه و درک بهتر بودن خواص کامپوزیت دارای 30% محتوای رزین، در شکل 14، آزمون DMTA برای کامپوزیت CE44/CF نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بالا بودن میزان رزین در بین لایه‌های الیاف باعث کاهش مدول اولیه رزین و همچنین افت بیشتر مدول در دمای 250°C است. با بزرگنمایی محدوده شروع افت مدول مربوط به کامپوزیت CE44/CF میزان 46.4% افت مدول در دمای 250°C، در این کامپوزیت مشاهده شده است. بیشتر بودن میزان رزین باعث شده تا در نزدیکی دمای انتقال شیشه‌ای رزین سیانات استر (حوالی دمای 250°C) مدول کامپوزیت نیز افت شدیدتری نسبت به کامپوزیت CE30/CF داشته باشد. با توجه به این نتیجه، استفاده از کامپوزیت‌های دارای محتوای رزین بالاتر از 30% رزین سیانات استر در قطعاتی که در دماهای بالایی مانند 250°C نیازمند حفظ خواص مکانیکی خود از جمله مدول هستند، مناسب نیست مگر در مواردی که خواص دیگری از این رزین مورد نیاز باشد.

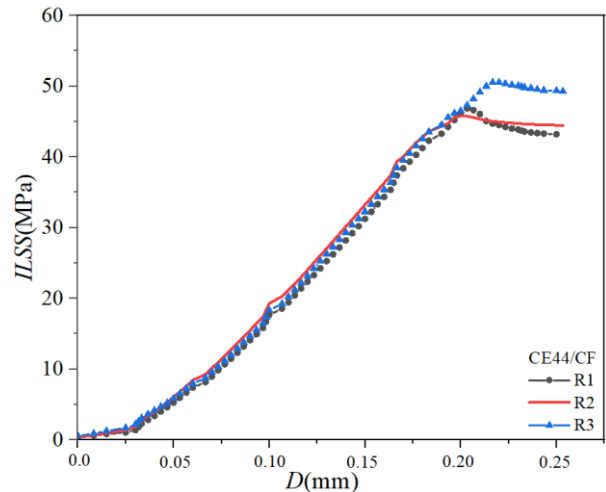


Fig. 11 Interlaminar shear strength of cyanate ester/carbon fiber composite (CE44/CF).

شکل 11 استحکام برشی بین لایه‌ای کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن (CE44/CF).

جدول 2 استحکام برشی بین لایه‌ای برای کامپوزیت‌های CE30/CF و CE44/CF

Table 2 Interlaminar shear strength for CE44/CF and CE30/CF composites.

ILSS(MPa)		نمونه‌ها
CE44/CF	CE30/CF	R1
46.84	49.76	R2
45.79	52.31	R3
50.52	54.36	میانگین
47.71±2	52.14±2	

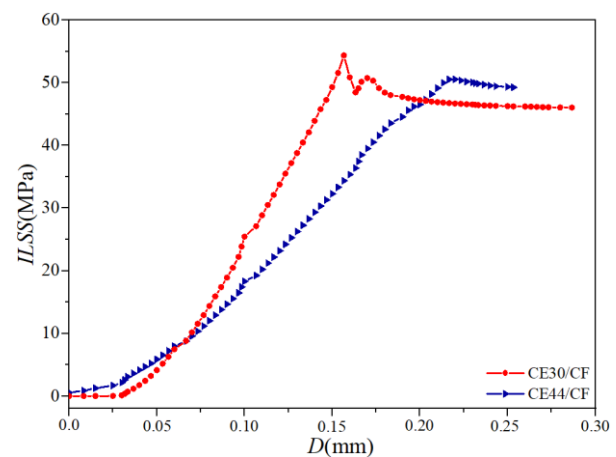


Fig. 12 Comparison of interlaminar shear strength of two composites CE44/CF and CE30/CF.

شکل 12 مقایسه استحکام برشی بین لایه‌ای دو کامپوزیت CE44/CF و CE30/CF.

چسبندگی رزین سیانات استر به الیاف کربن، زمینه لازم برای در کنار هم نگه‌داشتن لایه‌های الیاف را ایجاد می‌کند. این موضوع در حالی است که در اکثر مواردی که نتایج مناسبی از دیدگاه خواص مکانیکی در کامپوزیت‌های الیافی حاصل نمی‌شود، نقص مربوط به بحث چسبندگی در فصل مشترک زمینه پلیمری و الیاف است [8,32].

مرحله اتفاق می‌افتد و در دمای 800°C، ذغال‌گذاری کامپوزیت برابر 82.6% است. لذا، این مقدار ذغال‌گذاری بالا باعث می‌شود تا رزین سیانات استر در کامپوزیت به‌عنوان جزء خوداطفاء حریق عمل کرده و از تمرکز حرارت در یک نقطه و تخریب سریع کامپوزیت جلوگیری نماید. این موضوع به حضور الیاف در بین لایه‌های رزینی مربوط می‌شود. الیاف کربن خود دارای خواص حرارتی بسیار بالایی است. به‌نحوی که اکثر الیاف‌های کربن، در محیط‌های بی‌اثر، حداقل تا دمای 1000°C دچار هیچ تخریبی نمی‌شوند. از طرفی رزین سیانات استر در نقش بستر و جزء چسبناک برای نگهداشتن لایه‌های الیاف کربن عمل می‌کند و با خاصیت بسیار مناسب ذغال‌گذاری بالای خود، خوداطفائی حریق را در سیستم ایجاد می‌کند و از آسیب و تمرکز حرارت روی الیاف‌های سطحی جلوگیری می‌کند که این موضوع خود با خاصیت مقاومت حرارتی بسیار بالای الیاف کربن هم‌افزایی می‌کند و همین موضوع باعث می‌شود تا کاهش وزن در حرارت‌های بسیار بالا در کامپوزیت کمتر از رزین بدون الیاف باشد.

### 5- نتیجه‌گیری

مونومر سیانات استر 2،2-بیس (4-سیاناتوفنیل) پروپان با خلوص بالای 97% سنتز و شناسایی شد. برای کنترل حرارت بالای آزاد شده در حین فرایند پخت سیانات استر، یک چرخه پخت تعریف و به‌صورت برخط با آزمون FT-IR دنبال شد و نتایج آن نشان داد که پخت تقریباً کامل با موفقیت انجام شده است. در نتیجه، از این چرخه پخت برای پخت کامپوزیت‌های تولید شده از سیانات استر استفاده شد. میزان ILSS برای کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن در دو محتوای رزین 30% و 44% مورد بررسی قرار گرفت و کامپوزیت دارای 30% رزین، به مقدار 9% میزان ILSS بالاتری نشان داد. با توجه به نتایج آزمون ILSS، خواص مکانیکی کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن مورد بررسی قرار گرفت و در دماهای بالا، حتی در 250°C، مدول خمشی کامپوزیت تنها به مقدار 16% افت پیدا کرد که نشان از حفظ خواص مکانیکی کامپوزیت در دماهای بالا است. همچنین، مقاومت حرارتی و میزان ذغال‌گذاری کامپوزیت تحت اتمسفرهای هوا و نیتروژن نشان داد که این کامپوزیت حتی در دمای 800°C نیز دارای ذغال‌گذاری به میزان 82.6% می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن می‌تواند به‌عنوان یک کامپوزیت دما بالا با کارایی بالا در صنایع پیشرفته مانند صنایع هوافضا و الکترونیک مورد استفاده قرار گیرد.

### 6- مراجع

- [1] Kun, W., Guangming, Z., Lei, N., Yongkun, W. and Zhe, L., "Shape Memory Effect and Mechanical Properties of Cyanate Ester-Polybutadiene Epoxy Copolymer" *Journal of Polymer Research*, Vol. 21, pp. 1-6, 2014.
- [2] Pouladvand, A. R., Mortezaei, M., Fattahi, H. and Amraei, I. A., "A Novel Custom-Tailored Epoxy Prepreg Formulation Based on Epoxy-Amine Dual-Curable Systems" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 132, pp. 105852, 2020.
- [3] Jayalath, H., Herath, M. and Epaarachchi, J., "Cyanate Esters as a High Performing Shape Memory Polymer: A Review" *Materials Today: Proceedings*, Vol. 57, pp. 693-700, 2022.
- [4] Robles, J. B. and Hubert, P., "Material Characterization of Cyanate Ester Material for Structures with High Dimensional Stability Requirements" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 175, pp. 107747, 2023.
- [5] Ohashi, S., Kilbane, J., Heyl, T. and Ishida, H., "Synthesis and Characterization of Cyanate Ester Functional Benzoxazine and Its Polymer" *Macromolecules*, Vol. 48, No. 23, pp. 8412-8417, 2015.

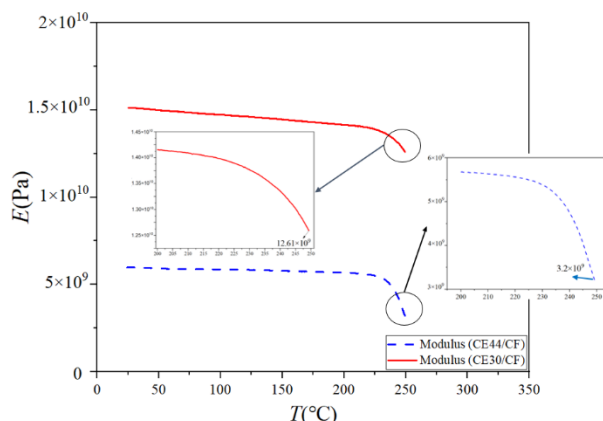


Fig. 14 Comparison of DMTA curve for two cyanate ester/carbon fiber composites with 30% and 44% resin content.

شکل 14 مقایسه منحنی آزمون DMTA برای دو کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن با محتوای رزین‌های 30% و 44%.

### 3-7-4- آنالیز گرما-وزن‌سنجی

برای تعیین رفتار حرارتی رزین سیانات استر و همچنین کامپوزیت آن با الیاف کربن، از آزمون TGA در اتمسفرهای هوا و نیتروژن استفاده شد (شکل 15). در اتمسفر هوا، تخریب حرارتی رزین سیانات استر در دو مرحله صورت می‌گیرد. مرحله اول شامل تخریب ساختار و تولید گازهای فرار است و مرحله دوم شامل ذغال‌گذاری و ادامه فرایند تجزیه می‌باشد. در اتمسفر نیتروژن تخریب حرارتی رزین سیانات استر فقط طی یک مرحله صورت می‌گیرد که شامل تجزیه ساختار و تولید محصولات فرار است که این مرحله باعث افت وزنی در حدود 63% شده و به دلیل عدم حضور اکسیژن، میزان ذغال‌گذاری رزین خالص در حدود 37% می‌باشد.

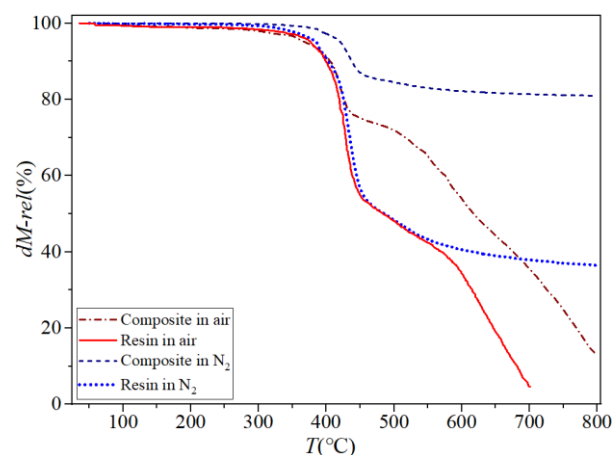


Fig. 15 TGA thermogram for cyanate ester resin and cyanate ester/carbon fiber composite in air and nitrogen atmospheres.

شکل 15 دمانگشت TGA برای رزین سیانات استر و کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن در اتمسفر هوا و نیتروژن.

افت وزنی کامپوزیت سیانات استر/الیاف کربن در اتمسفر هوا، به دلیل حضور الیاف کربن نسبت به رزین خالص کمتر است و علاوه بر این، تخریب حرارتی در دماهای بالاتر اتفاق می‌افتد و میزان ذغال‌گذاری کامپوزیت در دمای 800°C در حدود 14% می‌باشد. در اتمسفر نیتروژن با فرض این موضوع که الیاف کربن تا 1000°C مقاومت حرارتی دارد، افت وزنی کاملاً مربوط به رزین سیانات استر است. از طرفی، همانند رزین خالص، تخریب کامپوزیت در یک

- [24] Thunga, M., Lio, W. Y., Akinc, M. and Kessler, M. R., "Adhesive Repair of Bismaleimide/Carbon Fiber Composites with Bisphenol E Cyanate Ester" *Composites Science and Technology*, Vol. 71, No. 2, pp. 239-245, 2011.
- [25] Zhou, Z.-X., Li, Y., Zhong, J., Luo, Z., Gong, C.-R., Zheng, Y.-Q., Peng, S., Yu, L.-M., Wu, L. and Xu, Y., "High-Performance Cyanate Ester Resins with Interpenetration Networks for 3d Printing" *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 12, No. 34, pp. 38682-38689, 2020.
- [26] Liu, J., Fan, W., Lu, G., Zhou, D., Wang, Z. and Yan, J., "Semi-Interpenetrating Polymer Networks Based on Cyanate Ester and Highly Soluble Thermoplastic Polyimide" *Polymers*, Vol. 11, No. 5, pp. 862, 2019.
- [27] Salunke, A., Sasidharan, S., Cherukattu Gopinathapanicker, J., Kandasubramanian, B. and Anand, A., "Cyanate Ester-Epoxy Blends for Structural and Functional Composites" *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 60, No. 8, pp. 3260-3277, 2021.
- [28] Gholipour, I., Amiri, I., Fattahi, H. and Mortezaei, M., "Effect of Solid Epoxy Resin on Properties of an Epoxy/Glass Prepreg" *In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 34, No. 5, pp. 485-497, 2021.
- [29] Harismendy, I., Gómez, C. M., Río, M. D. and Mondragon, I., "Cure Monitoring of Catalysed Cyanate Ester Resins" *Polymer International*, Vol. 49, No. 7, pp. 735-742, 2000.
- [30] Mathew, D., Nair, C. R., Krishnan, K. and Ninan, K., "Catalysis of the Cure Reaction of Bisphenol a Dicyanate. A Dsc Study" *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 37, No. 8, pp. 1103-1114, 1999.
- [31] Baştürk, E., Şen, F., Kahraman, M. V. and Madakbaş, S., "Bisphenol a (Badcy)/Bisphenol P (Bpdcy) Cyanate Ester/Colemanite Composites: Synthesis and Characterization" *Polymer Bulletin*, Vol. 72, pp. 1611-1623, 2015.
- [32] Shahbakhsh, S., Khosravi, H. and Tohidlou, E., "Improvement in Interlaminar Shear Strength and Flexural Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composite Using Surface-Modified Carbonate Calcium" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 343-350, 2019.
- [6] Wu, G., Cheng, Y., Xie, Q., Liu, C., Kou, K., Zhuo, L. and Wang, Y., "Synthesis of a Bismaleimide/Cyanate Ester Copolymer Containing Phenolphthalein Functional Group with Excellent Dielectric Properties and Thermally Stable" *Journal of Polymer Research*, Vol. 21, pp. 1-8, 2014.
- [7] Faraji, M., Rezadoust, A. M. and Esfandeh, M., "Improvement of Delamination Resistance of Glass-Phenolic Composites through Matrix Toughening Mechanism Using Poly (Vinyl Butyral)" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 521-528, 2019.
- [8] Abdollahi, M., Fallahnejad, M. and Zamani, A., "Investigation the Flexural Behavior of Fiber Metal Laminates Containing Glass and Kevlar Fibers Subjected to Thermal Cycling" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 1, pp. 54-67, 2020.
- [9] Zhan, X., Wang, L., Zhang, J. and Cheng, J., "Synthesis, Properties and Cure Chemistry of a Novel Room-Temperature Liquid Cyanate Ester" *Materials & Design*, Vol. 88, pp. 1100-1108, 2015.
- [10] Ning, X., Dang, J., Yue, X. and Yuan, J., "Properties Analysis of Novel Composites for Space Robots" *Polymer composites*, Vol. 35, No. 3, pp. 564-569, 2014.
- [11] Goyal, S. and Cochran, E. W., "Cyanate Ester Composites to Improve Thermal Performance: A Review" *Polymer International*, Vol. 71, No. 5, pp. 583-589, 2022.
- [12] Tang, L., Dang, J., He, M., Li, J., Kong, J., Tang, Y. and Gu, J., "Preparation and Properties of Cyanate-Based Wave-Transparent Laminated Composites Reinforced by Dopamine/Poss Functionalized Kevlar Cloth" *Composites Science and Technology*, Vol. 169, pp. 120-126, 2019.
- [13] Mouliswar Reddy, A., Kandasubramanian, B. and Rath, S. K., "Cyanate Ester Blends and Composites to Improve Dielectric, Mechanical, and Thermal Performance for Functional Applications" *Polymer Bulletin*, pp. 1-56, 2023.
- [14] Kandelbauer, A., "Cyanate Ester Resins" *in: Handbook of Thermoset Plastics*, Eds., pp. 587-617: Elsevier, 2022.
- [15] Şen, F. and Kahraman, M. V., "Thermal Conductivity and Properties of Cyanate Ester/Nanodiamond Composites" *Polymers for advanced technologies*, Vol. 25, No. 9, pp. 1020-1026, 2014.
- [16] Ramirez, M. L., Walters, R., Lyon, R. E. and Savitski, E. P., "Thermal Decomposition of Cyanate Ester Resins" *Polymer degradation and stability*, Vol. 78, No. 1, pp. 73-82, 2002.
- [17] Corley, C. A., Guenther, A. J., Sahagun, C. M., Lamison, K. R., Reams, J. T., Hassan, M. K., Morgan, S. E., Iacono, S. T. and Mabry, J. M., "Di (Cyanate Ester) Networks Based on Alternative Fluorinated Bisphenols with Extremely Low Water Uptake" *ACS Macro Letters*, Vol. 3, No. 1, pp. 105-109, 2014.
- [18] Kessler, M. R., "Cyanate Ester Resins" *Wiley Encyclopedia of Composites*, pp. 1-15, 2011.
- [19] Cao, H., Liu, B., Ye, Y., Liu, Y. and Li, P., "Study on the Relationships between Microscopic Cross-Linked Network Structure and Properties of Cyanate Ester Self-Reinforced Composites" *Polymers*, Vol. 11, No. 6, pp. 950, 2019.
- [20] Alessi, S., Caponetti, E., Güven, O., Akbulut, M., Spadaro, G. and Spinella, A., "Study of the Curing Process of Dgeba Epoxy Resin through Structural Investigation" *Macromolecular Chemistry and Physics*, Vol. 216, No. 5, pp. 538-546, 2015.
- [21] Jahani, M., Fattahi, H. and Mortezaei, M., "Effect of Aromatic Amine Structure as a Curing Agent on Molecular Packing and Mechanical Properties of Cured Epoxy Resin" *In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 32, No. 3, pp. 267-276, 2019.
- [22] Payamani, M., Fattahi, H. and Mortezaei, M., "Synthesis and Characterization of 4,4'-Bis(Maleimido)Diphenylmethane Resin and Evaluation of Its Curing Behavior in Blending with Epoxy" *In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 339-352, 2022.
- [23] Hamerton, I., "Chemistry and Technology of Cyanate Ester Resins", Springer Science & Business Media, 2012.



## اثر نسبت پواسون منفی بر پاسخ مکانیکی و رفتار آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی تحت ضربه کم سرعت

رضا صارمیان<sup>1</sup>، مجید جمال امید<sup>2\*</sup>، جاماسب پیرکندی<sup>3</sup>، سید مهدی نبوی<sup>2</sup>، مهدی جهرمی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* ایران، تهران، صندوق پستی 19395-6835، j\_omidi@mut.ac.ir، m.jamalomidi@gmail.com

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در این مقاله، اثر نسبت پواسون منفی بر پاسخ مکانیکی و بهبود رفتار آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی تحت ضربه کم سرعت بررسی شده است. برای این منظور، یک کد متلب با هدف تعیین محدوده زوایای چیدمان برای دستیابی به هر دو نسبت پواسون منفی داخل صفحه و در ضخامت بر اساس تئوری کلاسیک لایه‌ای توسعه داده شده است. همچنین، مدل آسیب پیش‌رونده با استفاده از یک زیربرنامه VUMAT متشکل از معیار خرابی هاشین و پاک و مدل تکامل آسیب بر اساس روش کرنش معادل برای پیش‌بینی شروع و تکامل آسیب برای زمینه و الیاف نوشته و اجرا شده است. در فرآیند تحقیق، عملکرد ضربه‌پذیری چندلایه‌های آگرتیکی در مقایسه با چندلایه‌های کامپوزیتی با نسبت پواسون مثبت با چیدمان‌های متعامد و زاویه‌دار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد در برخی از حالت‌های آسیب، رفتار آگرتیکی می‌تواند منجر به بهبود آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی شود. بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج، بیشترین مقدار آسیب لایه‌لایه‌شدن، کششی زمینه، فشاری زمینه و کششی الیاف به ترتیب در چندلایه زاویه‌دار، آگرتیکی در ضخامت، متعامد و آگرتیکی در ضخامت مشاهده شده است. در این بین، چندلایه‌های متعامد، زاویه‌دار و آگرتیکی در ضخامت با ویژگی‌هایی همچون نیروی ضربه زیاد، زمان ضربه کم، بیشینه جابه‌جایی کم و انرژی اتلاف‌شده کمتر نسبت به چندلایه آگرتیکی داخل صفحه، برای کاربرد در سازه‌هایی با رویکرد طراحی دیوار سخت مناسب هستند. همچنین، چندلایه آگرتیکی داخل صفحه با ویژگی‌هایی مانند نیروی ضربه کم، زمان ضربه زیاد، جابه‌جایی زیاد و انرژی اتلاف‌شده بیشتر نسبت به سایر چندلایه‌های کامپوزیتی، برای استفاده در سازه‌های فداشونده کاربردی و عملیاتی است.

دریافت: 1403/01/28

پذیرش: 1403/04/31

### کلیدواژگان

چندلایه‌های کامپوزیتی آگرتیکی،  
نسبت پواسون منفی،  
تحلیل اجزای محدود،  
ضربه کم سرعت

## Effect of negative Poisson's ratio on mechanical response and damage behavior of carbon/epoxy composite laminates under low-velocity impact

Reza Saremian<sup>1</sup>, Majid Jamal-Omidi<sup>2\*</sup>, Jamasb Pirkandi<sup>3</sup>, Seyed Mehdi Nabavi<sup>4</sup>, Mehdi Jahromi<sup>5</sup>

1,2,3,4,5-Faculty of Aerospace Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 19395- 6835, Tehran, Iran, j\_omidi@mut.ac.ir, m.jamalomidi@gmail.com

### Keywords

Auxetic composite laminates  
Negative Poisson's ratio  
Finite element analysis  
Low-velocity impact

### Abstract

In this paper, the effect of negative Poisson's ratio on the mechanical response and improving the damage behavior of carbon/epoxy composite laminates under low-velocity impact is studied. For this purpose, a MATLAB code is developed to determine the range of sequence angles to achieve both negative Poisson's ratio in-plane and through-thickness based on CLT. Also, the progressive damage model is written and implemented using the user-material subroutine-VUMAT consisting of Hashin and Puck failure criteria and the damage evolution model based on the equivalent strain method to predict the initiation and evolution of damage for matrix and fiber. In the research process, the impact resistance performance of auxetic laminates is evaluated in comparison with composite laminates with positive Poisson's ratio with cross-ply and angle-ply sequences. The results showed that in some damage modes, auxetic behavior can lead to the improvement of composite laminate damage. Based on the analysis of the results, the highest damage amount of delamination, matrix tension, matrix compression, and fiber tension damage is observed in angle-ply, through-thickness auxetic, cross-ply, and through-thickness auxetic laminates, respectively. Meanwhile, cross-ply, angle-ply, and through-thickness auxetic laminates with characteristics such as high impact force, low impact time, low maximum displacement, and less dissipated energy than in-plane auxetic laminate are suitable for use in structures with hardwall design approach. Also, the in-plane auxetic laminate with features such as low impact force, high impact time, high displacement, and more dissipated energy than other composite laminates, is practical and operational for use in sacrificial structure.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Saremian, R., Jamal-Omidi, M., Pirkandi, J., Nabavi, S. M., Jahromi, M., "Effect of negative Poisson's ratio on mechanical response and damage behavior of carbon/epoxy composite laminates under low-velocity impact," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2429-2443, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2026596.1882>

## 1- مقدمه

در طول دو دهه گذشته، استفاده از مواد کامپوزیتی در کاربردهای صنعتی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. این مواد، استحکام ویژه و مدول ویژه بسیار بالاتری نسبت به معادل‌های فلزی خود دارند [1]. در حال حاضر، تقاضا برای مواد سبک‌وزن با استحکام بالا برای کاربردهای خاص در بازار رو به افزایش است. از این‌رو، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف مصنوعی یا طبیعی اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های متنوع باعث شده است که کامپوزیت‌ها در صنایع هوا-فضا، خودروسازی، عمرانی، زیست‌پزشکی، دریایی و بسیاری از صنایع تولیدی دیگر کاربرد پیدا کنند. عملکرد مناسب کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف در زمینه‌های کاربردی متعدد، آن‌ها را به جایگزینی امیدوارکننده نسبت به فلزات یا آلیاژها تبدیل کرده است [2-5].

برخلاف کامپوزیت‌های زمینه فلزی و سرامیکی، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری<sup>1</sup> (PMCs) رایج‌ترین مواد مورد استفاده در صنایع مختلف هستند. به دلیل کیفیت عالی و فرآوری نسبتاً ساده آن‌ها، استفاده از PMCs در صنایع مختلف مرسوم است. زیرا، این مواد دارای ویژگی‌های مکانیکی قوی و چگالی کم هستند [6،1]. PMCs تقویت‌شده با الیاف کربن<sup>2</sup> (CFRP)، به دلیل وزن کم، دوام بالا، مقاومت حرارتی خوب و خواص مکانیکی بالا، به‌طور گسترده در سازه‌های هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرند [7]. امروزه، استفاده از CFRP در بدنه هواپیما و قطعات موتور برای کاهش مصرف سوخت هواپیما افزایش یافته است [8]. با توجه به اهمیت معیار وزن در صنایع هوا-فضا، استفاده از کامپوزیت‌ها در این صنایع از اهمیت بسزایی برخوردار است. با این حال، این مواد دارای اشکال عمده شکننده بودن<sup>3</sup> و به‌ویژه حساس به ضربه هستند. این میزان حساسیت به ضربه، منجر به ابعاد بیش از اندازه بزرگ و در نتیجه، کاهش قابلیت آن‌ها برای اطمینان از استحکام باقی‌مانده پس از ضربه و همچنین موجب پیچیدگی تعمیر آسیب ناشی از ضربه می‌شود [9،10].

بر اساس تئوری کلاسیک کشسانی<sup>4</sup>، نسبت پواسون<sup>5</sup>، نسبت بین کرنش جانبی ( $\epsilon_t$ ) و کرنش محوری ( $\epsilon_l$ ) با علامت منفی- برای مواد همسانگرد<sup>6</sup> در محدوده -1 تا 0.5 است [12،11]. به‌طوری‌که، نسبت پواسون منفی در مواد کشسان خطی و مواد همسانگرد مجاز است. بیشتر مواد معمولی، تحت فشار (کشش) حجیم (کم‌حجم) می‌شوند و بنابراین رفتار نسبت پواسون مثبتی از خود نشان می‌دهند. در مقابل، مواد با نسبت پواسون منفی (آگزتیکی یا پادکشسان) تحت بارگذاری محوری، رفتار متناقضی از خود نشان می‌دهند. این مواد، تحت فشار (کشش) کم‌حجم (حجیم) می‌شوند. مواد آگزتیکی دارای یک نوع ویژگی تغییرشکل منحصربه‌فرد تحت اثر فرورفتگی هستند؛ به‌طوری‌که، مواد در اطراف ناحیه اعمال بار تمایل دارند به سمت نقطه محل اثر نیرو (ضربه) متمرکز شوند که باعث افزایش قابل توجه سختی موضعی<sup>7</sup> می‌شود. در صورتی که در شرایط بارگذاری مشابه، مواد با نسبت پواسون مثبت به سمت بیرون گسترش می‌یابند و فرورفتگی را آسان‌تر می‌کنند [13].

چندلایه‌های کامپوزیتی زاویه‌دار می‌توانند به دلیل ناهمسانگردی زیاد تک لایه و همچنین عدم تطابق<sup>8</sup> در کرنش بین لایه‌های مجاور، برای تولید نسبت

پواسون منفی طراحی شوند. تسای<sup>9</sup> و هان<sup>11</sup> [14]، دونگوا<sup>12</sup> [15]، ایوانز<sup>13</sup> [16] و برخی از محققین دیگر [17-20]، مقدار نسبت پواسون داخل صفحه،  $\nu_{12}$  منفی در چندلایه‌های زاویه‌دار<sup>14</sup> را استخراج نمودند. دونگوا [15]، تغییرات  $\nu_{12}$  را برای یک محدوده‌ی زاویه  $\theta$  [±θ] با دستگاه مختصات عمومی (کلی)<sup>15</sup> چندلایه، مدل نمود. وی گزارش داد که نسبت پواسون داخل صفحه منفی بین زاویه‌های 35 تا 50 درجه با دستگاه مختصات عمومی رخ می‌دهد. بیشترین نسبت پواسون منفی برای  $\theta$  برابر 25 درجه، با مقدار -0.245، در یک زاویه بارگذاری 40 درجه با دستگاه مختصات عمومی ملاحظه گردید. همچنین، مقدار نسبت پواسون برای زاویه‌های کوچک‌تر جهت‌گیری الیاف، جایی که  $\theta$  در محدوده 15-10 درجه قرار دارد، به‌طور قابل‌توجهی کاهش داشته است.

تسای و هان [14]، هراکوویچ<sup>16</sup> [21]، هرکاتی<sup>17</sup> [22]، کُنن<sup>18</sup> [23] و برخی محققین دیگر [15،16،24،25]، وجود نسبت پواسون در ضخامت منفی در چندلایه‌های زاویه‌دار را به‌صورت تجربی، تحلیلی<sup>19</sup> یا به‌روش اجزای محدود مطالعه کردند. هرکاتی [22]، با استفاده از چندلایه‌های زاویه‌دار با الیاف کولار، شیشه و کربن، کمترین مقدار نسبت پواسون منفی را برای مقادیر مختلف  $\theta$  [±θ] گزارش نمود. هراکوویچ [21]، با استفاده از تئوری چندلایه دوبعدی و معادلات ساختاری سه‌بعدی، چندلایه‌هایی با مقادیر  $\nu_{13}$  منفی مدل کرد و گزارش داد که  $\nu_{13}$  به‌طور اساسی با جهت‌گیری الیاف تغییر می‌کند. هراکوویچ [21] نشان داد که مقادیر نسبت پواسون در ضخامت منفی برای زاویه جهت‌گیری الیاف،  $\theta$ ، در محدوده 15 تا 40 درجه ممکن است و در چندلایه‌های متقارن ساده، به دلیل درجه بالای جفت‌شدگی برشی-عمودی<sup>20</sup> و اثر محدودکننده لایه‌های مجاور است.

تاکنون، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه بررسی مقاومت به‌ضربه سازه‌های کامپوزیتی آگزتیکی معطوف به ساختارهای مشبک یا متخلخل آگزتیکی هستند. درحالی‌که، یک راه‌حل برای افزایش مقاومت به‌ضربه کامپوزیت‌ها می‌تواند طراحی چندلایه‌های کامپوزیتی زاویه‌دار با رفتار آگزتیکی باشد که کمتر به آن پرداخته شده است. در این زمینه، آلدسون و همکاران [26]، مقاومت به‌ضربه با سرعت کم چندلایه‌های کامپوزیتی آگزتیکی CFRP با نسبت پواسون‌های نزدیک به صفر و مثبت را به‌صورت تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که در سطوح پایین انرژی ضربه، مقاومت به‌ضربه چندلایه‌های آگزتیکی بهتر است که می‌تواند نشان از یک وابستگی به نرخ در پاسخ چندلایه‌های آگزتیکی باشد. وانگ [27]، اثر نسبت پواسون در ضخامت منفی بر روی رفتار ضربه‌ای کم سرعت چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP را به‌صورت عددی بررسی نمود. نتایج تحلیل‌های اجزای محدود نشان داد که آسیب کششی الیاف و زمینه در چندلایه‌های آگزتیکی در مقایسه با چندلایه‌های غیر آگزتیکی به‌طور متوسط تا 40 درصد کاهش می‌یابد. همچنین، ملاحظه شد که چندلایه‌های آگزتیکی مزیت آشکاری در کاهش آسیب لایه‌لایه‌شدن یا آسیب فشاری زمینه ندارند. لین و همکاران [28]، اثر نسبت پواسون داخل صفحه منفی بر رفتار ضربه‌ای با سرعت کم چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در فعالیت

11 Hahn

12 Donoghue

13 Evans

14 Angle-ply laminate

15 Off-axis

16 Herakovich

17 Harkati

18 Coenen

19 Analytical

20 High degree of normal-shear coupling

1 Polymer matrix composites (PMCs)

2 Carbon fiber reinforced polymer

3 Durability

4 Being fragile

5 Classical theory of elasticity

6 Poisson's ratio

7 Isotropic

8 Local hardness

9 Mismatch

10 Tsai

## 2- نسبت پواسون داخل صفحه منفی، $\nu_{21}$ ، چندلایه‌ها

بر اساس روابط CLT [14]، رابطه تنش-کرنش در دستگاه مختصات عمومی مطابق با معادله (1) است.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{26} \\ S_{61} & S_{62} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن،  $S$  ماتریس سازگاری<sup>۳</sup> است. همچنین، رابطه تنش-کرنش در دستگاه مختصات عمومی برای یک کامپوزیت تک‌جهت بر حسب ثابت‌های مهندسی در معادله (2) آورده شده است.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{\nu_{16}}{E_6} \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{\nu_{26}}{E_6} \\ \frac{\nu_{61}}{E_1} & \frac{\nu_{62}}{E_2} & \frac{1}{E_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

با توجه به تقارن ماتریس سازگاری، می‌توان نوشت:

$$S_{12} = S_{21}, \quad S_{16} = S_{61}, \quad S_{26} = S_{62} \quad (3)$$

اندیس‌های نسبت‌های پواسون تقارن ندارند. زیرا تقارن ماتریس سازگاری منجر به معادله‌های متقابل (4) می‌شود.

$$\frac{\nu_{21}}{\nu_{12}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{S_{22}}{S_{11}}, \quad \frac{\nu_{61}}{\nu_{16}} = \frac{E_1}{E_6} = \frac{S_{66}}{S_{11}}, \quad \frac{\nu_{62}}{\nu_{26}} = \frac{E_2}{E_6} = \frac{S_{66}}{S_{22}} \quad (4)$$

رابطه تنش-کرنش داخل صفحه برای یک چندلایه به صورت رابطه بین منتهجه تنش<sup>۴</sup> و کرنش داخل صفحه است. رابطه تنش-کرنش داخل صفحه چندلایه‌های متقارن بر حسب سفتی، مطابق با معادله (5) است.

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن،  $N$  و  $A$  به ترتیب منتهجه تنش و ماتریس سفتی داخل صفحه<sup>۵</sup> برای یک چندلایه کامپوزیتی هستند. معادله (5) بر حسب سفتی چندلایه است که با معکوس کردن آن، ماتریس سازگاری متناظر مطابق با معادله (6) به دست می‌آید.

$$a = A^{-1} \quad (6)$$

این روابط تنش-کرنش برای تغییر شکل داخل صفحه چندلایه‌های متقارن هستند. بر اساس معادله (6)، ثابت‌های مهندسی مؤثر<sup>۶</sup> شامل: سفتی طولی<sup>۷</sup> مؤثر داخل صفحه، سفتی عرضی<sup>۸</sup> مؤثر داخل صفحه، سفتی برشی<sup>۹</sup> مؤثر داخل صفحه، نسبت پواسون مؤثر داخل صفحه، ضریب جفت‌شدگی برشی<sup>۱۰</sup> مؤثر داخل صفحه و ضریب جفت‌شدگی قائم<sup>۱۱</sup> مؤثر داخل صفحه به ترتیب در معادله (7) آورده شده است.

انجام شده، به منظور مقایسه خواص مکانیکی، چندلایه‌های کامپوزیتی با نسبت پواسون مثبت نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نواحی آسیب لایه‌لایه شدن در سطح مشترک‌های بالا و پایین و آسیب نواحی فشاری زمینه در لایه‌های بالا و پایین چندلایه‌های آگرتیکی داخل صفحه در انرژی‌های ضربه 5 و 8 ژول به ترتیب به طور میانگین 12.6 درصد و 38 درصد کاهش داشته است. همچنین برای انرژی ضربه 5 ژول، نواحی آسیب کششی زمینه چندلایه‌های آگرتیکی داخل صفحه در دو لایه بالا و دو لایه پایین کاهش داشته است. علاوه بر این، نواحی آسیب کششی الیاف چندلایه‌های آگرتیکی داخل صفحه به طور میانگین 14.6 درصد کاهش را نشان داده است.

تاکنون پژوهش‌های زیادی به بررسی رفتار و عملکرد چندلایه‌های متعامد<sup>۱</sup> تحت شرایط بارگذاری ضربه‌ای پرداخته‌اند [29-33]. همچنین، شرکت جنرال الکتریک به منظور مهار ضربه ناشی از جدایش پره فن موتور، از چندلایه‌های زاویه‌دار کربن/اپوکسی با زاویه قرارگیری الیاف در راستای  $\pm 60^\circ$  درجه در طراحی پوسته فن موتور جت استفاده کرده است. پیشرفتی که می‌تواند باعث کاهش قابل توجه وزن، کاهش مصرف سوخت و افزایش دوام موتور شود [34]. در این راستا، در این تحقیق به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد ضربه‌پذیری چندلایه‌های آگرتیکی در مقابل چندلایه‌های غیرآگرتیکی، چندلایه‌های کامپوزیتی با چیدمان‌های متعامد و زاویه‌دار (با زاویه  $\pm 60^\circ$  درجه) انتخاب شده است.

با توجه به هزینه‌های بالای آزمون‌های تجربی و همچنین دشوار بودن ثبت رفتار آسیب پیش‌رونده در حین آزمون‌های بارگذاری ضربه‌ای، بسیاری از محققین به منظور مطالعه رفتار و پاسخ کامپوزیت‌ها در شرایط بارگذاری ضربه‌ای به توسعه روش‌های عددی پرداختند. تاکنون مطالعات محدودی در خصوص عملکرد ضربه‌پذیری چندلایه‌های کامپوزیتی آگرتیکی CFRP تحت ضربه با سرعت کم انجام شده است. بنابراین، چگونگی روند آسیب در این نوع چندلایه‌ها تا حد زیادی ناشناخته باقی مانده است. از این رو، دستیابی به یک درک درست از رفتار آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی آگرتیکی CFRP منجر به بهبود عملکرد و استفاده از آن‌ها در کاربردهای سازه‌ای مقاوم به ضربه خواهد شد. در این راستا، در تحقیق حاضر مطالعه اثر نسبت پواسون منفی بر پاسخ مکانیکی با هدف بهبود رفتار آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی تحت اثر ضربه با سرعت کم مورد توجه قرار گرفته است. برای این کار، در ابتدا یک کد متلب به منظور مشخص نمودن محدوده زوایای قرارگیری الیاف برای دستیابی به هر دو نسبت پواسون داخل صفحه منفی و در ضخامت منفی بر اساس تئوری کلاسیک لایه‌ای<sup>۲</sup> (CLT) توسعه داده شده است. بر این اساس، چیدمان‌هایی که بیشترین مقدار منفی نسبت پواسون داخل صفحه و در ضخامت را دارند، استخراج شده است. همچنین، برای بررسی فرآیند رخداد آسیب چندلایه‌ها، مدل آسیب پیش‌رونده با استفاده از یک زیربرنامه VUMAT متشکل از معیار خرابی هاشین و پاک و مدل تکامل آسیب بر اساس روش کرنش معادل نوشته و اجرا شده است.

<sup>7</sup> Longitudinal modulus

<sup>8</sup> Transverse modulus

<sup>9</sup> Shear modulus

<sup>10</sup> Shear coupling coefficient

<sup>11</sup> Normal coupling coefficient

<sup>1</sup> Cross-ply laminate

<sup>2</sup> Classical lamination theory (CLT)

<sup>3</sup> Compliance matrix

<sup>4</sup> Stress resultant

<sup>5</sup> In-plane modulus matrix

<sup>6</sup> Effective engineering constants

که در آن،

$$\varepsilon = \varepsilon_i = \{\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3 \quad \varepsilon_6\}^T, \quad N = N_i = \{N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_6\}^T \quad (16)$$

ضرایب خارج از صفحه، در ماتریس سفتی داخل صفحه  $A$ ، ماتریس سفتی جفت‌شدگی  $B$  و ماتریس سفتی خمشی  $D$  کامپوزیت گنجانده شده است (معادله (17)).

$$A = A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} & A_{26} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & A_{36} \\ A_{16} & A_{26} & A_{36} & A_{66} \end{bmatrix}, \quad B = B_{ij} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} & B_{26} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} & B_{36} \\ B_{16} & B_{26} & B_{36} & B_{66} \end{bmatrix}, \quad D = D_{ij} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} & D_{26} \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} & D_{36} \\ D_{16} & D_{26} & D_{36} & D_{66} \end{bmatrix} \quad (17)$$

بنابراین، نسبت‌های پواسون مؤثر در ضخامت بر اساس معادله (18) قابل استخراج هستند.

$$v_{31}^{eff} = -\frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}}, v_{32}^{eff} = -\frac{\alpha_{32}}{\alpha_{22}} \quad (18)$$

درایه‌های ماتریس‌های سفتی  $A$ ،  $B$  و  $D$  در معادله (17)، با انتگرال‌گیری نشان داده شده در معادله (19) به‌دست می‌آیند.

$$[A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}] = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{ij}[1, z, z^2] dz \quad (19)$$

که در آن،  $Q_{ij}$  ضرایب سفتی در دستگاه مختصات عمومی منتقل‌شده از ماتریس سفتی در دستگاه مختصات محلی<sup>۴</sup>،  $Q$ ، برای گروه لایه نام هستند. مطابق با معادله (20)، ضرایب  $Q_{ij}$  بر اساس ضرایب سفتی در دستگاه مختصات محلی و زاویه لایه محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= Q_{xx}m^4 + (2Q_{xy} + 4Q_{ss})m^2n^2 + Q_{yy}n^4, \\ Q_{22} &= Q_{yy}m^4 + (2Q_{xy} + 4Q_{ss})m^2n^2 + Q_{xx}n^4, \\ Q_{33} &= Q_{zz}, \\ Q_{66} &= (Q_{xx} + Q_{yy} - 2Q_{xy} - 2Q_{ss})m^2n^2 \\ &+ Q_{ss}(m^4 + n^4), \\ Q_{12} &= (Q_{xx} + Q_{yy} - 4Q_{ss})m^2n^2 + Q_{xy}(m^4 + n^4), \\ Q_{13} &= Q_{xz}m^2 + Q_{yz}n^2, \\ Q_{16} &= (Q_{xx} - Q_{xy} - 2Q_{ss})m^3n \\ &+ (Q_{xy} - Q_{yy} - 2Q_{ss})mn^3, \\ Q_{23} &= Q_{yz}m^2 + Q_{xz}n^2, \\ Q_{26} &= (Q_{xx} - Q_{xy} - 2Q_{ss})mn^3 \\ &+ (Q_{xy} - Q_{yy} + 2Q_{ss})m^3n, \\ Q_{36} &= (Q_{xz} - Q_{yz})mn \end{aligned} \quad (20)$$

where  $m = \cos \theta$ ,  $n = \sin \theta$

$$\begin{aligned} E_1^{eff} &= \frac{1}{a_{11}h}, E_2^{eff} = \frac{1}{a_{22}h}, E_6^{eff} = \frac{1}{a_{66}h}, \\ v_{21}^{eff} &= -\frac{a_{21}}{a_{11}}, v_{12}^{eff} = -\frac{a_{12}}{a_{22}}, \\ v_{61}^{eff} &= \frac{a_{61}}{a_{11}}, v_{62}^{eff} = \frac{a_{62}}{a_{22}}, \\ v_{16}^{eff} &= \frac{a_{16}}{a_{66}}, v_{66}^{eff} = \frac{a_{26}}{a_{66}} \end{aligned} \quad (7)$$

در این روابط  $h$  ضخامت کل چندلایه است.

### 3- نسبت پواسون در ضخامت منفی، $v_{31}$ ، چندلایه‌ها

به‌منظور مطالعه اثر نسبت پواسون در ضخامت منفی چندلایه‌ها، روابط CLT [14] به‌صورت سه‌بعدی گسترش یافته است [35]. برای چندلایه‌ها با چیدمان دلخواه رابطه بین بار و تغییرشکل مطابق با معادله (8) است.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (8)$$

که در آن،  $M$ ،  $A$ ،  $D$ ،  $B$  و  $\kappa$  به‌ترتیب ممان خمشی، ماتریس سفتی کششی<sup>۱</sup>، ماتریس سفتی خمشی<sup>۲</sup>، ماتریس سفتی جفت‌شدگی<sup>۳</sup> و انحنا برای یک چندلایه کامپوزیتی هستند. بر اساس معادله (8)، معادله‌های (9) و (10) به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند.

$$\varepsilon = aN - aB\kappa \quad (9)$$

که در آن،  $a$  ماتریس سازگاری متناظر با ماتریس سفتی کششی است.

$$M = BaN + (D - BaB)\kappa \quad (10)$$

مطابق با معادله (11)، معادله‌های (9) و (10) را می‌توان به‌صورت ماتریسی نمایش داد.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -aB \\ Ba & D - BaB \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (11)$$

رابطه موجود در معادله (11) یک معکوس جزئی از معادله (8) است. به‌منظور استخراج معکوس کامل، بر اساس معادله (11) معادله‌های (12) و (13) به‌دست می‌آیند.

$$\kappa = -(D - BaB)^{-1}BaN + (D - BaB)^{-1}M \quad (12)$$

$$\varepsilon = [a + aB(D - BaB)^{-1}Ba]N - aB(D - BaB)^{-1}M \quad (13)$$

نمایش ماتریسی معادله‌های (11) تا (13) به‌صورت معادله (14) است.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a + aB(D - BaB)^{-1}Ba & -aB(D - BaB)^{-1} \\ -(D - BaB)^{-1}Ba & (D - BaB)^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (14)$$

در صورتی که ممان خمشی به چندلایه اعمال نشود، بردار کرنش مطابق معادله (15) به‌دست می‌آید.

$$\varepsilon = (a + aB(D - BaB)^{-1}Ba)N = \alpha N \quad (15)$$

<sup>3</sup> Coupling modulus matrix

<sup>4</sup> On-axis

<sup>1</sup> Extension modulus matrix

<sup>2</sup> Flexural modulus matrix

چنین موادی دارای پنج ثابت مهندسی مستقل است. با تعریف متغیرهای آسیب مختلف برای در نظر گرفتن تنزل مواد<sup>7</sup> در طول بارگذاری بعدی، معادلات ساختاری اصلاح شده<sup>8</sup> را می‌توان برای بیان رابطه تنش-کرنش لایه آسیب دیده استفاده کرد. بر این اساس، ماتریس سفتی تنزل یافته در معادله (26) نشان داده شده است.

$$C_d = \frac{1}{\Delta} \times \begin{bmatrix} d_f E_{xx}(1 - d_m v_{yz} v_{zy}) & d_f d_m E_{xx}(v_{yx} + v_{yz} v_{zx}) \\ d_m E_{yy}(1 - d_f v_{xz} v_{zy}) & \\ & sym \\ d_f E_{xx}(v_{zx} + d_f v_{yx} v_{zy}) & 0 \\ d_m E_{yy}(v_{zy} + d_f v_{xy} v_{zx}) & 0 \\ E_{zz}(1 - d_f d_m v_{xy} v_{yx}) & \Delta d_f d_m G_{xy} \\ & \\ & \\ & \\ & \\ \Delta d_f d_m G_{yz} & \Delta d_f d_m G_{xz} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (26)$$

که در آن،  $d_f$  و  $d_m$  به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{cases} d_f = (1 - d_{ft})(1 - d_{fc}), \\ d_m = (1 - S_{mt} d_{mt})(1 - S_{mc} d_{mc}), \\ \Delta = 1 - d_f d_m v_{xy} v_{yx} - d_m v_{yz} v_{zy} - d_f v_{xz} v_{zx} \\ - 2d_f d_m v_{yx} v_{zy} v_{xz} \end{cases} \quad (27)$$

که در آن،  $d_{ft}$ ،  $d_{fc}$ ،  $d_{mt}$  و  $d_{mc}$  به ترتیب متغیرهای آسیب برای الیاف و زمینه در حالت‌های کششی و فشاری هستند. پارامترهای  $d_{ft}$ ،  $d_{fc}$ ،  $d_{mt}$  و  $d_{mc}$  با روش‌های تکامل آسیب به دست می‌آیند. همچنین، ضرایب  $S_{mt}$  و  $S_{mc}$  برای از بین بردن اعوجاج عنصر<sup>9</sup> مربوط به تنزل سفتی برشی<sup>10</sup> معرفی شده‌اند. که مقادیر آن‌ها به ترتیب 0.9 و 0.5 در نظر گرفته شده است [37، 38]. تکامل آسیب، روشی را تعریف می‌کند که در آن سفتی چندلایه پس از شروع آسیب تنزل<sup>11</sup> می‌یابد. اغلب روش‌های تکامل آسیب سفتی ماده را در جهت رشد آسیب ناشی از حالت‌های مختلف آسیب، کاهش می‌دهند و در نتیجه ظرفیت حمل بار ماده کامپوزیت کاهش می‌یابد. در این تحقیق، از رویکرد کرنش معادل بر اساس انرژی شکست بحرانی عنصر [39]، برای مطالعه تکامل آسیب چندلایه‌ها استفاده شده است. که در آن متغیر آسیب مطابق با معادله (28) تعیین می‌شود:

$$d_i = \frac{\varepsilon_{eq,i}^f (\varepsilon_{eq,i} - \varepsilon_{eq,i}^0)}{\varepsilon_{eq,i} (\varepsilon_{eq,i}^f - \varepsilon_{eq,i}^0)} \quad (28)$$

با داشتن درایه‌های ماتریس سازگاری بر اساس معادله (20)، ماتریس سفتی با محاسبه معکوس ماتریس سازگاری حاصل می‌شود (معادله (21)).

$$Q = S^{-1} \quad (21)$$

#### 4- مدل آسیب کامپوزیت

به طور کلی دو نوع آسیب در چندلایه‌های کامپوزیتی وجود دارد که شامل آسیب لایه‌ای<sup>1</sup> و آسیب بین‌لایه‌ای<sup>2</sup> است. آسیب لایه‌ای شامل ترک‌های زمینه و شکسته شدن الیاف در کشش و فشار است. در حالی که، آسیب بین‌لایه‌ای به دلیل لایه‌لایه شدن چندلایه است. آسیب داخل لایه‌ای<sup>3</sup> شامل دو قسمت است؛ شروع آسیب که با یکی از معیارهای خرابی تعیین می‌شود و قسمت پیش‌رونده آسیب که می‌تواند خطی یا نمایی باشد. همچنین، آسیب بین‌لایه‌ای شامل دو بخش است؛ شروع آسیب که با یکی از معیارهای خرابی بین‌لایه‌ای مشخص می‌شود و قسمت پیش‌رونده آسیب که با روش‌های مبتنی بر انرژی تعیین می‌شود.

#### 4-1 مدل آسیب برای یک لایه

در این تحقیق، رفتار رخداد آسیب یک تک‌لایه تک‌جهته از الیاف کربن با استفاده از یک زیر برنامه VUMAT نوشته شده و به عنوان ابزار به کار گرفته شده است. معیار خرابی آسیب هاشین سه‌بعدی<sup>4</sup> برای حالت‌های خرابی الیاف و معیار پاک برای حالت‌های خرابی زمینه - به دلیل پیش‌بینی بهتر آسیب مواد زمینه برای ضربه فشاری عرضی<sup>5</sup> [36]- استفاده شده است. روابط مورد استفاده برای پیش‌بینی رخداد آسیب الیاف و زمینه به شرح زیر است:

- کشش الیاف

$$r_{ft} = \left( \frac{\sigma_{xx}}{X_T} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}} \right)^2, \quad \sigma_{xx} > 0 \quad (22)$$

- فشار الیاف

$$r_{fc} = \frac{|\sigma_{xx}|}{X_C}, \quad \sigma_{xx} < 0 \quad (23)$$

- کشش زمینه

$$r_{mt} = \left[ \left( \frac{\sigma_{xx}}{2X_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{yy}^2}{|Y_T Y_C|} + \left( \frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 \right] + \sigma_{yy} \left( \frac{1}{Y_T} + \frac{1}{Y_C} \right), \quad (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) > 0 \quad (24)$$

- فشار زمینه

$$r_{mc} = \left[ \left( \frac{\sigma_{xx}}{2X_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{yy}^2}{|Y_T Y_C|} + \left( \frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 \right] + \sigma_{yy} \left( \frac{1}{Y_T} + \frac{1}{Y_C} \right), \quad (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) < 0 \quad (25)$$

برای یک کامپوزیت چندلایه تک‌جهته، هر لایه به طور کلی به عنوان یک ماده همسانگرد عرضی<sup>6</sup> در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، ماتریس سفتی

<sup>1</sup> Laminar

<sup>2</sup> Inter-laminar

<sup>3</sup> Intra-laminar

<sup>4</sup> The 3D Hashin damage failure criterion

<sup>5</sup> Transverse compressive impact

<sup>6</sup> Transversely isotropic material

<sup>7</sup> Material degradation

<sup>8</sup> Modified constitutive equations

<sup>9</sup> Eliminate element distortion

<sup>10</sup> Shear stiffness degradation

<sup>11</sup> Degrades

چیدمان‌ها و خواص مؤثر چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیرآگزتیکی و آگزتیکی در جدول 2 آورده شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی لایه تک‌جهته T700GC/M21 [42]

Property		Values
Density		$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$
		$E_{xx} = 130 \text{ GPa}, E_{yy} = E_{zz} = 7.7 \text{ GPa},$
Modulus		$G_{xy} = G_{xz} = 4.8 \text{ GPa}, G_{yz} = 3.8 \text{ GPa}$
	Poisson's ratio	$\nu_{xy} = \nu_{xz} = 0.33, \nu_{yz} = 0.35$
Composite lamina	Strength	$X_T = 2080 \text{ MPa}, X_C = 1250 \text{ MPa},$
		$Y_T = 60 \text{ MPa}, Y_C = 140 \text{ MPa}$
		$S_{xy} = S_{xz} = S_{yz} = 110 \text{ MPa}$
Fracture energy		$G_{ft} = 133 \text{ N/mm}, G_{fc} = 40 \text{ N/mm},$
		$G_{mt} = 0.6 \text{ N/mm}, G_{mc} = 2.1 \text{ N/mm}$
Interface	Modulus	$E = 5 \text{ GPa}$
	Strength	$t_n^0 = t_s^0 = t_t^0 = 30 \text{ MPa}$
	Fracture energy	$G_n^c = 0.6 \text{ N/mm}, G_s^c = 2.1 \text{ N/mm}$

#### 6- شبیه‌سازی عددی ضربه کم سرعت

به‌منظور بررسی اثر نسبت پواسون منفی مؤثر بر رفتار و عملکرد ضربه‌پذیری چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP تحت شرایط ضربه کم سرعت، شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. در این بخش، ابتدا به‌منظور صحت‌سنجی فرآیند شبیه‌سازی عددی، از نتایج تحقیق انجام‌شده توسط هونگ کارنجاناکول<sup>9</sup> و همکاران [42] روی صفحه کامپوزیتی با چیدمان  $[0_2/45_2/90_2/-45_2]_s$  و ابعاد هندسی  $150 \times 100 \times 4$  میلی‌متر تحت ضربه کم سرعت استفاده شده است. در ادامه با توجه به اهداف تحقیق، به بررسی چیدمان‌های ارائه‌شده در جدول 2 پرداخته شده است.

در فرآیند مدل‌سازی چندلایه‌ها برای ساده‌کردن مدل و راندمان محاسباتی بهتر، با توجه به چیدمان‌های موردبررسی هر دو لایه مجاور با جهت الیاف یکسان به‌عنوان یک لایه در نظر گرفته شده است. در نتیجه، مدل نهایی در مجموع دارای هشت لایه و ضخامت هر لایه 0.5 میلی‌متر است. به‌منظور بررسی آسیب، از مدل آسیب پیش‌رونده‌ایی که با استفاده از زیربرنامه VUMAT نوشته شده، بهره گرفته شده است. خواص ماده مورداستفاده در فرآیند شبیه‌سازی عددی در جدول 1 آورده شده است. در این کار، پرتابه فولادی با سر نیمه‌کره‌ای با قطر 16 میلی‌متر و جرم متمرکز 2 کیلوگرم بر اساس اطلاعات مرجع [42]، مدل‌سازی شده است. سرعت پرتابه 5 متر بر ثانیه است که نشان‌دهنده انرژی ضربه‌ای 25 ژول است. صفحه کامپوزیتی، متناظر با شرایط اعمالی در مرجع [42] در بالای یک قاب صلب قرار گرفته و تمام درجات آزادی قاب صلب بسته شده است. همچنین، برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه چندلایه، جابه‌جایی گره‌ها بر روی مکان‌های مشخص شده در شکل 2 در راستای محور 3 مقید شده است.

برای اعمال تماس بین پرتابه، چندلایه کامپوزیتی، قاب تکیه‌گاه و همچنین تماس بین لایه‌ها از الگوریتم تماس عمومی با رفتار تماسی سخت و ضریب

که در آن،  $i$  نشان‌دهنده چهار حالت مختلف آسیب (آسیب‌های کششی و فشاری زمینه و الیاف) است. همچنین،  $\varepsilon_{eq,i} = X_i/E_{0,j}$ ،  $\varepsilon_{eq,i}$  کرنش شروع آسیب و کرنش پایان آسیب را نشان می‌دهند. علاوه‌براین، مدول اولیه چندلایه کامپوزیتی در جهت مربوطه،  $X_i$  استحکام زمینه یا الیاف،  $G_i$  انرژی شکست<sup>1</sup> بحرانی ماده و  $l_c$  طول مشخصه<sup>2</sup> عنصر هستند.

#### 2- مدل آسیب برای سطح مشترک

در این پژوهش، رفتار چسب بین لایه‌ها بر اساس روش مکانیک آسیب<sup>3</sup> و قانون کشش-جداش<sup>4</sup> دوخطی برای شبیه‌سازی آسیب بین‌لایه‌های چندلایه‌های کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. مدل آسیب بین‌لایه‌های شامل معیارهای شروع و تکامل آسیب است (معادله (29)). بر اساس این معادله، آسیب سطح‌مشترک زمانی آغاز می‌شود که تابع معیار خرابی تنش درجه دوم به عدد یک برسد [40].

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (29)$$

جاییکه  $t_n^0$  استحکام قائم و  $t_s^0$  و  $t_t^0$  استحکام‌های برشی سطح‌مشترک و همچنین  $t_n$ ،  $t_s$  و  $t_t$  کشش‌های<sup>5</sup> قائم و برشی هستند. علاوه بر این، مطابق با معادله (30) تکامل آسیب سطح‌مشترک بر اساس روش مکانیک شکست و مبتنی بر قانون بنزگاگ-کنان<sup>6</sup> (B-K) [41] در نظر گرفته شده است.

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{ \frac{G_s}{G_t} \right\}^\eta = G^c \quad (30)$$

که در آن،  $G_n^c$  و  $G_s^c$  به‌ترتیب انرژی شکست بحرانی در جهت قائم و برشی هستند. همچنین،  $G_s$  مقدار انرژی تلف‌شده<sup>7</sup> در جهت‌های برشی خارج از صفحه،  $G_t$  انرژی تلف‌شده کل در هر سه جهت و  $\eta$  ثابت ماده است که در این تحقیق 1.45 در نظر گرفته شده است [38].

#### 5- چندلایه‌های کامپوزیتی زاویه‌دار آگزتیکی

به‌منظور مطالعه پاسخ چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP در بارگذاری ضربه‌ای، چندلایه‌هایی شامل 8 گروه لایه<sup>8</sup> و به‌صورت متقارن در نظر گرفته شده است. برای شناسایی و استخراج چیدمان چندلایه‌هایی با بیشترین مقدار منفی نسبت پواسون داخل صفحه و در ضخامت، یک کد متلب توسعه داده شده است. به‌طوری‌که انتظار می‌رود بیشترین افزایش مقاومت ضربه‌ای حاصل شود. در این تحقیق، ماده موردبررسی الیاف تک‌جهته کربن T700GC با زمینه اپوکسی M21 است (جدول 1).

شکل 1، نتایج محاسباتی نسبت پواسون‌های داخل صفحه (1 (الف-ا)) و در ضخامت (1 (ب-ب)) چندلایه‌ها بر حسب تغییر زاویه  $\theta$  از 0 تا 90 درجه را نشان می‌دهد. مطابق با شکل 1 (الف-ا)، چیدمان  $[0_2/65_2/\theta_2/65_2]_s$  با  $\theta = 15$  درجه، بیشترین مقدار منفی نسبت پواسون داخل صفحه را برای یک چندلایه متقارن با 8 گروه لایه ایجاد می‌کند. به‌طور مشابه، بیشترین مقدار منفی نسبت پواسون در ضخامت برای یک چندلایه متقارن با 8 گروه لایه توسط چیدمان  $[25_2/-25_2/25_2/-25_2]_s$  حاصل می‌شود (1 (ب-ب)).

<sup>6</sup> Benzeggagh-Kenane

<sup>7</sup> Dissipated energy

<sup>8</sup> Ply pairs

<sup>9</sup> Hongkarnjanakul

<sup>1</sup> Fracture energy

<sup>2</sup> Characteristic length

<sup>3</sup> Damage mechanics

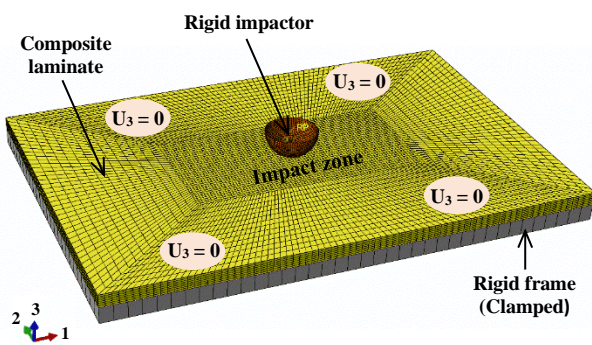
<sup>4</sup> Traction-separation

<sup>5</sup> Tractions

جدول 2 چیدمان‌ها و خواص مؤثر چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP با رفتار غیرآگزتیکی و آگزتیکی

**Table 2** Layups and effective properties of CFRP composite laminates with non-auxetic and auxetic behavior

$\nu_{21}^{eff}$	$\nu_{31}^{eff}$	$E_1^{eff}$ (MPa)	$E_2^{eff}$ (MPa)	$E_3^{eff}$ (MPa)	$E_6^{eff}$ (MPa)
Cross-ply laminate: $[0_2/90_2/0_2/90_2]_s$					
0.0366	0.3888	69.22	69.22	8.55	4.80
Angle-ply laminate: $[60_2/-60_2/60_2/-60_2]_s$					
0.3050	0.2513	9.78	44.99	8.25	26.24
In-plane auxetic laminate: $[15_2/65_2/15_2/65_2]_s$					
-0.3137	0.4914	40.95	24.30	8.10	5.84
Through-thickness auxetic laminate: $[25_2/-25_2/25_2/-25_2]_s$					
1.4898	-0.1260	63.31	8.92	8.10	21.57



**Fig. 2** Numerical simulations of laminated composite plate under low-velocity impact

شکل 2 شبیه‌سازی عددی صفحه کامپوزیتی چندلایه تحت ضربه کم سرعت

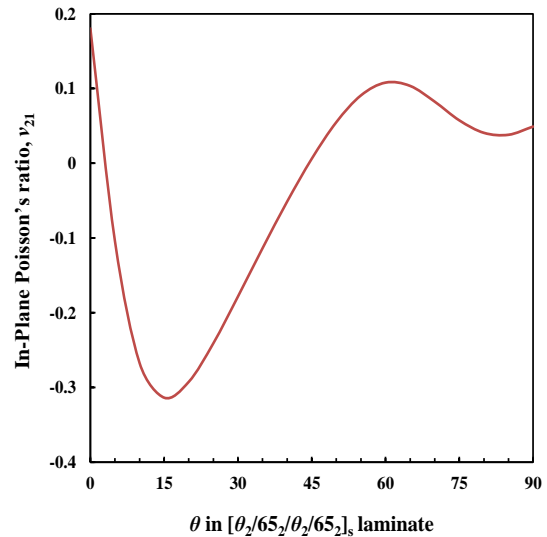
## 7- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از فرآیند شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج تجربی موجود مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، به مطالعه و مقایسه هم‌زمان رفتار چندلایه‌های آگزتیکی داخل صفحه و در ضخامت با چندلایه‌های غیرآگزتیکی متعامد و زاویه‌دار با هدف مطالعه اثر نسبت پواسون منفی بر بهبود عملکرد رفتار آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی در بارگذاری ضربه‌ای پرداخته شده است.

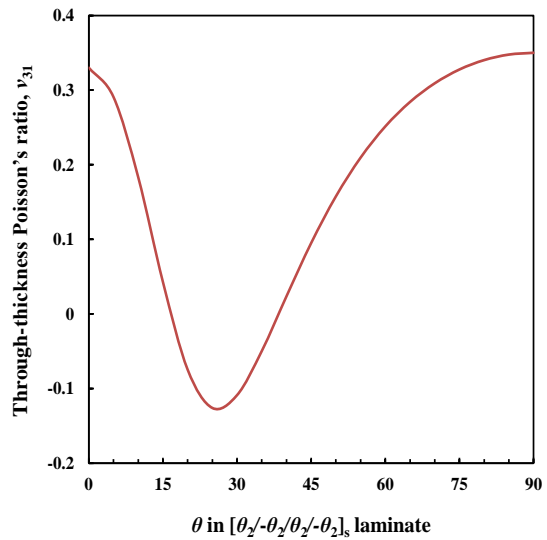
### 7-1- صحت‌سنجی فرآیند شبیه‌سازی عددی

به‌منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی شامل منحنی‌های نیرو-زمان و نیرو-جابجایی در مقایسه با نتایج آزمون تجربی [42] در شکل 3 نمایش داده شده است. مطابق با شکل 3 (الف)، تاریخچه نیروی پیش‌بینی شده از جمله بار بیشینه، زمان رسیدن به بار بیشینه و مدت زمان ضربه همخوانی خوبی با داده‌های تجربی دارند. همچنین، مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی در شکل 3 (ب)، نشان می‌دهد که رفتار کلی ضربه همخوانی قابل‌قبولی با داده‌های تجربی دارد. علاوه بر این، مقایسه الگوهای آسیب لایه‌لایه‌شدن بین نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمون تجربی [42] در شکل 4 ارائه شده است. به‌طورکلی، نتایج حاکی از آن است که فرآیند شبیه‌سازی عددی ضربه کم سرعت و الگوریتم محاسباتی زیربرنامه VUMAT استفاده‌شده در تحقیق حاضر، به‌خوبی قابلیت پیش‌بینی شروع و تکامل آسیب برای زمینه، الیاف و لایه‌لایه‌شدن را دارا است.

اصطکاک 0.3 [39،38،35] استفاده شده است. علاوه بر این، به‌منظور مطالعه اثر لایه‌لایه‌شدن از معیار B-K برای شروع و تکامل آسیب لایه‌لایه‌شدن استفاده شده است. برای گسسته‌سازی مدل اجزای محدود، چندلایه‌های کامپوزیتی به دو ناحیه مرکزی (ناحیه ضربه) و ناحیه بیرونی تقسیم شده‌اند. اندازه مش در ناحیه مرکزی و بیرونی به ترتیب 0.9 و 3.5 میلی‌متر لحاظ شده است که منجر به پیش‌بینی دقیق در ناحیه ضربه و همچنین کاهش هزینه محاسباتی می‌شود. چندلایه‌های کامپوزیتی با استفاده از المان‌های C3D8R گسسته‌سازی شده‌اند. درحالی‌که، پرتابه و قاب تکیه‌گاه به‌عنوان جسم صلب مدل‌سازی و با استفاده از المان‌های R3D4 گسسته شده‌اند.



(الف-ا)



(ب-ب)

**Fig. 1** Calculated layups to produce effective negative Poisson's ratio for CFRP composite laminates: (a) in-plane, and (b) through-thickness

شکل 1 چیدمان‌های محاسبه‌شده برای ایجاد نسبت پواسون منفی مؤثر برای چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP. (الف) داخل صفحه و (ب) در ضخامت

2-7- بررسی و مقایسه آسیب در چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP با رفتار غیرآگزتیکی و آگزتیکی

پاسخ کلی نیرو-زمان ناشی از ضربه کم سرعت چندلایه‌های غیرآگزتیکی و آگزتیکی در شکل 5 (الف-ا) نمایش داده شده است. بر اساس شکل 5 (ب-ب) چندلایه آگزتیکی داخل صفحه کمترین مقدار نیروی ضربه را نشان می‌دهد. در حالی که، چندلایه آگزتیکی در ضخامت در مقایسه با سایر چندلایه‌ها، نیروی ضربه بالاتری را نشان می‌دهد. مطابق با شکل 5 (ج-ج)، چندلایه آگزتیکی داخل صفحه زمان ضربه طولانی‌تری نسبت به سایر چندلایه‌ها دارد. در این بین، چندلایه آگزتیکی داخل صفحه بیشترین و چندلایه زاویه‌دار کمترین زمان ضربه را دارند که نزدیک به 16 درصد اختلاف را نشان می‌دهند. در این خصوص وانگ [27] نشان داد که چندلایه آگزتیکی در ضخامت، زمان ضربه کوتاه‌تری را نسبت به پیکربندی‌های غیرآگزتیکی  $[50_2/0_2/50_2/0_2/50_2]_s$  و  $[20_2/10_2/5_2/10_2/20_2]_s$  از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 5 (د-د) نشان داده شده است، چندلایه آگزتیکی داخل صفحه بیشترین مقدار بیشینه جابه‌جایی را دارد (17 درصد بیشتر از چندلایه زاویه‌دار). ضربه مکانیکی یک مسئله تماسی است که در آن مدول تماسی مؤثر<sup>1</sup> تابعی از مدول ضخامت<sup>2</sup> است [35]. همچنین، ضربه شامل خمش دومحوره است که در آن سفتی عرضی<sup>3</sup> نیز نقش مهمی ایفا می‌کند [27]. بنابراین، بالاتر بودن مدول‌های مؤثر طولی، عرضی و در ضخامت یک چندلایه منجر به افزایش مقاومت به ضربه آن می‌شود. علاوه بر این، رفتار آگزتیکی باعث بهبود مقاومت در برابر فرورفتگی می‌شود. به‌طور خاص، نیروی ضربه چندلایه آگزتیکی در ضخامت از چندلایه متعامد بیشتر است. در حالی که، مدول‌های مؤثر طولی، عرضی و در ضخامت چندلایه آگزتیکی در ضخامت نسبت به چندلایه متعامد کمتر است که این به دلیل اثر نسبت پواسون منفی در بهبود مقاومت به ضربه است.

انرژی اتلاف‌شده<sup>4</sup> به رفتار آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی مرتبط است. مقادیر انرژی اتلاف‌شده در شکل 5 (ه-ه) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، چندلایه متعامد انرژی اتلاف‌شده کمتری را نسبت به سایر چندلایه‌ها از خود نشان می‌دهد. بیشترین مقدار انرژی اتلاف‌شده مربوط به چندلایه آگزتیکی داخل صفحه است (حدود 22 درصد بیشتر از چندلایه متعامد).

مقایسه الگوهای آسیب لایه‌لایه‌شدن پیش‌بینی‌شده در هر سطح مشترک از چندلایه‌های غیرآگزتیکی و آگزتیکی در شکل 6 آورده شده است. در این شکل، رنگ‌های آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده ناحیه بدون آسیب و ناحیه با آسیب کامل هستند. همچنین، برای بررسی بیشتر اثر نسبت پواسون منفی بر آسیب لایه‌لایه‌شدن، مقایسه کمی از مساحت آسیب‌دیده لایه‌لایه‌شدن ناحیه مرکزی هر سطح مشترک از چندلایه‌های کامپوزیتی در شکل 7 نمایش داده شده است. مساحت‌های محاسبه‌شده برای المان‌هایی است که متغیر آسیب در آن‌ها از 0.5 بیشتر باشد. نتایج نشان می‌دهد که برای اغلب سطح مشترک‌ها، انتشار آسیب لایه‌لایه‌شدن تقریباً موازی با جهت‌گیری الیاف لایه زیرین فصل مشترک مربوطه است. این نتیجه با یافته‌های گزارش‌شده در مراجع [28، 38، 39] مطابقت دارد.

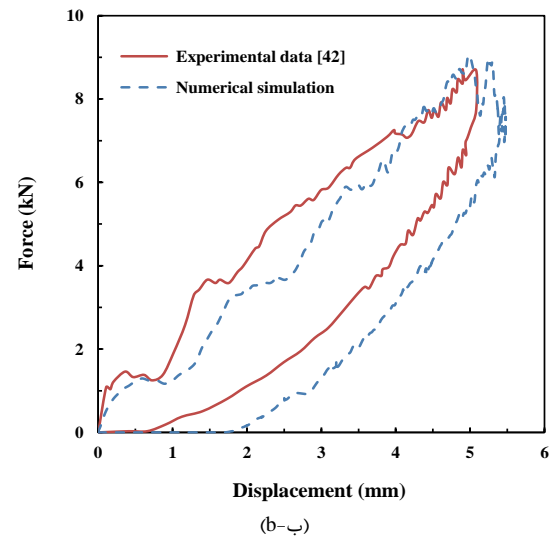
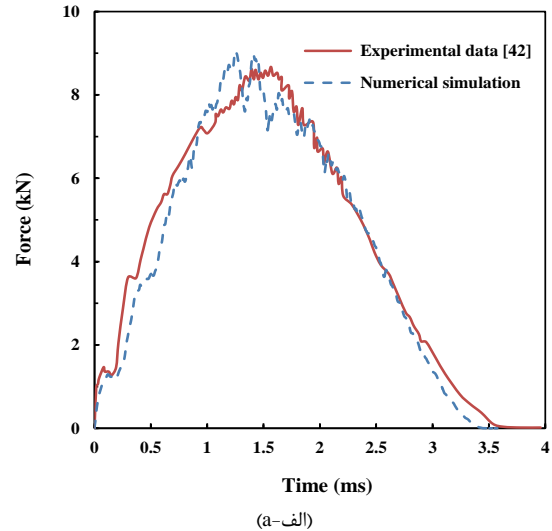


Fig. 3 Verification of numerical simulations with experimental data [42] under low-velocity impact: (a) load-time history, and (b) load-displacement curves

شکل 3 صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی [42] تحت ضربه کم سرعت: (الف) تاریخچه نیرو-زمان و (ب) منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی

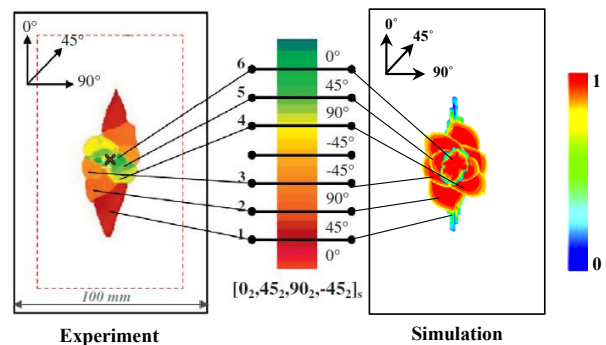
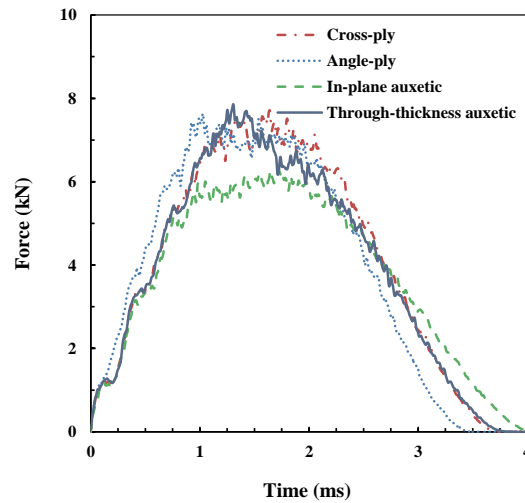


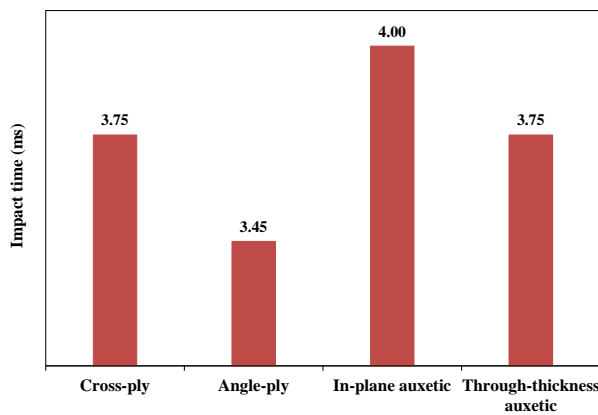
Fig. 4 Comparison of delamination damage patterns between the results of the numerical simulations with the experimental data [42] شکل 4 مقایسه الگوهای آسیب لایه‌لایه‌شدن بین نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی [42]

<sup>3</sup> Transverse stiffness  
<sup>4</sup> Dissipated energy

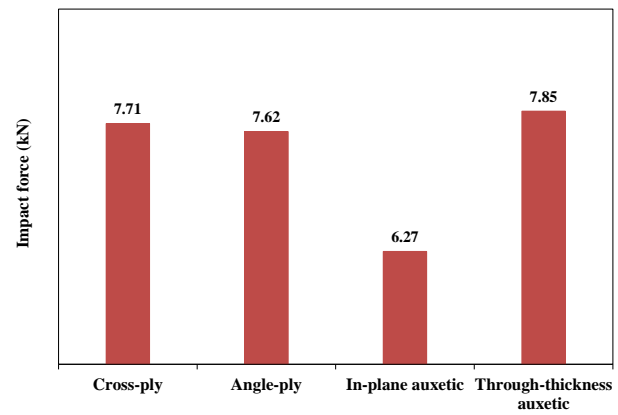
<sup>1</sup> Effective contact modulus  
<sup>2</sup> Through-thickness modulus



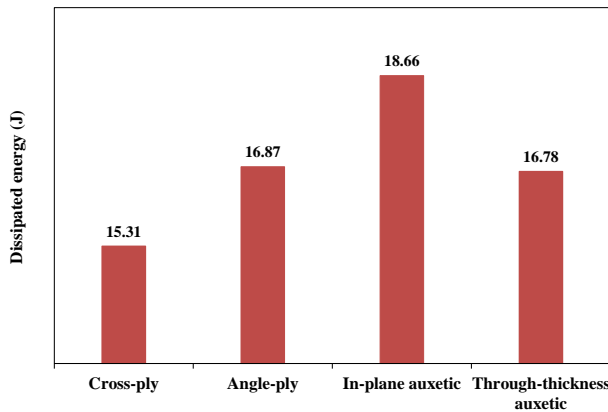
(الف-ا)



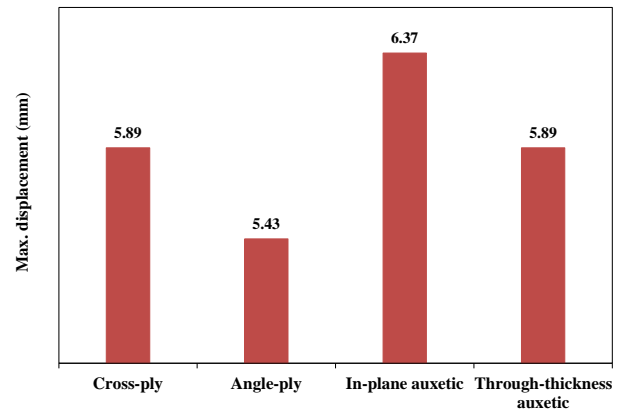
(ج-ب)



(ب-ب)



(ع-ب)



(د-ب)

**Fig. 5** The impact response of the non-auxetic and auxetic CFRP composite laminates: (a) Overall force-time response, (b) impact force, (c) impact time, (d) maximum displacement, and (e) dissipated energy

شکل 5 پاسخ ضربه چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیراگزوتیکی و اگزوتیکی: (الف) پاسخ کلی نیرو-زمان، (ب) نیروی ضربه، (ج) زمان ضربه، (د) بیشینه جابه‌جایی و (ه) انرژی اتلاف‌شده

مؤثر می‌تواند منجر به اثر نامطلوب بر انتشار آسیب لایه‌لایه‌شدن شود. همچنین، لین و وانگ [28] اظهار داشتند ایجاد نسبت پواسون منفی داخل صفحه برای کاهش نواحی آسیب لایه‌لایه‌شدن در سطح‌مشترک‌های بالا و پایین به‌ویژه در انرژی‌های ضربه نسبتاً بالا می‌تواند مفید باشد.

بر اساس شکل‌های 6 و 7، بیشترین آسیب لایه‌لایه‌شدن به‌ترتیب مربوط به چیدمان‌های زاویه‌دار و متعام است که در سطح‌مشترک اول رخ می‌دهد. در رابطه با اثر نسبت پواسون منفی بر آسیب لایه‌لایه‌شدن، وانگ [27] گزارش داد وجود نسبت پواسون منفی در ضخامت و همچنین افزایش مدول عرضی

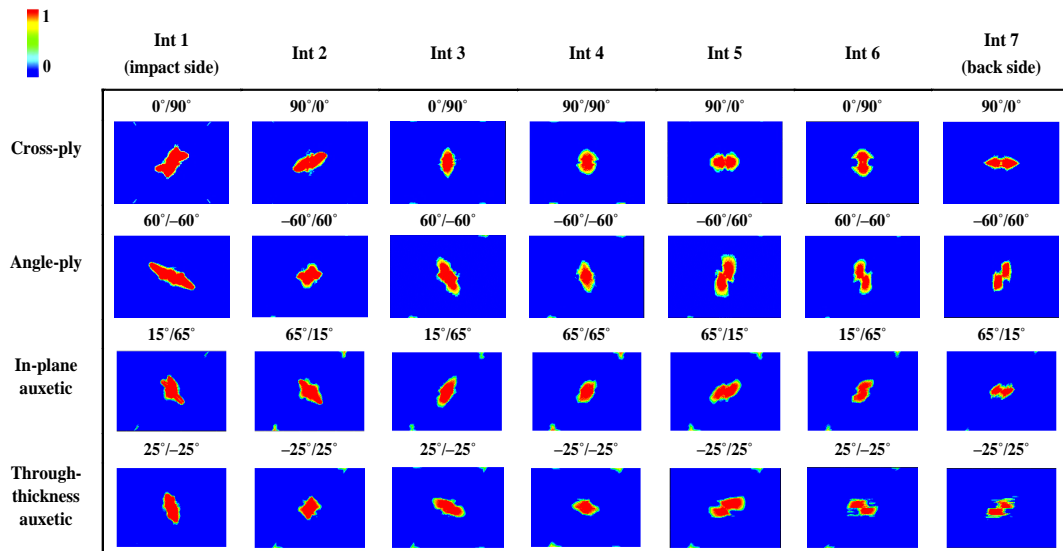


Fig. 6 The predicted delamination damage in each interface of the non-auxetic and auxetic CFRP composite laminates

شکل 6 آسیب لایه‌لایه شدن پیش‌بینی شده در هر سطح مشترک از چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیرآگزتیکی و آگزتیکی

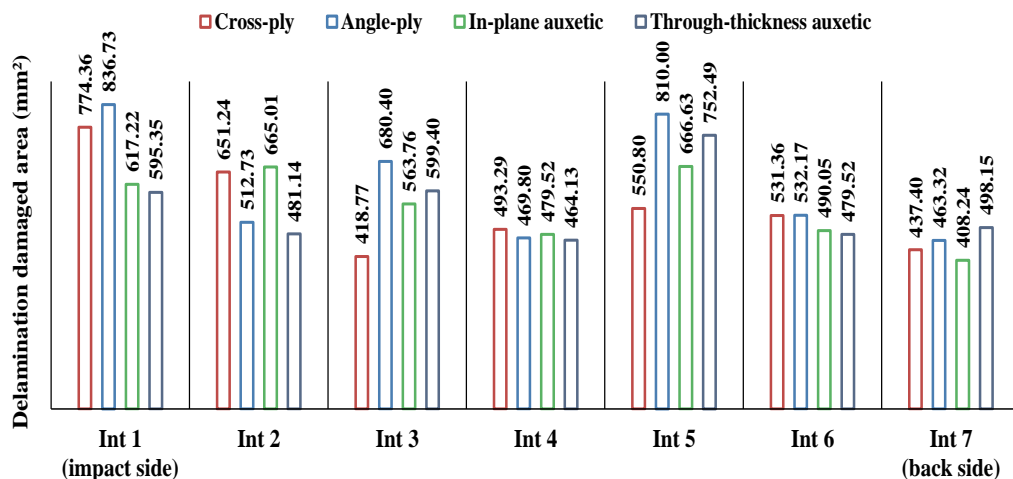


Fig. 7 Comparison of predicted delamination damaged areas in each interface of the non-auxetic and auxetic CFRP composite laminates

شکل 7 مقایسه کمی مساحت‌های آسیب‌دیده لایه‌لایه شدن پیش‌بینی شده در هر سطح مشترک از چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیرآگزتیکی و آگزتیکی

الیاف گسترش پیدا کرده‌اند. چنین الگوهایی برای آسیب کششی زمینه چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP تحت اثر ضربه کم سرعت متداول است [27،39].

مطابق با شکل‌های 8 و 9، مقایسه نواحی و مساحت‌های آسیب‌دیده کششی زمینه برای چندلایه‌های آگزتیکی داخل صفحه و در ضخامت نشان می‌دهد که چندلایه آگزتیکی در ضخامت با وجود مدول عرضی مؤثر کمتر، آسیب کششی زمینه کمتری را در لایه‌های اول تا پنجم نسبت به چندلایه آگزتیکی داخل صفحه از خود نشان می‌دهد. با این حال، در سه لایه پایینی این نتایج صدق نمی‌کند. در این رابطه، وانگ [27] نشان داد تولید نسبت پواسون منفی در ضخامت موجب فرونشاندن گسترش آسیب کششی زمینه می‌شود. با مقایسه آسیب‌های کششی زمینه پیش‌بینی شده برای چندلایه‌های غیرآگزتیکی و آگزتیکی، ملاحظه شد که چندلایه‌های متعامد و زاویه‌دار آسیب کششی زمینه کمتری نسبت به چندلایه‌های آگزتیکی دارند. این به دلیل مدول عرضی مؤثر بالاتر چندلایه‌های متعامد و زاویه‌دار نسبت به چندلایه‌های آگزتیکی است.

حالت‌های آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP تحت اثر ضربه کم سرعت اغلب شامل کشش زمینه، فشار زمینه و کشش الیاف هستند. در بیشتر مواقع از آسیب فشاری الیاف به دلیل ناچیز بودن صرف نظر می‌شود [27]. الگوهای آسیب کششی زمینه پیش‌بینی شده چندلایه‌های غیرآگزتیکی و آگزتیکی در شکل 8 نمایش داده شده است. همچنین، به منظور مقایسه بهتر نتایج، مقادیر کمی نواحی آسیب‌دیده کششی زمینه در شکل 9 آورده شده است. به طور کلی، در یک مسئله ضربه کم سرعت بر روی یک صفحه مسطح، نیروی ناشی از برخورد پرتابه با صفحه باعث خمش آن و در نتیجه کشش در قسمت پشتی و فشار در قسمت جلویی صفحه (سمت ضربه) می‌شود. بنابراین، برای چندلایه‌های کامپوزیتی، شروع آسیب کششی زمینه اغلب از قسمت پشتی و گسترش آن به طرف قسمت جلویی صفحه است که این در الگوهای آسیب کششی زمینه چندلایه‌ها در شکل 8 و داده‌های کمی آورده شده در شکل 9 قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، الگوهای نواحی آسیب‌دیده کششی زمینه در لایه‌های بالایی به صورت آسیب موضعی در ناحیه برخورد است. در حالی که، در لایه‌های پایینی، نواحی آسیب‌دیده اغلب در امتداد

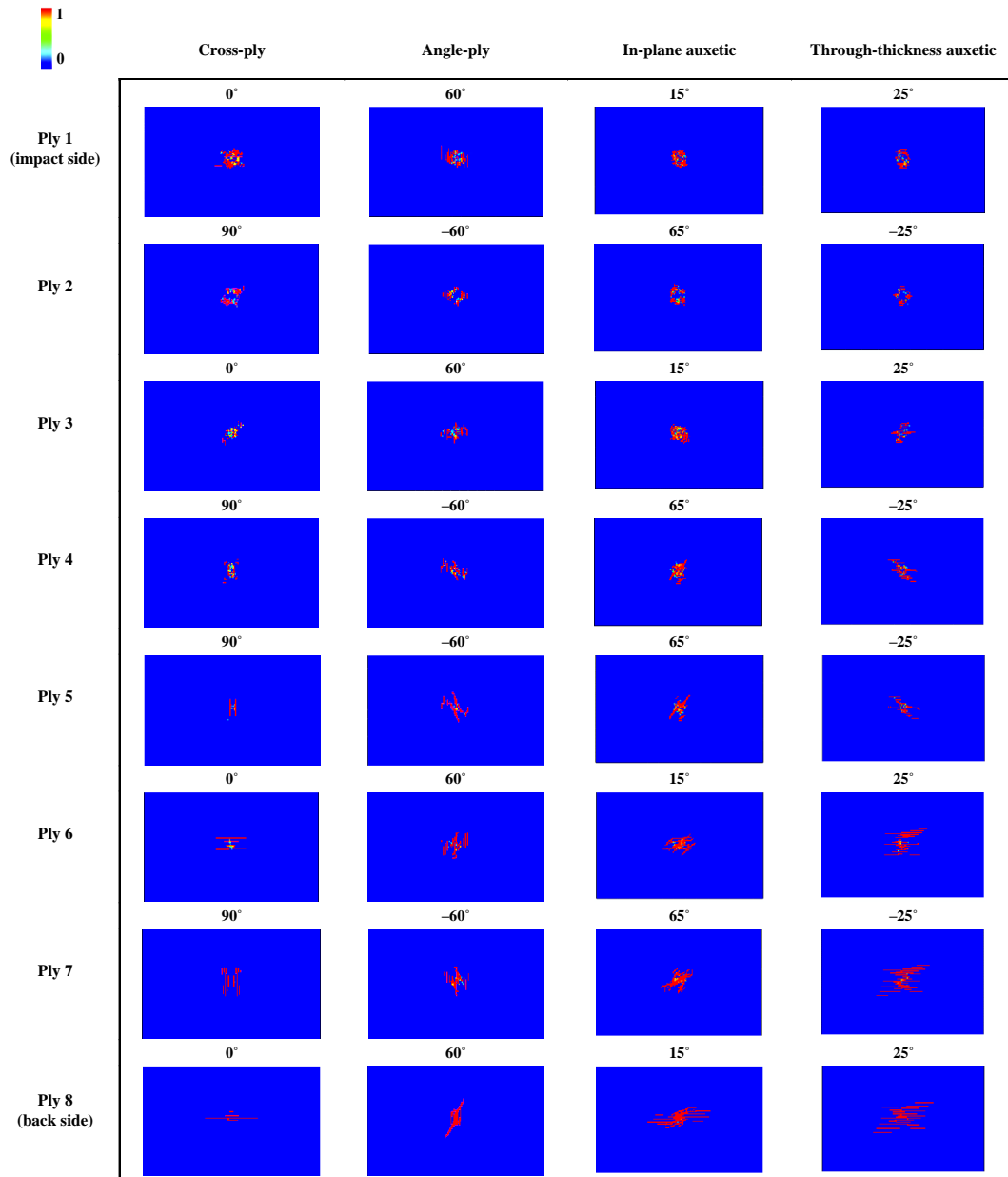


Fig. 8 The predicted matrix tensile damage in each ply of the non-auxetic and auxetic CFRP composite laminates

شکل 8 آسیب کششی زمینه پیش‌بینی شده برای هر لایه از چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیراگزوتیکی و اگزوتیکی

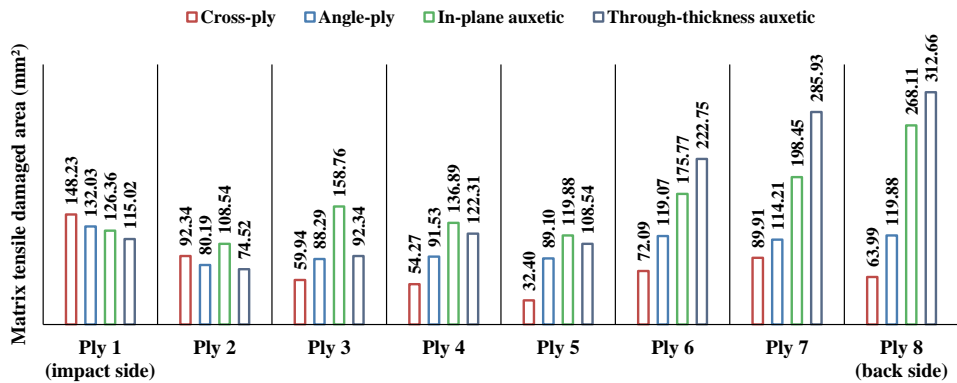


Fig. 9 Comparison of predicted matrix tensile damaged areas in each ply of the non-auxetic and auxetic CFRP composite laminates

شکل 9 مقایسه کمی مساحت‌های آسیب‌دیده کششی زمینه پیش‌بینی شده برای هر لایه از چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیراگزوتیکی و اگزوتیکی

نتایج نشان می‌دهد که در لایه‌های اول و دوم آسیب فشاری زمینه برای چندلایه آگرتیکی در ضخامت بیشتر است. در حالی که، در سایر لایه‌ها آسیب فشاری زمینه برای چندلایه آگرتیکی در ضخامت کمتر است. به‌طور خاص، آسیب فشاری زمینه برای چندلایه آگرتیکی در ضخامت در لایه‌های سوم و چهارم، 58 درصد کمتر از چندلایه آگرتیکی داخل صفحه می‌باشد. در این خصوص، وانگ [27] گزارش داد رفتار آگرتیکی در ضخامت می‌تواند به‌طور نامطلوبی نواحی آسیب‌دیده فشاری زمینه را نسبت به چندلایه‌های غیرآگرتیکی گسترش دهد. این می‌تواند به‌دلیل انقباض چندلایه در طول رخداد ضربه ناشی از نسبت پواسون منفی در ضخامت باشد که منجر به تشدید آسیب فشاری زمینه می‌شود.

نتایج حاصل از پیش‌بینی الگوهای آسیب فشاری زمینه و همچنین مساحت‌های آسیب‌دیده مربوطه در شکل‌های 10 و 11 نمایش داده شده است. برخلاف آسیب کششی زمینه، آسیب فشاری زمینه به تدریج از قسمت جلویی صفحه به طرف قسمت پشتی صفحه کاهش یافته است. این رخداد آسیب با نتایج گزارش شده در مرجع [39] مطابقت دارد.

بر اساس شکل‌های 10 و 11، مقایسه نواحی و مساحت‌های آسیب‌دیده فشاری زمینه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار مساحت آسیب‌دیده فشاری زمینه مربوط به چندلایه متعامد است که در لایه دوم رخ داده است. باین‌حال، از لایه چهارم به بعد آسیب فشاری زمینه ناچیزی برای چندلایه متعامد مشاهده شده است. همچنین، برای چندلایه‌های آگرتیکی داخل صفحه و در ضخامت،

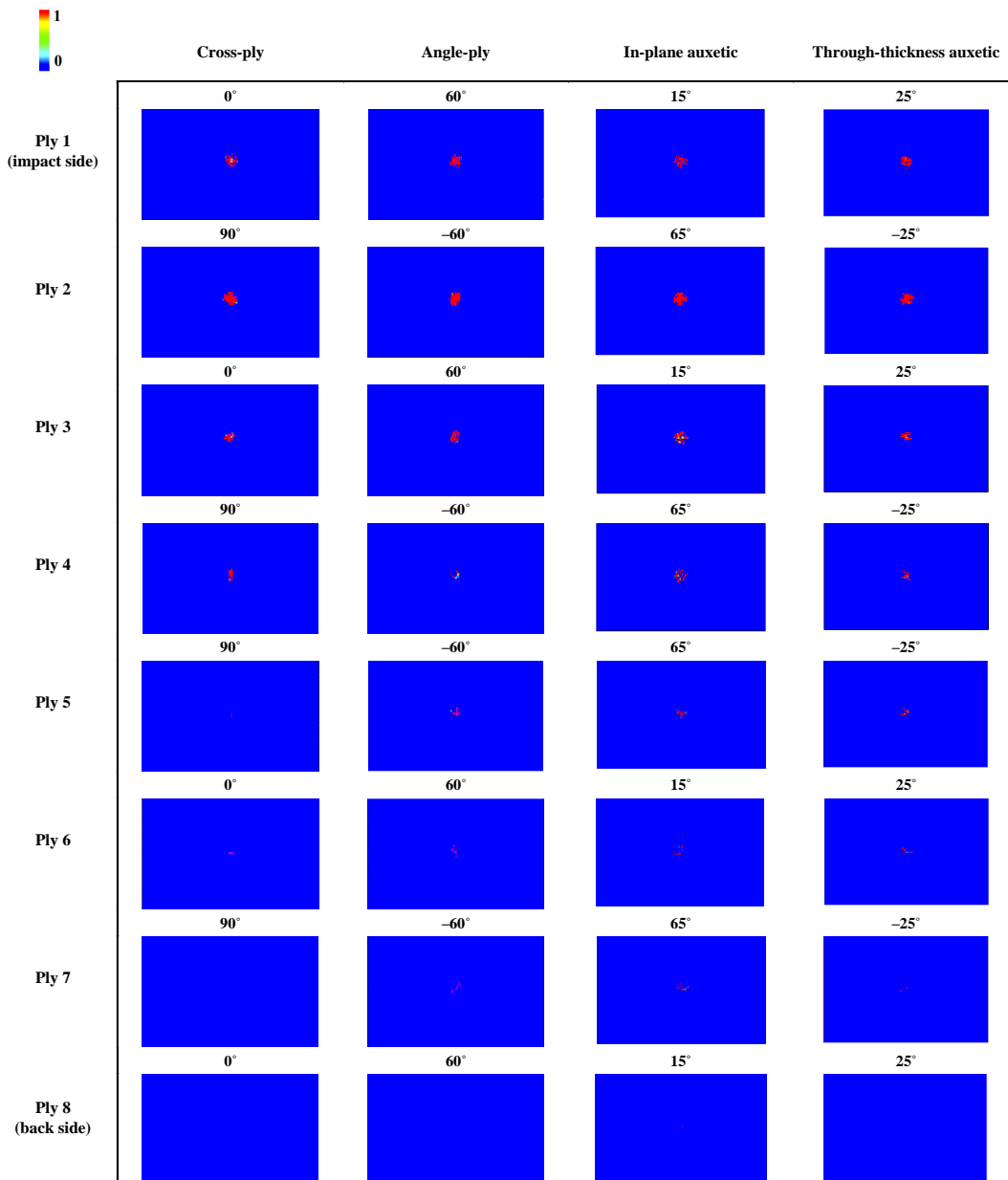


Fig. 10 The predicted matrix compression damage in each ply of the non-auxetic and auxetic CFRP composite laminates

شکل 10 آسیب فشاری زمینه پیش‌بینی شده برای هر لایه از چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیرآگرتیکی و آگرتیکی

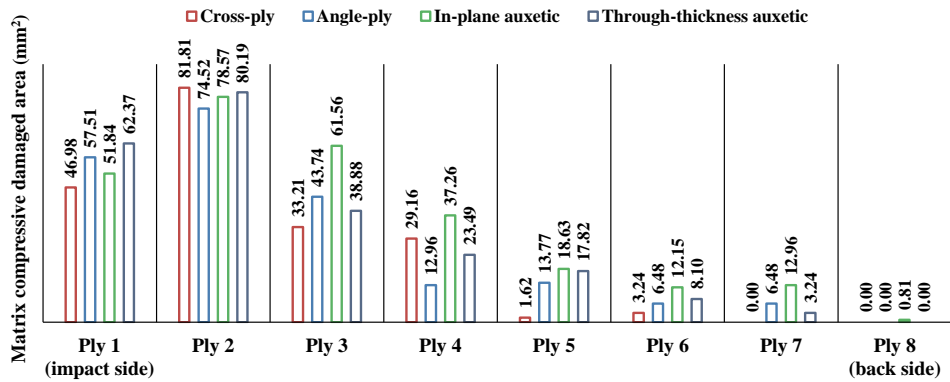


Fig. 11 Comparison of predicted matrix compression damaged areas in each ply of the non-auxetic and auxetic CFRP composite laminates

شکل 11 مقایسه کمی مساحت‌های آسیب‌دیده فشاری زمینه پیش‌بینی‌شده برای هر لایه از چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیرآگزتیکی و آگزتیکی

مساحت‌های پیش‌بینی‌شده برای آسیب کششی الیاف چندلایه‌های غیرآگزتیکی و آگزتیکی در شکل 12 آورده شده است. مطابق با شکل 12، شروع آسیب کششی الیاف از قسمت جلویی صفحه و گسترش آن به طرف قسمت پشتی آن است که از لایه سوم به بعد، آسیب کششی الیاف در چندلایه‌های کامپوزیتی ناچیز یا بدون آسیب است. بر اساس شکل 12،

مساحت‌های پیش‌بینی‌شده برای آسیب کششی الیاف چندلایه‌های غیرآگزتیکی و آگزتیکی در شکل 12 آورده شده است. مطابق با شکل 12، شروع آسیب کششی الیاف از قسمت جلویی صفحه و گسترش آن به طرف قسمت پشتی آن است که از لایه سوم به بعد، آسیب کششی الیاف در چندلایه‌های کامپوزیتی ناچیز یا بدون آسیب است. بر اساس شکل 12،

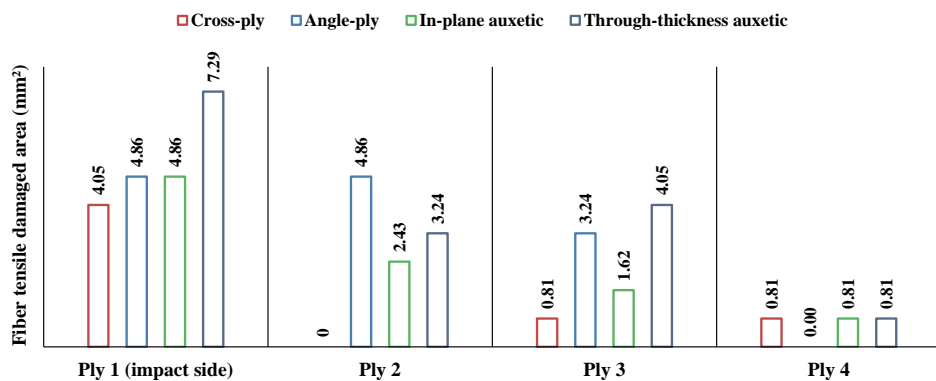


Fig. 12 Comparison of predicted fiber tensile damaged areas in each ply of the non-auxetic and auxetic CFRP composite laminates

شکل 12 مقایسه کمی مساحت‌های آسیب‌دیده کششی الیاف پیش‌بینی‌شده برای هر لایه از چندلایه‌های کامپوزیتی CFRP غیرآگزتیکی و آگزتیکی

قابلیت توسعه و استفاده در سازه‌های فداشونده با هدف ارتقا سطح ایمنی و حفاظت را دارند. حال آنکه چندلایه‌های متعامد، زاویه‌دار و آگزتیکی در ضخامت با خصوصیتی همچون نیروی ضربه زیاد، زمان ضربه کم، بیشینه جابه‌جایی کم و انرژی اتلاف‌شده کم برای استفاده در سازه‌هایی با رویکرد طراحی دیوار سخت مناسب هستند. با توجه به بررسی نتایج ملاحظه گردید بیشترین مقدار آسیب لایه‌لایه‌شدن، کششی زمینه، فشاری زمینه و کششی الیاف به ترتیب در چندلایه‌های زاویه‌دار، آگزتیکی در ضخامت، متعامد و آگزتیکی در ضخامت صورت می‌پذیرد.

### 9- فهرست علائم

عناصر ماتریس سفتی داخل صفحه یا ماتریس سفتی کششی  $A_{ij}$  ;  $i$  و  $j$  برابر است با  $x, y, z$  یا  $1, 2, 3$  و  $6$   $(Nm^{-1})$   
 عناصر ماتریس سازگاری داخل صفحه یا ماتریس سازگاری کششی  $a_{ij}$  ;  $i$  و  $j$  برابر است با  $x, y, z$  یا  $1, 2, 3$  و  $6$   $(N^{-1}m)$   
 عناصر ماتریس سفتی جفت‌شدگی  $B_{ij}$  ;  $i$  و  $j$  برابر است با  $x, y, z$  یا  $1, 2, 3$  و  $6$   $(N)$

### 8- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر نسبت پواسون منفی بر پاسخ مکانیکی و رفتار آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی تحت شرایط ضربه کم سرعت پرداخته شده است. روند انجام پژوهش با ارزیابی و تجزیه و تحلیل عملکرد ضربه‌پذیری چندلایه‌های کامپوزیتی آگزتیکی داخل صفحه و در ضخامت در مقایسه با چندلایه‌های کامپوزیتی غیرآگزتیکی (متعامد و زاویه‌دار) تحقق یافته است. به‌منظور مشخص نمودن محدوده زوایای قرارگیری الیاف برای ایجاد رفتار آگزتیکی، یک کد در نرم‌افزار متلب بر اساس تئوری کلاسیک لایه‌ای توسعه داده شده است. همچنین، برای بررسی فرآیند رخداد آسیب در چندلایه‌ها، مدل آسیب پیش‌رونده با استفاده از یک زیربرنامه VUMAT متشکل از معیار خرابی هاشین و پاک و مدل تکامل آسیب بر اساس روش کرنش معادل برنامه‌نویسی و اجرا شده است. نتایج نشان داد در برخی از حالت‌های آسیب، رفتار آگزتیکی منجر به کاهش آسیب در چندلایه‌های کامپوزیتی می‌شود. پاسخ کلی چندلایه آگزتیکی داخل صفحه تحت ضربه کم سرعت نشان داد این نوع چندلایه‌ها نسبت به سایر چندلایه‌های بررسی‌شده در این پژوهش با داشتن ویژگی‌هایی نظیر نیروی ضربه کم، زمان ضربه زیاد و بیشینه جابه‌جایی زیاد

10- مراجع

[1] Sharma, A.K., Bhandari, R., Sharma, C., Dhakad, S.K. and Pinca-Bretotean, C., "Polymer Matrix Composites: A State of Art Review", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 57, pp.2330–2333, 2022.

[2] Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L. and Linul, E., "Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications", *Polymers (Basel)*, Vol. 11, No. 10, pp. 1667, 2019.

[3] Zeinedini, A., Hosseini, Y., Mahdi, A.S., Akhavan-Safar, A. and Da Silva, L.F., "Impact of the Manufacturing Process on the Flexural Properties of Laminated Composite-Metal Riveted Joints: Experimental and Numerical Studies", *Applied Composite Materials*, Vol. 31, No. 2, pp. 583–610, 2024.

[4] Shahbazi, A. and Zeinedini, A., "Impact Response of E-Glass/Epoxy Composite Bi-Directional Corrugated Core Sandwich Panels", *Polymers and Polymer Composites*, Vol. 29, No. 9, pp. 1563–1574, 2021.

[5] Doostvandi, B. and Zeinedini, A., "Repair of Inclined Notches in the Pressurized Steel Pipes Using Laminated Composites", *Material Design & Processing Communications*, Vol. 1, No. 2, pp. e49, 2019.

[6] Mousavi-Bafrouyi, S.M.S., Eslami-Farsani, R. and Geranmayeh, A., "Effects of Stacking Sequence of Fibers and Thermal Environments on the Flexural Properties of the Basalt Fibers/Thin-Ply Unidirectional Carbon Fibers/Epoxy Hybrid Composites", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 2, pp. 1514–1521, 2021.

[7] Barile, C. and Casavola, C., "Mechanical Characterization of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Specimens for Aerospace Applications", In *Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*, Elsevier, pp. 387–407, 2019.

[8] Parveez, B., Kittur, M.I., Badruddin, I.A., Kamangar, S., Hussien, M. and Umarfarooq, M.A. "Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review", *Polymers (Basel)*, Vol. 14, No. 22, pp. 5007, 2022.

[9] Bouvet, C. and Rivallant, S., "Damage Tolerance of Composite Structures under Low-Velocity Impact", In *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*, Elsevier, pp. 3–28, 2023.

[10] Amirashjaee, A.K., Fakhreddini, N.S., and Taheri, B.F., "Numerical and Experimental Study of Carbon/Epoxy Composite Laminate Response to Low Velocity Impact", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1461–1472, 2021.

[11] Gercek, H., "Poisson's Ratio Values for Rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 44, No. 1, pp. 1–13, 2007.

[12] Greaves, G.N., Greer, A.L., Lakes, R.S. and Rouxel, T., "Poisson's Ratio and Modern Mmaterials", *Nature Materials*, Vol. 10, No. 11, pp. 823–837, 2011.

[13] Jiang, W., Ren, X., Wang, S.L., Zhang, X.G., Zhang, X.Y., Luo, C., Xie, Y.M., Scarpa, F., Alderson, A. and Evans, K.E., "Manufacturing, Characteristics and Applications of Auxetic Foams: A State-of-the-Art Review", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 235, pp. 109733, 2022.

[14] Tsai, S.W. and Hahn, H.T., "Introduction to Composite Materials, Technomic Publ", Co., Westport, 1980.

[15] Donoghue, J.P., "Negative Poisson's Ration Effects on the Mechanical Performance of Composite Laminates", PhD Thesis, University of Liverpool, UK, 1992.

[16] Evans, K.E., Donoghue, J.P. and Alderson, K.L., "The Design, Matching and Manufacture of Auxetic Carbon Fibre Laminates", *Journal of composite materials*, Vol. 38, No. 2, pp. 95–106, 2004.

[17] Miki, M. and Murotsu, Y., "The Peculiar Behavior of the Poisson's Ratio of Laminated Fibrous Composites", *JSME international journal. Ser. 1, Solid mechanics, strength of materials*, Vol. 32, No. 1, pp. 67–72, 1989.

[18] Zhang, R., Yeh, H.-L. and Yeh, H.-Y., "A Preliminary Study of Negative Poisson's Ratio of Laminated Fiber Reinforced Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 17, No. 18, pp. 1651–1664, 1998.

$D_{ij}$	عناصر ماتریس سفتی خمشی (Nm) ؛ $i$ و $j$ برابر است با $x, y, z$ و $s$ یا $1, 2, 3$ و $6$
$d$	متغیر آسیب
$E$	مدول یانگ ( $Nm^{-2}$ )
$G$	مدول برشی ( $Nm^{-2}$ )
$G$	انرژی شکست ( $Nm^{-1}$ )
$h$	ضخامت کل چندلایه (m)
$M$	ممان خمشی (N)
$N$	منتجه تنش ( $Nm^{-1}$ )
$Q_{ij}$	عناصر ماتریس سفتی ( $Nm^{-2}$ ) ؛ $i$ و $j$ برابر است با $x, y, z$ و $s$ یا $1, 2, 3$ و $6$
$r$	معیار خرابی چندلایه کامپوزیتی
$S$	استحکام برشی ( $Nm^{-2}$ )
$S_{ij}$	عناصر ماتریس سازگاری ( $N^{-1}m^2$ ) ؛ $i$ و $j$ برابر است با $x, y, z$ و $s$ یا $1, 2, 3$ و $6$
$t$	کشش سطح مشترک ( $Nm^{-2}$ )
$t^0$	استحکام سطح مشترک ( $Nm^{-2}$ )
$X$	استحکام در راستای الیاف ( $Nm^{-2}$ )
$Y$	استحکام در راستای زمینه ( $Nm^{-2}$ )
علائم یونانی	
$\varepsilon$	کرنش
$\kappa$	انحنا ( $m^{-1}$ )
$\nu$	نسبت پواسون
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\sigma$	تنش ( $Nm^{-2}$ )
بالانویس‌ها	
$C$	بحرانی
$eff$	موثر
$T$	ترانهاده
زیرنویس‌ها	
$C$	فشار
$eq$	معادل
$f$	الیاف
$fc$	فشار الیاف
$ft$	کشش الیاف
$m$	زمینه
$mc$	فشار زمینه
$mt$	کشش زمینه
$n$	راستای قائم
$s$	راستای برشی
$T$	کشش
$t$	راستای تماسی (برشی)
$x, y, z$	محوره‌های مختصات در دستگاه محلی (محوره‌های اصلی مواد)
$1, 2, 3$	محوره‌های مختصات در دستگاه عمومی (محوره‌های هندسی سازه)

- [39] Li, X., Ma, D., Liu, H., Tan, W., Gong, X., Zhang, C. and Li, Y., "Assessment of Failure Criteria and Damage Evolution Methods for Composite Laminates under Low-Velocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 207, pp. 727–739, 2019.
- [40] Sokolinsky, V.S., Indermuehle, K.C. and Hurtado, J.A., "Numerical Simulation of the Crushing Process of a Corrugated Composite Plate," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 9, pp. 1119–1126, 2011.
- [41] Benzeggagh, M.L. and Kenane, M.J.C.S., "Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus", *Composites science and technology*, Vol. 56, No. 4, pp. 439–449, 1996.
- [42] Hongkarnjanakul, N., Bouvet, C. and Rivallant, S., "Validation of Low Velocity Impact Modelling on Different Stacking Sequences of CFRP Laminates and Influence of Fibre Failure", *Composite Structures*, Vol. 106, pp. 549–559, 2013.
- [19] Yeh, H.-L., Yeh, H.-Y. and Zhang, R., "A Study of Negative Poisson's Ratio in Randomly Oriented Quasi-Isotropic Composite Laminates", *Journal of composite materials*, Vol. 33, No. 19, pp. 1843–1857, 1999.
- [20] Abrate, S., "Impact on Composite Structures", Cambridge university press, 1998.
- [21] Herakovich, C.T., "Composite Laminates with Negative Through-the-Thickness Poisson's Ratios", *Journal of composite materials*, Vol. 18, No. 5, pp. 447–455, 1984.
- [22] Hadi Harkati, E.L., Bezazi, A., Scarpa, F., Alderson, K. and Alderson, A., "Modelling the Influence of the Orientation and Fibre Reinforcement on the Negative Poisson's Ratio in Composite Laminates", *Physica Status Solidi (b)*, Vol. 244, No. 3, pp. 883–892, 2007.
- [23] Coenen, V.L. and Alderson, K.L., "Mechanisms of Failure in the Static Indentation Resistance of Auxetic Carbon Fibre Laminates", *Physica Status Solidi (b)*, Vol. 248, No. 1, pp. 66–72, 2011.
- [24] Clarke, J.F., Duckett, R.A., Hine, P.J., Hutchinson, I.J. and Ward, I.M., "Negative Poisson's Ratios in Angle-Ply Laminates: Theory and Experiment", *Composites*, Vol. 25, No. 9, pp. 863–868, 1994.
- [25] Alderson, K.L., Simkins, V.R., Coenen, V.L., Davies, P.J., Alderson, A. and Evans, K.E., "How to Make Auxetic Fibre Reinforced Composites", *Physica. Status Solidi (b)*, Vol. 242, No. 3, pp. 509–518, 2005.
- [26] Alderson, K.L. and Coenen, V.L., "The Low Velocity Impact Response of Auxetic Carbon Fibre Laminates", *Physica. Status Solidi (b)*, Vol. 245, No. 3, pp. 489–496, 2008.
- [27] Wang, Y., "Auxetic Composite Laminates with Through-Thickness Negative Poisson's Ratio for Mitigating Low Velocity Impact Damage: A Numerical Study", *Materials (Basel)*, Vol. 15, No. 19, pp. 6963, 2022.
- [28] Lin, W. and Wang, Y., "Low Velocity Impact Behavior of Auxetic CFRP Composite Laminates with In-Plane Negative Poisson's Ratio", *Journal of Composite Materials*, Vol. 57, No. 12, pp. 2029–2042, 2023.
- [29] Zhou, J., Wen, P. and Wang, S., "Numerical Investigation on the Repeated Low-Velocity Impact Behavior of Composite Laminates", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 185, pp. 107771, 2020.
- [30] Mili, F. and Necib, B., "Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities", *Composite Structures*, Vol. 51, No. 3, pp. 237–244, 2001.
- [31] Zhang, C., Duodu, E.A. and Gu, J., "Finite Element Modeling of Damage Development in Cross-Ply Composite Laminates subjected to Low Velocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 173, pp. 219–227, 2017.
- [32] Sy, B.L., Fawaz, Z. and Bougherara, H., "Damage Evolution in Unidirectional and Cross-Ply Flax/Epoxy Laminates subjected to Low Velocity Impact Loading", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 112, pp. 452–467, 2018.
- [33] Roupheal, S.E.K., Lebrun, G., Touchard, F. and Truong-Hoang, T.-Q., "Low Energy Impact Behavior of Unidirectional and Cross-Ply Flax/Epoxy Laminates and Comparison with Similar Glass/Epoxy Laminates", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 175, pp. 107746, 2023.
- [34] "GE-Composites Get in Deep with New-Generation Engine.pdf".
- [35] Fan, Y. and Wang, Y., "The Effect of Negative Poisson's Ratio on the Low-Velocity Impact Response of an Auxetic Nanocomposite Laminated Beam", *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, Vol. 17, No. 1, pp. 153–169, 2021.
- [36] Paris, F. and Jackson, K.E., "A Study of Failure Criteria of Fibrous Composite Materials", No. NAS 1.26: 210661, 2001.
- [37] Lee, C.S., Kim, J.H., Kim, S.K., Ryu, D.M. and Lee, J.M., "Initial and Progressive Failure Analyses for Composite Laminates Using Puck Failure Criterion and Damage-Coupled Finite Element Method", *Composite Structures*, Vol. 121, pp. 406–419, 2015.
- [38] Liu, P.F., Liao, B.B., Jia, L.Y. and Peng, X.Q., "Finite Element Analysis of Dynamic Progressive Failure of Carbon Fiber Composite Laminates under Low Velocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 149, pp. 408–422, 2016.



## تأثیر زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی و همگنی کامپوزیت‌های بسیار پر شده علی ریاضتی<sup>1</sup>، مرتضی غفوری<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

2- استادیار، مهندسی پلیمر، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15461-16987، mghafori@ihu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

کامپوزیت‌های بسیار پر شده از دو جزء ماتریس پلیمری و پرکننده‌های مختلف با کسر وزنی بیشتر از 30% تشکیل شده است. روش‌های متفاوتی برای بررسی رفتار جریان دوغاب کامپوزیت وجود دارد که در این مقاله تأثیر تاریخچه پیش برش بر گرانیوی و همگنی دوغاب و همچنین محصول کامپوزیت نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. گرانیوی دوغاب کامپوزیت بسیار پر شده با سرعت‌های مختلف برشی در محدوده دمایی 40 °C پس از پایان اختلاط در کامپوزیت‌های «بایندر/آلومینیوم/آمونیم پرکلرات» و «بایندر/آلومینیوم/آمونیم پرکلرات» با عامل شبکه‌کننده) با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد اندازه‌گیری شده است. مشاهده شد که گرانیوی و وابستگی آن به سرعت برشی با رفتار سیال شبه‌پلاستیک مطابقت دارد. با استفاده از معادله قانون توان، پارامترهای شاخص گرانیوی (K) و شاخص شبه‌پلاستیک (n) سیال تعیین و تجزیه و تحلیل شدند. نشان داده شد که رفتار رئولوژیکی کامپوزیت بسیار پر شده به‌طور قابل توجهی به برهمکنش‌های فیزیکی میان مواد پرکننده و ماتریس بستگی دارد. مشاهده شد پس از افزودن عامل شبکه‌کننده، گرانیوی کامپوزیت بسیار پر شده به‌سرعت زیاد می‌شود و این افزایش گرانیوی به علت ذرات جامد ریزتر و افزایش وزن مولکولی و تشکیل اتصالات عرضی در ساختار پیش‌پلیمر می‌باشد. بررسی اثر مدت‌زمان اختلاط بر همگنی محصول نشان داد که همگن‌ترین محصول در زمان کل فرآیند اختلاط 135 دقیقه به دست آمد.

دریافت: 1403/02/06

پذیرش: 1403/05/04

کلیدواژگان

کامپوزیت‌های بسیار پر شده، رفتار رئولوژیکی، رفتار شبه‌پلاستیک، همگنی، چگالی

## Effect of mixing time on rheological behavior and homogeneity of highly filled composites

Ali Riazati<sup>1</sup>, Morteza Ghafoori<sup>2\*</sup>

1, 2- Department of Chemical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16987-15461, Tehran, Iran, mghafori@ihu.ac.ir

### Keywords

Highly Filled Composites, Rheological Behavior, Pseudoplastic Behavior, Homogeneity, Density

### Abstract

Highly filled composites consist of two components of polymer matrix and different fillers with a weight fraction of more than 30%. There are different methods for studying the slurry flow behavior. In this article, the effect of pre-shear on the viscosity and homogeneity of the composite slurry and the final product has been investigated. The Viscosity of highly filled composite slurry with different shear rates in the temperature range of 40°C after mixing in composites binder / aluminum / ammonium perchlorate and (binder / aluminum / ammonium perchlorate with Cross-linking agent) with the use of a Brookfield rotary viscometer was measured. It was observed that the viscosity and its dependence on the shear rate correspond to the behavior of the pseudoplastic fluid. Using the equation of power law, determining and analyzing the parameters of viscosity index (k) and pseudoplastic index (n), it was shown that the rheological behavior of highly filled composite depends significantly on the physical interactions between the filler and the matrix. it was observed that after adding the curing agent, the viscosity of the highly filled composite increases rapidly, and this increase in viscosity is due to smaller solid particles, an increase in molecular weight, and the formation of crosslinks in the prepolymer structure. Investigating the effect of mixing time on product homogeneity showed that the most homogeneous product was obtained during the entire mixing process of 135 minutes.

### 1- مقدمه

معمولاً جامد و به‌عنوان پرکننده استفاده می‌شود. درحالی‌که در کامپوزیت‌های بسیار پر شده، اتصال‌دهنده یا جزء پلیمری به‌عنوان جزء کمتر، و فاز پراکنده که همان بار جامد است، بیشترین درصد کامپوزیت را تشکیل می‌دهد. مفهوم بسیار پر شده اشاره به آن دارد که غلظت مواد جامد به بیشینه کسر پرشدگی

کامپوزیت‌ها موادی هستند که از دو یا چند جزء تشکیل شده‌اند که یک فاز آن ماتریس پیوسته و فاز دیگر متفرق ناپیوسته می‌باشد [1]. در کامپوزیت‌های متداول، فاز ماتریس ماده پلیمری بوده و فاز متفرق که درصد کمتری دارد،

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Riazati, A., Ghafoori, M., "Effect of mixing time on rheological behavior and homogeneity of highly filled composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2444-2452, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2026848.1884>

برهمکنش‌ها (ذره-ذره و ذره-ماتریس) برای تفسیر بهتر پدیده‌های ناشی از فرآورش توصیف شده‌اند. هنگامی که ذرات به یک ماتریس اضافه می‌شوند، به‌عنوان عوامل بازدارنده عمل می‌کنند که خطوط جریان فاز پیوسته را تغییر می‌دهند و تحرک زنجیره‌ها را محدود می‌کنند. در کامپوزیت‌های بسیار پر شده ذرات به‌طور نزدیک به هم در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و باعث می‌شوند که برهمکنش ذره-ذره بر برهمکنش‌های ماتریس-ذره غالب شود. اصطکاک ثابت بین ذرات منجر به اتلاف انرژی می‌شود و بنابراین مخلوط گرانروی بیشتری از خود نشان می‌دهد. از این‌رو، ناحیه خاصی از ذرات تأثیر عمده‌ای بر گرانروی مخلوط دارد. از سوی دیگر، نحوه اختلاط برای رسیدن به پراکنش و توزیع باکیفیت ذرات در ماتریس به‌منظور به‌دست آوردن یک مخلوط همگن و خواص مطلوب از اهمیت خاصی برخوردار است [16].

فرآیند اختلاط کامپوزیت‌ها در سه مرحله انجام می‌شود. در فاز پیش اختلاط تمام مواد به جز عامل شبکه‌کننده طی زمان مشخص مخلوط می‌شوند. در مرحله دوم تمام اجزای بار جامد و در مرحله پایانی عامل شبکه‌کننده اضافه می‌شود. از آنجا که واکنش شبکه‌شدگی پس از اضافه کردن عامل شبکه‌کننده به مخلوط دوغابی آغاز می‌شود، زمان بهینه فرآیند ریخته‌گری پس از اضافه کردن عامل شبکه‌کننده محدود می‌شود. در نتیجه با پیشرفت واکنش، گرانروی سامانه افزایش می‌یابد. بالا رفتن سرعت افزایش گرانروی می‌تواند باعث کاهش اطمینان‌پذیری و افزایش حباب و عیوب دیگر در دوغاب شود [17]. دوغاب کامپوزیت باید در پایان اختلاط گرانروی مناسبی داشته باشد تا ریخته‌گری به سهولت انجام گیرد. گرانروی پایین دوغاب کامپوزیت جامد باعث همگن شدن مواد تشکیل‌دهنده در دوغاب کامپوزیت می‌شود [18]. در سامانه‌های بسیار رقیق، پرکننده‌ها به‌اندازه‌ای از هم فاصله دارند که تعامل بین آن‌ها ناچیز است و رفتار رئولوژیکی آن‌ها به‌شدت تغییر می‌کند. زمانی که غلظت بیش از 15% افزایش می‌یابد، به یک رفتار جامد مانند نزدیک می‌شود که این رفتار نیز تابعی از شکل و اندازه ذرات است [19]. گرانروی یک سامانه سوسپانسیون با غلظت بالا دارای ماهیت سیال غیرنیوتنی است و شامل گرانروی نیوتنی سیستم فاز مایع ( $\eta_0$ ) و گرانروی ساختاری ( $\eta_s$ ) است. جریان دوغاب بسیار بارگذاری شده با مدل سیال قانون توانی ( $\eta = K\dot{\gamma}^m$ ) اندازه‌گیری می‌شود که در آن شاخص شبه‌پلاستیک ( $m$ ) و شاخص گرانروی ( $k$ ) است. برای شبه‌پلاستیک‌ها،  $m$  حدوداً بین 0 و 1- تغییر می‌کند [20].

یک بحث بسیار مهم در فرآیند تولید مواد مرکب به‌ویژه کامپوزیت‌های بسیار پر شده که در موارد خاص و همین‌طور در سامانه‌های هوافضایی استفاده می‌شوند، موضوع همگن بودن اجزاء کامپوزیت در کل مجموعه کامپوزیت می‌باشد. به‌طوری‌که هرگونه ناهمگنی بر خواص مکانیکی و خواص احتراقی و سایر خواص کامپوزیت تأثیر زیادی گذاشته و مانع به‌کارگیری مناسب آن‌ها می‌شود. بر طبق تحقیقات انجام‌شده از بهترین و ساده‌ترین روش‌هایی که می‌تواند ما را از همگن بودن اجزاء کامپوزیت در کل مجموعه کامپوزیت مطمئن نماید، یکسان بودن چگالی کامپوزیت چه به‌صورت دوغاب و چه پس از شبکه‌شدن که محصول به‌صورت کامپوزیت تولید می‌شود در مراحل مختلف یک نمونه کامپوزیتی می‌باشد [21-23]. برخی از عواملی که بر گرانروی و همگنی دوغاب تأثیر می‌گذارند می‌توان به زمان اختلاط، سرعت اختلاط، دمای اختلاط، نوع مواد اولیه، توالی مواد و برخی عوامل دیگر اشاره کرد که نیاز به ارزیابی گرانروی و همگنی دوغاب کامپوزیت دارد. بررسی کیفیت مخلوط برای ارزیابی و اطمینان از اختلاط کامل دوغاب و دستیابی به محصولی همگن، بسیار حائز

مواد جامد نزدیک باشد و این کامپوزیت‌ها محتوایی با بار جامد بسیار بالا هستند. کامپوزیت‌های بسیار پر شده یا سوسپانسیون‌های غلیظ معمولاً پلیمرهایی با کسر حجمی زیادی از پرکننده‌های ذرات (آلی یا غیرآلی) هستند که در غلظت‌های بالای 30% اضافه می‌شوند و می‌توانند ذرات ماکرو، میکرو یا نانو باشند. که این ذرات می‌توانند دارای تنوع گسترده‌ای از ترکیب شیمیایی، شکل، اندازه و توزیع اندازه باشند. افزودنی‌هایی که با پلیمر و پرکننده‌ها مخلوط می‌شوند به‌طور قابل توجهی بر رفتار رئولوژیکی کامپوزیت‌ها تأثیر می‌گذارند [2]. کامپوزیت‌های بسیار پر شده مخلوطی متشکل از یک سیستم ناهمگن است که از سه ماده مختلف پاینده یا اتصال‌دهنده پلیمری، اکسیدکننده جامد و افزودنی‌های فلزی می‌باشد که درصد اجزای تشکیل‌دهنده به تناسب کاربرد برای هر کامپوزیت متفاوت است. بنابراین، رفتار رئولوژیکی به این مواد و خواص آن‌ها بستگی دارد [3,4]. پلی‌بوتادی‌ان با گروه انتهایی هیدروکسیل<sup>1</sup>، پلیمری با وزن مولکولی پایین است که در صنایع مختلف و به‌عنوان پیش‌پلیمر در سامانه‌های پاینده استفاده می‌شود [5-7]. در حال حاضر در سراسر جهان کامپوزیت‌های بسیار پر شده بر پایه پلی‌بوتادی‌ان با گروه انتهایی هیدروکسیل<sup>1</sup> پر مصرف‌ترین ماده برای استفاده در سامانه‌ها و پرتابه‌های هوافضایی هستند [8,9]. فرمولاسیون کامپوزیت‌های بسیار پر شده در این سامانه‌ها عموماً از یک بستر پلیمری چسبناک با بار جامد که شامل 60-20% پودرهای فلزی و 60-20% نمک‌های آمونیوم به‌عنوان اکسیدکننده هستند، تشکیل شده‌اند که پس از اختلاط کامل، در قالب یا ریخته‌گری تهیه می‌شود [10,11]. کامپوزیت‌های بسیار پر شده بسیار ویسکوز و یک ماده نیمه‌جامد هستند که رفتار رئولوژیکی بسیار پیچیده‌ای را از خود نشان می‌دهند که این رفتار در حین انجام عملیات فرآورش نقش حیاتی را ایفا می‌کند. عوامل مختلفی مانند ترکیبات شیمیایی، فرآیندهای ساخت مانند اکستروژن و اختلاط بر رفتار رئولوژیکی تأثیرگذار بوده که به‌نوبه خود بر خواص سوزش سامانه‌های هوافضایی نیز تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، افزودن تولوئن دی‌ایزوسیانات<sup>2</sup> که به‌عنوان یک عامل شبکه‌کننده عمل می‌کند، یک واکنش شیمیایی را ایجاد کرده و رئولوژی کامپوزیت را پیچیده‌تر می‌کند [12].

رئولوژی مطالعه تغییر شکل و جریان ماده است که چگونگی جریان یک ماده در مواجهه با نیروی برشی، دما و زمان‌های مختلف را بیان می‌کند. جریان-پذیری ماده با گرانروی ( $\eta$ ) اندازه‌گیری می‌شود. شناخت رفتار رئولوژیکی کامپوزیت‌های بسیار پر شده به فرمولاسیون و فرآورش آن‌ها کمک می‌کند. زمانی که ذرات جامد در بستر یک سیال قرار می‌گیرند، رفتار رئولوژیکی سامانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند که این امر توسط تغییر در میدان جریان صورت می‌گیرد. خواص رئولوژیکی دوغاب شاخص اصلی عملکرد فرآیند آماده‌سازی کامپوزیت است. دوغاب کامپوزیت‌های بسیار پر شده 10 تا 15% محتویات مایع و 85% محتویات جامد را تشکیل می‌دهد. گرانروی دوغاب کامپوزیت یک پارامتر مهم می‌باشد که نه‌تنها تحت تأثیر ترکیبات فاز مایع کامپوزیت است، بلکه تحت تأثیر اندازه، محتوا، شکل و خواص سطحی پرکننده‌های جامد نیز می‌باشد [13,14]. دو مورد بر رفتار رئولوژیکی کامپوزیت‌های بسیار پر شده نقش اساسی دارند: یکی تأثیر اجزای کامپوزیت‌ها که شامل سیستم اتصال-دهنده و کسر جرمی و توزیع اندازه ذرات اکسند و پودرهای فلزی است. مورد دیگر تأثیر شرایط فرآیند شامل دمای مخلوط کردن، زمان و ترتیب افزودن اجزاء می‌باشد [15]. گرانروی ماتریس یک پارامتر کلیدی است که باید بهینه شود تا بتواند فرآورش مواد و پراکنش ذرات را بهبود بخشد. انواع مختلف

<sup>1</sup> HTPB<sup>2</sup> TDI

اهمیت است. رایج‌ترین روش برای ارزیابی وضعیت مخلوط یا محلول، مقدار غلظت یا انحراف آن از غلظت موردنظر می‌باشد. در مورد دوغاب کامپوزیت زمانی می‌توان آن را همگن اعلام کرد که همه مواد (جامد و مایع) به خوبی در محصول پخش شده باشند یا در هر قسمت از محصول دارای ترکیب یکسانی باشد. یک نتیجه اختلاط خوب زمانی است که تمام ذرات جامد با یکدیگر مخلوط شده و توسط بایندر پوشانده شوند [23].

در سال 1991 موتیا و همکارانش [24] تأثیر دما بر رفتار رئولوژیکی دوغاب کامپوزیت بسیار پرشده را بررسی کردند. مشخص شده است که دوغاب بلافاصله پس از افزودن عامل شبکه‌کننده در دمای مختلف از 40 تا 90 °C رفتار غیر نیوتنی مستقل از زمان را نشان می‌دهد، اما با ادامه واکنش شبکه‌کننده، جریان بیشتر و بیشتر به زمان وابسته می‌شود.

## 2- اهمیت موضوع

در سال 1993 موتیا و همکارانش [25] به مطالعه تأثیر سرعت و زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی یک کامپوزیت بسیار پرشده پرداخته‌اند. زمان و سرعت اختلاط مستقیماً بر گرانیوی کامپوزیت تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین، بهینه‌سازی این پارامترها بر اساس نیازهای نهایی کامپوزیت از جمله سرعت سوزش، خواص مکانیکی و خواص رئولوژیکی ضروری است. با توجه به پارامترهای رئولوژیکی، زمان اختلاط دوغاب برای فرمولاسیون‌ها می‌تواند 180 دقیقه در سرعت اختلاط 18-25 دوربردقیقه ثابت نگه‌داشته شود و با افزایش زمان اختلاط، واکنش شبکه‌کننده غالب می‌شود.

در سال 2007 ماهاننا و همکارانش [20] رفتار رئولوژیکی کامپوزیت بسیار پرشده را با نرخ بارگذاری 86% و همراه عامل شبکه‌کننده را بررسی کرده‌اند. گرانیوی دوغاب کامپوزیت در محدوده دمایی 40-60 °C در زمان‌های متفاوت تا 5 ساعت پس از پایان اختلاط اندازه‌گیری و شاخص گرانیوی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. گرانیوی نمونه دوغاب کامپوزیت بعد از اضافه کردن عامل شبکه‌کننده تولون دی ایزوسیانات هریک در حمام آب گرم به صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌شوند. اندازه‌گیری گرانیوی دوغاب توسط دستگاه ویسکومتر بروکفیلد با تیغه T-E سری HADV2 با سرعت‌های برشی 1، 2.5، 4 و 6 دوربردقیقه انجام می‌شود. با افزایش سرعت برشی، گرانیوی دوغاب کامپوزیت کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده ماهیت شبه‌پلاستیک دوغاب کامپوزیت است. برای سیال غیرنیوتنی، چنین است که اگر گرانیوی با سرعت برشی کاهش یابد، میزان کاهش، شاخص شبه‌پلاستیک است. دوغاب در دمای پایین‌تر به رفتار نیوتنی نزدیک می‌شود و در دمای بالاتر رفتار غیر نیوتنی بیشتری دارد. علاوه بر این شاخص گرانیوی دوغاب صرف‌نظر از دما باگذشت زمان افزایش می‌یابد. این افزایش گرانیوی به دلیل واکنش شبکه‌شدگی و ایجاد اتصالات عرضی در دوغاب کامپوزیت می‌باشد.

در سال 2007 ماهاننا و همکارانش [20] رفتار رئولوژیکی کامپوزیت بسیار پرشده را با نرخ بارگذاری 86% و همراه عامل شبکه‌کننده را بررسی کرده‌اند. گرانیوی دوغاب کامپوزیت در محدوده دمایی 40-60 °C در زمان‌های متفاوت تا 5 ساعت پس از پایان اختلاط اندازه‌گیری و شاخص گرانیوی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. گرانیوی نمونه دوغاب کامپوزیت بعد از اضافه کردن عامل شبکه‌کننده تولون دی ایزوسیانات هریک در حمام آب گرم به صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌شوند. اندازه‌گیری گرانیوی دوغاب توسط دستگاه ویسکومتر بروکفیلد با تیغه T-E سری HADV2 با سرعت‌های برشی 1، 2.5، 4 و 6 دوربردقیقه انجام می‌شود. با افزایش سرعت برشی، گرانیوی دوغاب کامپوزیت کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده ماهیت شبه‌پلاستیک دوغاب کامپوزیت است. برای سیال غیرنیوتنی، چنین است که اگر گرانیوی با سرعت برشی کاهش یابد، میزان کاهش، شاخص شبه‌پلاستیک است. دوغاب در دمای پایین‌تر به رفتار نیوتنی نزدیک می‌شود و در دمای بالاتر رفتار غیر نیوتنی بیشتری دارد. علاوه بر این شاخص گرانیوی دوغاب صرف‌نظر از دما باگذشت زمان افزایش می‌یابد. این افزایش گرانیوی به دلیل واکنش شبکه‌شدگی و ایجاد اتصالات عرضی در دوغاب کامپوزیت می‌باشد.

در سال 2018 عبدالله و همکارانش [23] به بررسی همگنی یک کامپوزیت بسیار پرشده پرداخته‌اند. بررسی اثر زمان اختلاط بر همگنی دوغاب کامپوزیت با استفاده از نتایج چگالی برای ارزیابی و درجه همگنی در مطالعه آن‌ها انجام شده است و زمان اختلاط جامدات به دلیل اطمینان از آن‌ها که هر ماده جامد بتواند به خوبی توسط مواد مایع پوشش داده شود، متغیر اصلی این تحقیق بوده است. نتایج نشان داد که زمان اختلاط بر مقادیر چگالی تأثیر می‌گذارد و همگن‌ترین دوغاب در زمان کل اختلاط 135 دقیقه به دست آمد.

در سال 2020 نقی نژاد و همکارانش [26] اثر دمای ریخته‌گری 40-60 °C را بر رفتار رئولوژیکی یک کامپوزیت بسیار پرشده بررسی کرده‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داده است که افزایش دمای ریخته‌گری به سبب شبکه‌شدگی بیشتر،

## 3- بخش تجربی

### 3-1- مواد

در این پژوهش از رزین HTPB با متوسط وزن مولکولی 3090 g/mol، عدد هیدروکسیل 38.2 mg KOH/g و گرانیوی 5.256 Pa.s در دمای 40 °C، از نرم‌کننده دی اکتیل آدیپات با وزن مولکولی 370.6 g/mol، اسیدیته 0.15%، چگالی 0.924 gr/cm<sup>3</sup>، از تولون دی ایزوسیانات رایج‌ترین عامل شبکه‌کننده مورد استفاده در کامپوزیت بسیار پرشده بر پایه HTPB دارای خلوص 98.95%، وزن مخصوص 1.21 g/cc و ضریب شکست 1.567 در دمای 25 °C، از سورفاکتانت لسیترین جهت مرطوب‌شوندگی، پخش‌کننده و بهبود جریان پذیری و اصلاح گرانیوی با وزن مولکولی 311.2 g/mol، اسیدیته 0.30%، گرانیوی 8 Pa.s، چگالی 1.03 gr/cm<sup>3</sup> در دمای 20 °C و مواد جامد شامل پودر آلومینیوم با اندازه 15 μm، اکسیدکننده آمونیوم پرکلرات با سه اندازه 250 μm، 25 μm، 4 μm که توسط صنعت تهیه شدند، مورد استفاده قرار گرفتند.

### 3-2- فرآیند اختلاط و نحوه ساخت کامپوزیت‌های بسیار پرشده

اختلاط کامپوزیت‌های بسیار پرشده در زمان‌های 5، 10، 15 و 20 دقیقه برای هر ماده جامد با زمان کل فرآیند اختلاط 75، 95، 115 و 135 دقیقه به‌غیر از در نظر گرفتن زمان اختلاط افزودن عامل شبکه‌کننده به‌منظور بررسی رفتار رئولوژیکی و همگنی کامپوزیت در دمای اختلاط 40 °C مطابق فرمولاسیون جدول 1 انجام شد.

<sup>1</sup> Impulse

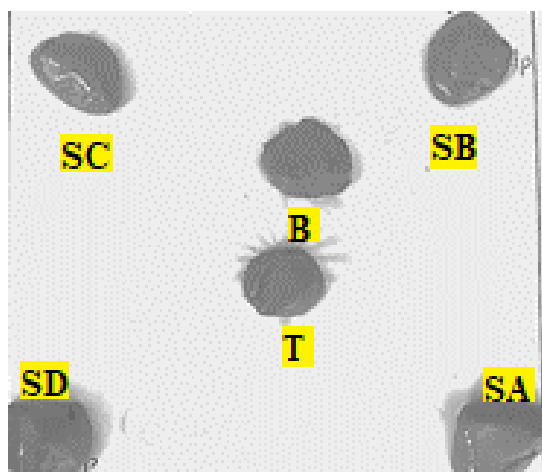


Fig. 2 Sampling locations for measurement of homogeneity in the mixer

شکل 2 مکان‌های نمونه‌برداری اندازه‌گیری همگنی در همزن

چگالی آن‌ها توسط دستگاه چگالی‌سنج مدل AS220/C/2 ساخت شرکت RADWAG با دقت سه رقم اعشار و استاندارد ASTM D792 انجام پذیرفت که اساس کار این دستگاه اندازه‌گیری حجم آب جایجا شده در اثر وزن کامپوزیت می‌باشد.

#### 4- نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج آزمایش‌های بررسی تأثیر زمان اختلاط بر گرانیوی و همگنی روی نمونه کامپوزیت‌های «بایندر/آلومینیوم AP» در «بایندر/آلومینیوم AP» با عامل شبکه‌کننده» در دمای اختلاط 40 °C پرداخته می‌شود.

#### 4-1- بررسی اثر زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی

شکل 3 نمودار تغییرات رفتار جریان نسبت به سرعت برشی را در زمان‌های کل فرآیند اختلاط 75، 95، 115 و 135 دقیقه در کامپوزیت‌های «HTPB/Al/AP» و «HTPB/Al/AP + TDI» با دمای اختلاط 40 °C را نشان می‌دهند. شکل‌ها نشان می‌دهد که زمان اختلاط مستقیماً بر گرانیوی تأثیر می‌گذارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برشی گرانیوی در حال کاهش است که رفتار غیر نیوتنی شبه‌پلاستیک و پدیده رقیق شونده برشی دوغاب را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت برشی لخته‌ها که ذرات تجمع شده ناشی از پودر آلومینیوم و آمونیوم پرکلرات با بایندر و هم‌چنین عامل شبکه‌کننده هستند، تجزیه شده و موجب کاهش ویسکوزیته می‌گردد و علت دیگر این رفتار ناشی از ساختار مولکولی بایندر و چگالی فشردگی پرکننده است. از سوی دیگر، با افزایش سرعت برشی، برهمکنش بین مولکول‌ها کاهش یافته و نقطه درهم‌تنیدگی آن‌ها به تدریج باز می‌شود و موجب تضعیف نیروهای بین زنجیره‌های مولکولی و کاهش مقاومت بین آن‌ها می‌گردد و در نتیجه گرانیوی کاهش می‌یابد و دوغاب در سرعت برشی‌های بالاتر پیوسته کمتر شبه پلاستیک می‌شود [28]. با توجه به این‌که گرانیوی پایین، نتیجه رفتار رئولوژیکی بهتر را به همراه دارد؛ پس با افزایش سرعت برشی می‌توان به نتایج بهتری رسید و به‌عنوان یک مزیت در نظر گرفت.

جدول 1 فرمولاسیون کامپوزیت‌های بسیار پرشده با عامل شبکه‌کننده

Table 1 Highly filled composites formulation based on HTPB with curing agent

ردیف	نام ماده	نقش ماده	درصد وزنی فرمولاسیون	مقدار $\Gamma$ (NCO/OH)
1	Al	پودر فلزی	50	0.85
2	AP <sub>C</sub>	اکسیدکننده درشت	9.2	
3	AP <sub>F</sub>	اکسیدکننده ریز	11.5	
4	AP <sub>UF</sub>	اکسیدکننده فوق‌ریز	13.8	
5	HTPB	پیش‌پلیمر	12.4	
6	DOA	نرم‌کننده	2.02	
7	TDI	عامل شبکه‌کننده	0.77	
8	Lecithin	سورفاکتانت	0.31	

فرآیند اختلاط و نحوه ساخت کامپوزیت‌های بسیار پرشده در چند مرحله انجام شد. در مرحله اول سیستم بایندر متشکل از پیش‌پلیمر، نرم‌کننده و سورفاکتانت لسیتین را در همزن سیاره‌ای دو پره‌ای ریخته و مخلوط به مدت 15 دقیقه با سرعت اختلاط 20 دور بر دقیقه به خوبی هم زده شد. در مرحله دوم مخلوط کردن هر یک از مواد جامد در طول زمان مشخص شده با پودر آلومینیوم و سپس ذرات ریز تا درشت آمونیوم پرکلرات با سرعت اختلاط 20 دور بر دقیقه بود. در نهایت، عامل شبکه‌کننده به مخلوط اضافه و به مدت 16 دقیقه با سرعت اختلاط 15 دور بر دقیقه هم زده شد، سپس این دوغاب به‌عنوان محصول اختلاط نهایی نامیده شد. شکل 1 شکل ظاهری مخلوط دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP) را نشان می‌دهد.



Fig. 1 Composite slurry (HTPB/Al/AP)

شکل 1 دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)

#### 3-3- روش آزمایش

در این پژوهش رفتار رئولوژیکی و همگنی در کامپوزیت‌های «بایندر/آلومینیوم AP» و «بایندر/آلومینیوم AP» با عامل شبکه‌کننده» در زمان‌های کل فرآیند اختلاط 75، 95، 115 و 135 دقیقه مورد بررسی قرار گرفت.

#### 3-3-1- بررسی رفتار رئولوژیکی

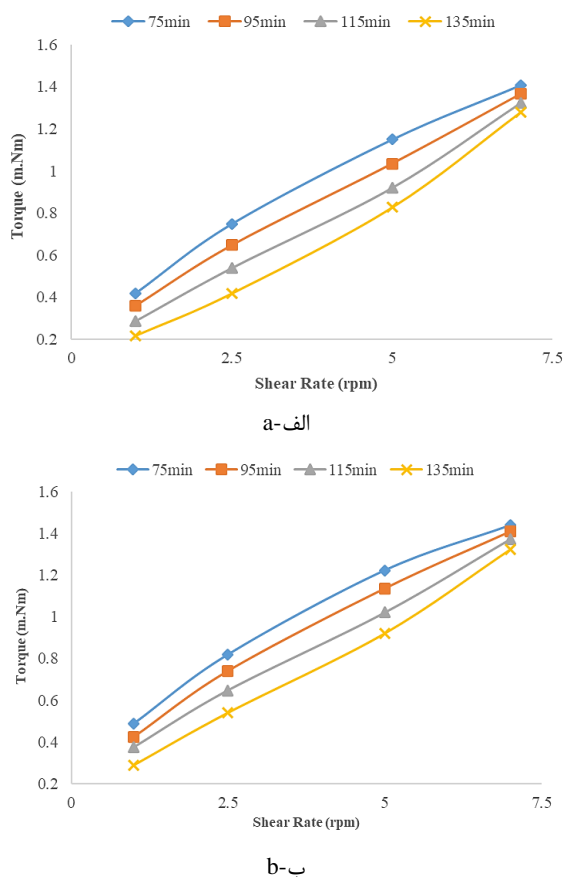
برای تعیین گرانیوی کامپوزیت‌های بسیار پرشده از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد مدل DV2THA ساخت کشور ایالات متحده استفاده شده است. با استفاده از این دستگاه، گرانیوی و مقدار گشتاور در سرعت‌های مشخص در دمای 40 °C توسط تیغه T-F اندازه‌گیری شد.

#### 3-3-2- تعیین همگنی

شش مکان در همزن برای نمونه‌برداری انتخاب شده است؛ در پره، در چهار گوشه همزن و در وسط همزن که به ترتیب با SA، B، SC، SB، SD و T مطابق شکل 2 کدگذاری شده‌اند و تمام نمونه گرفته‌شده قسمت سطحی دوغاب در همزن می‌باشد. برای بررسی همگنی کامپوزیت‌های بسیار پرشده با استفاده از

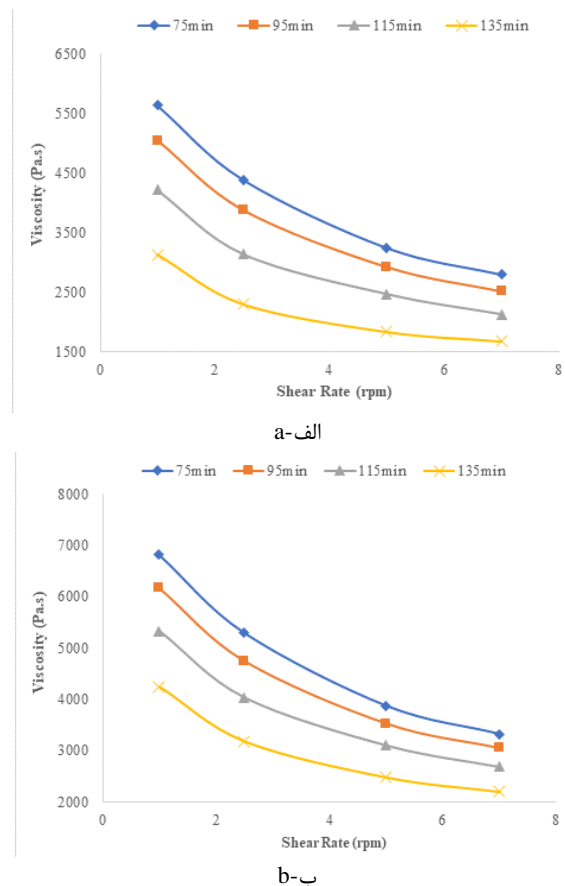
واکنش شبکه‌شدگی در دوغاب کامپوزیت به دلیل ایجاد اتصالات عرضی باعث افزایش گرانیوی می‌شود و شاخص شبه‌پلاستیک را کاهش می‌دهد. زمان کل فرآیند اختلاط 135 دقیقه کمترین گرانیوی را از خود نشان داد. این زمان به دلیل مرطوب شونده‌گی بهتر ذرات جامد با سیستم بایندر، رفتار رئولوژیکی بهتری به علت شاخص شبه‌پلاستیک کمتر و با توجه به مقدار  $R^2$  بیشتر دارد و تمایل بیشتری به سمت رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهد [29].

نیروی گشتاور لازم برای هم زدن کامپوزیت‌های «HTPB/Al/AP» و «HTPB/Al/AP» + TDI محاسبه و در شکل 4 نمودارهای گشتاور در زمان‌های مختلف فرآیند در هر کامپوزیت ترسیم شد. شکل‌ها نشان می‌دهند که گشتاور به‌صورت خطی با افزایش سرعت برشی به دلیل افزایش تنش برشی افزایش می‌یابد. با افزایش زمان اختلاط در هر یک از سرعت‌های برشی مشخص؛ گرانیوی، تنش برشی و گشتاور کاهش می‌یابد.



**Fig. 4** Changes in torque relative to shear rate composites; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite  
 شکل 4 تغییرات گشتاور نسبت به سرعت برشی کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI

شکل 5 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر گرانیوی کامپوزیت‌های «HTPB/Al/AP» و «HTPB/Al/AP» + TDI را نشان می‌دهد. شکل‌ها نشان می‌دهند که زمان اختلاط مستقیماً بر گرانیوی بسیار پرشده تأثیر می‌گذارد با افزایش زمان اختلاط به دلیل مرطوب شونده‌گی بهتر اتصال - دهنده (بایندر) - پرکننده گرانیوی تمایل به کاهش دارد. همچنین، تمایل به افزایش گرانیوی از طریق کاهش اندازه ذرات آمونیوم پرکلرات ناشی می‌شود.



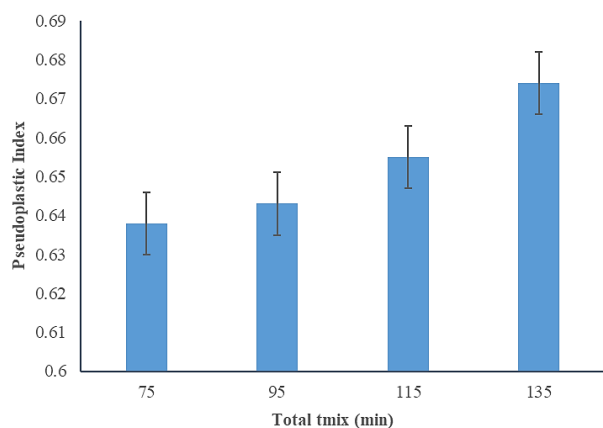
**Fig. 3** Rheological behavior of composites; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite  
 شکل 3 رفتار جریان کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI

با توجه به نتایج شکل 3، اگر تغییرات دما مورد بررسی قرار می‌گرفت، انتظار می‌رفت با افزایش دما، گرانیوی کمتری را به دلیل افزایش تحرک زنجیره‌های پلیمر در سرعت‌های برشی مختلف ثبت کرد و بالعکس. به‌منظور تعیین رفتار رئولوژیکی دوغاب بسیار بارگذاری شده با معادله سیال قانون توان  $(\eta = K\dot{\gamma}^m)$ ، با مرتب کردن نمودار و انطباق داده‌ها، مقدار n-1 به‌صورت m منظور شد و معادله به شکل  $(\eta = K\dot{\gamma}^n)$  یافت. نتایج محاسبات و پارامترهای معادله قانون توان در جدول 2 آورده شده است.

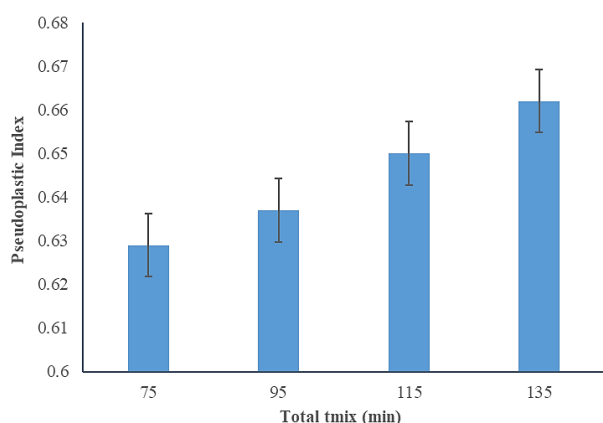
جدول 2 پارامترهای معادله سیال قانون توان در کامپوزیت‌های (HTPB/Al/AP) و (HTPB/Al/AP) + TDI با زمان کل فرآیند اختلاط 75، 95، 115 و 135 دقیقه

**Table 2** Power law fluid equation parameters in (HTPB/Al/AP) and (HTPB/Al/AP) + TDI composites with total mixing time of 75, 95, 115 and 135 minutes

R <sup>2</sup>	k	n=m+1	m	زمان (min)	نمونه
0.986	5.790	0.638	-0.362	75	Al/Binder/AP
0.984	7.019	0.629	-0.371	75	Al/Binder/AP/TDI
0.990	5.156	0.643	-0.357	95	Al/Binder/AP
0.989	6.325	0.637	-0.363	95	Al/Binder/AP/TDI
0.997	4.253	0.655	-0.345	115	Al/Binder/AP
0.995	5.405	0.650	-0.350	115	Al/Binder/AP/TDI
0.999	3.107	0.674	-0.326	135	Al/Binder/AP
0.999	4.272	0.662	-0.338	135	Al/Binder/AP/TDI



a-الف



b-ب

**Fig. 6** Effect of total time of mixing process on pseudoplastic index of composites; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite

شکل 6 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر شاخص شبه پلاستیک کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI

جدول 3 نتایج چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)

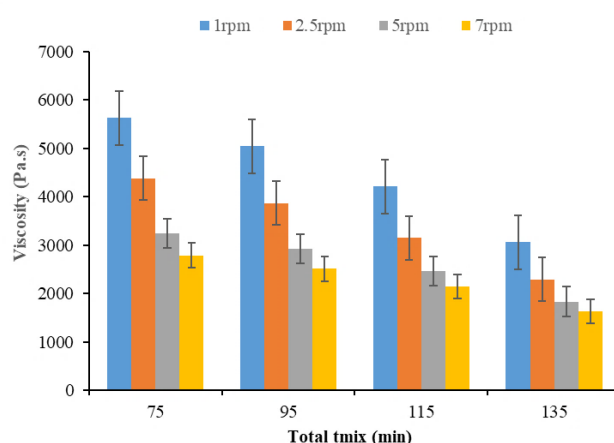
**Table 3** Composite slurry density results (HTPB/Al/AP)

چگالی دوغاب کامپوزیت در مکان‌های مشخص (g/ml)						زمان (min)
T	SD	SC	SB	SA	B	
1.8609	1.8517	1.8744	1.8526	1.8985	1.8898	75
1.8616	1.8580	1.8535	1.8673	1.8867	1.8722	95
1.8868	1.8881	1.8740	1.8837	1.8994	1.8746	115
1.8895	1.8852	1.8907	1.8818	1.8902	1.8924	135

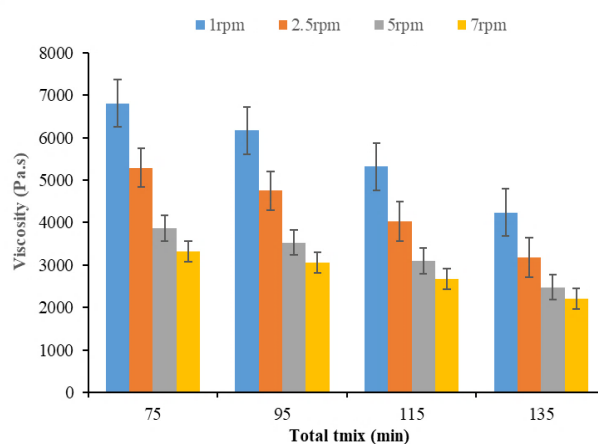
جدول 4 نتایج چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI قبل از شبکه‌شدگی

**Table 4** Density results of composite slurry (HTPB/Al/AP) + TDI before composite cross-linking

چگالی دوغاب کامپوزیت در مکان‌های مشخص (g/ml)						زمان (min)
T	SD	SC	SB	SA	B	
1.8356	1.8342	1.8694	1.8461	1.8608	1.8745	75
1.8788	1.8507	1.8650	1.8449	1.84112	1.8631	95
1.8710	1.8644	1.8602	1.8515	1.8592	1.8528	115
1.8605	1.8630	1.8591	1.8646	1.8583	1.8657	135



a-الف



b-ب

**Fig. 5** Effect of total time of mixing process on viscosity of composites; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite

شکل 5 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر گرانیوی کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI

شکل 6 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر شاخص شبه پلاستیک کامپوزیت‌های (HTPB/Al/AP) و (HTPB/Al/AP) + TDI را نشان می‌دهد. افزایش تدریجی مقدار n با زمان اختلاط به وضوح قابل مشاهده است. با افزایش زمان اختلاط، دوغاب به طور مداوم کمتر شبه پلاستیک می‌شود. علت آن یکی اثر خرد شدن آمونیوم پرکلرات است که ذرات را ریزتر می‌کند و دیگری به دلیل مرطوب شدن بهتر ذرات جامد توسط مایع است.

#### 2-4- بررسی اثر زمان اختلاط بر همگنی

بررسی همگنی کامپوزیت‌های بایندر/آلومینیوم/AP (HTPB/Al/AP) و کامپوزیت‌های بایندر/آلومینیوم/AP + TDI (HTPB/Al/AP) قبل و بعد از شبکه‌شدگی کامپوزیت با استفاده از چگالی اندازه‌گیری شده است و در ادامه به تجزیه و تحلیل همگنی در دوغاب مخلوط کامپوزیتی و کامپوزیت شبکه شده پرداخته می‌شود. نتایج آزمایشگاهی چگالی دوغاب مخلوط کامپوزیتی در کامپوزیت (HTPB/Al/AP) و کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI قبل از شبکه‌شدگی کامپوزیت در مکان‌های مشخص به ترتیب در جدول 3 و 4 آورده شده است.

نتایج آزمایشگاهی چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI شبکه‌شده در مکان‌های مشخص در جدول 5 آورده شده است.

**جدول 10** درجه همگنی (مقدار cv) چگالی دوغاب کامپوزیت TDI+(HTPB/Al/AP) قبل از شبکه‌شدگی

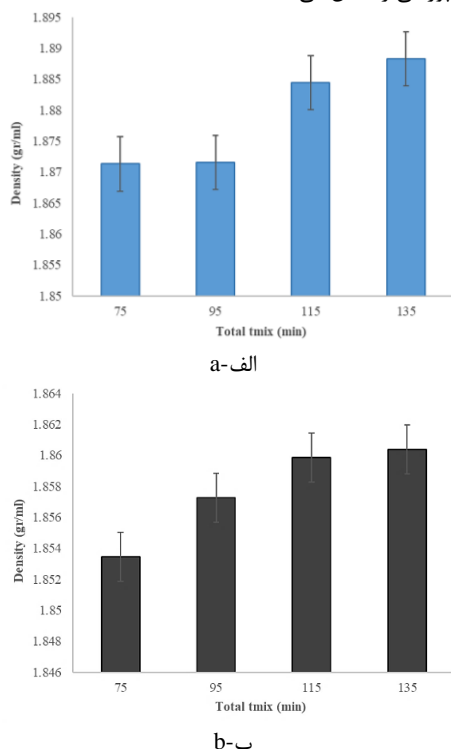
Table 10 Homogeneity (cv value) density of composite slurry (HTPB/Al/AP) + TDI before composite cross-linking				
135	115	95	75	زمان (min)
0.159	0.391	0.765	0.932	cv (%)
99.84	99.61	99.23	99.06	درجه همگنی (%)

**جدول 11** درجه همگنی (مقدار cv) چگالی کامپوزیت TDI + (HTPB/Al/AP) شبکه‌شده

Table 11 Degree of homogeneity (cv value) of composite density (HTPB/Al/AP) + TDI cross-linked				
135	115	95	75	زمان (min)
0.081	0.292	0.614	0.890	cv (%)
99.92	99.70	99.38	99.11	درجه همگنی (%)

همان‌طور که مقدار cv تنوع داده‌ها را تعیین می‌کند، یکنواختی داده‌ها را می‌توان با درصد بقیه تعیین کرد. این را می‌توان به‌عنوان درجه همگنی بیان کرد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار cv، مقدار همگنی کاهش می‌یابد. مقدار cv محاسبه‌شده در زمان اختلاط کل فرآیند 135 دقیقه بالاترین مقدار به دست آمد که ناشی از اختلاط کامل ذرات پرکننده با باینر می‌باشد و درجه همگنی بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها داشت. نتایج مطالعه سایر محققین این امر را تأیید می‌کند و کاملاً مطابقت دارد [22-24]. شکل 7 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر چگالی دوغاب مخلوط کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

شکل 8 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر درجه همگنی (مقدار cv) دوغاب مخلوط کامپوزیتی را نشان می‌دهد.



**Fig. 7** Effect of the total time of the mixing process on the density of the composites slurry; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite before cross-linking

شکل 7 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر چگالی دوغاب کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت TDI + (HTPB/Al/AP) قبل از شبکه‌شدگی

**جدول 5** نتایج چگالی کامپوزیت TDI + (HTPB/Al/AP) شبکه‌شده

Table 5 Composite density results (HTPB/Al/AP) + TDI Cross-linked						
چگالی دوغاب کامپوزیت جامد در مکان‌های مشخص (g/ml)						زمان (min)
T	SD	SC	SB	SA	B	
1.8235	1.8283	1.8118	1.7906	1.8032	1.8326	75
1.8251	1.8329	1.8084	1.8077	1.8325	1.8203	95
1.8270	1.8232	1.8245	1.8229	1.8201	1.8354	115
1.8292	1.8287	1.8300	1.8321	1.8279	1.8285	135

نتایج نشان داد که مقدار میانگین چگالی دوغاب مخلوط کامپوزیتی و کامپوزیت شبکه‌شده در هر مکان برای همه متغیرهای زمان اختلاط نسبتاً یکسان و نزدیک به یکدیگر است. میانگین چگالی در هر مکان نسبتاً یکسان بوده و تفاوت چندانی ندارد و از آنجایی که محتوای AP ریز در مخلوط‌های فرآوری شده در راکتورهای کوچک‌تر بیشتر است، انتظار می‌رود که چگالی نیز بیشتر باشد. برای یافتن همگن‌ترین دوغاب باید پردازش داده انجام شود. میانگین، واریانس و انحراف معیار چگالی دوغاب مخلوط کامپوزیتی و کامپوزیت شبکه‌شده به ترتیب در جدول 6 تا 8 آورده شده است.

**جدول 6** میانگین، واریانس و انحراف معیار چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)

Table 6 Average, variance and standard deviation of the density of composite slurry (HTPB/Al/AP)					
135	115	95	75	زمان (min)	
1.88830	1.88443	1.87155	1.87132	$\bar{x}$	
0.00002	0.00009	0.00023	0.00039	$s^2$	
0.00399	0.00948	0.01524	0.01967	$s$	

**جدول 7** میانگین، واریانس و انحراف معیار چگالی دوغاب کامپوزیت TDI+(HTPB/Al/AP) قبل از شبکه‌شدگی

Table 7 Average, variance and standard deviation of composite slurry density (HTPB/Al/AP) + TDI before cross-linking					
135	115	95	75	زمان (min)	
1.86037	1.85985	1.85728	1.85344	$\bar{x}$	
0.00001	0.00005	0.00020	0.00030	$s^2$	
0.00297	0.00728	0.01426	0.01729	$s$	

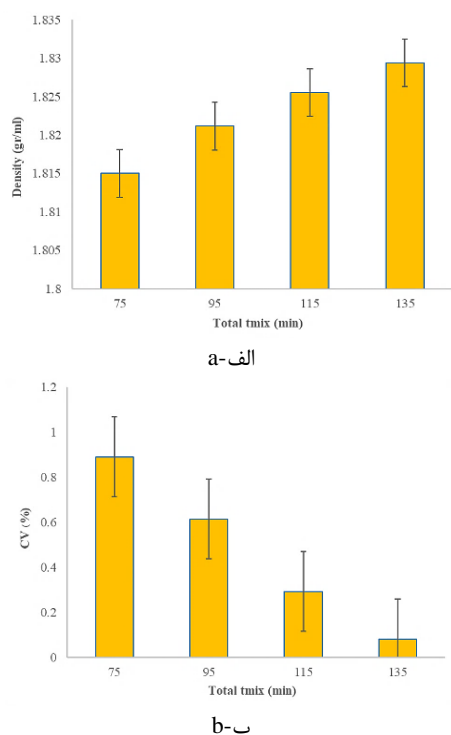
**جدول 8** میانگین، واریانس و انحراف معیار چگالی کامپوزیت TDI + (HTPB/Al/AP) شبکه‌شده

Table 8 Average, variance and standard deviation of composite density (HTPB/Al/AP) + TDI cross-linked					
135	115	95	75	زمان (min)	
1.82941	1.82552	1.82116	1.81500	$\bar{x}$	
0.000002	0.00003	0.00013	0.00026	$s^2$	
0.0015	0.00534	0.01120	0.01615	$s$	

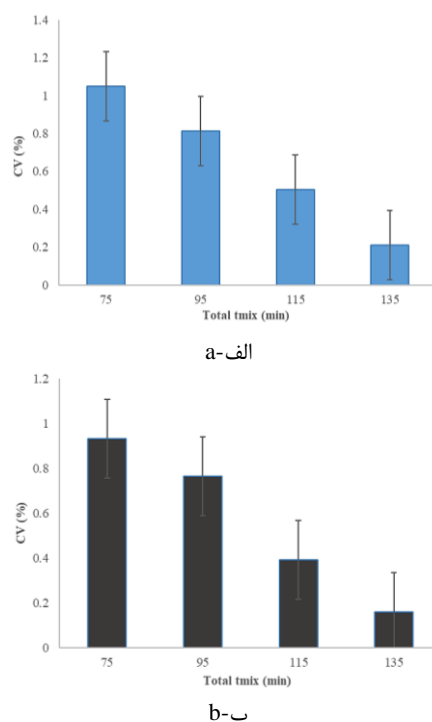
نتایج نشان داد که زمان اختلاط بر مقدار همگنی و چگالی تأثیر می‌گذارد. با افزایش زمان اختلاط مقدار چگالی نسبتاً افزایش یافت. برای بیان تنوع داده‌ها از ضریب واریانس (cv) استفاده می‌شود. cv به‌عنوان میانگین انحراف معیار و یک مقدار بحرانی برای ارزیابی کیفیت فرآیند اختلاط می‌باشد و مقدار آن برحسب درصد بیان می‌شود و نتایج آن در جدول 9 تا 11 آورده شده است.

**جدول 9** درجه همگنی (مقدار cv) چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)

Table 9 Degree of homogeneity (cv value) density of composite slurry (HTPB/Al/AP)					
135	115	95	75	زمان (min)	
0.211	0.503	0.814	1.051	cv (%)	
99.78	99.49	99.18	98.95	درجه همگنی (%)	



**Fig. 9** Effect of the total time of the mixing process on the degree of homogeneity (cv value) and density of the composite (HTPB/Al/AP) + TDI cross-linked; (a) density, (b) degree of homogeneity (cv value) شکل 9 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر درجه همگنی (مقدار CV) و چگالی کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI شبکه‌شده؛ (الف) چگالی، (ب) درجه همگنی (مقدار CV)



**Fig. 8** Effect of the total time of the mixing process on the degree of homogeneity (cv value) of the composites slurry; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite before cross-linking شکل 8 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر درجه همگنی (مقدار CV) دوغاب کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI قبل از شبکه‌شدگی

هم‌چنین از آنجایی که عبدالله و همکارانش [23] تا زمان اختلاط کل فرآیند 135 دقیقه مطالعات خود را انجام داده بودند، برای بررسی و مقایسه نتایج خود با آن‌ها، این تحقیق هم تا این زمان مورد بررسی قرار گرفت.



**Fig. 10** Composite agglomeration at 25 °C شکل 10 آگلومره شدن کامپوزیت در دمای 25 °C

### 5- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی اثر زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی و همگنی کامپوزیت بسیار پرشده نتایج به‌دست‌آمده به شرح ذیل است:

1- مشاهده شد که گرانیروی و وابستگی آن به سرعت برشی با رفتار سیال شبه‌پلاستیک مطابقت دارد و عملکرد غلیظ‌شدگی برشی کامپوزیت بسیار

شکل 9 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر چگالی و درجه همگنی (مقدار CV) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI شبکه‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج پارامترهای رفتار رئولوژیکی و همگنی کامپوزیت بسیار پرشده و تأثیر آن بر خواص فیزیکی و مکانیکی محصول نهایی، انتظار می‌توان داشت که با افزایش زمان اختلاط، نمونه‌ها سختی کمتری را با توجه به چگالی اتصال عرضی، سرعت شبکه‌شدگی، مرطوب‌شوندگی بهتر ذرات پرکننده با بایندر و هم‌چنین افزایش زمان تماس بین مواد جامد و مایع، داشته باشند. زمان اختلاط نیز تأثیر بسزایی بر ازدیاد طول و تنش نمونه‌ها دارد. برای تمامی نمونه‌ها با افزایش زمان کل فرآیند اختلاط به ترتیب ازدیاد طول بیشتری مشاهده خواهد شد. با افزایش چگالی اتصالات عرضی، مدول روند صعودی به خود می‌گیرد. قابلیت ازدیاد طول بیشتر ناشی از چسبندگی سطحی قوی‌تر بین پرکننده جامد و بایندر است. با توجه به این که در کامپوزیت بسیار پرشده بار جامد فلزی آن‌ها خیلی بیشتر از کامپوزیت‌های متداول است، عمر کاربری آن کوتاه‌تر می‌شود. بنابراین هرچه گرانیروی بیشتر باشد ازدیاد طول کم‌تر می‌شود.

اختلاط کامپوزیت‌های بسیار پرشده در دمای محیط (25 °C) نیز مورد بررسی قرار گرفته بود و از آنجایی که به دلیل دمای پایین و افزایش بیش‌ازحد گرانیروی و رفتار رئولوژیکی نامطلوب کامپوزیت‌ها را به همراه داشت و اختلاط به‌سختی انجام می‌شد و ذرات به‌صورت تجمع و آگلومره درمی‌آمدند، از انجام دادن اندازه‌گیری رفتار رئولوژیکی و همگنی در دمای محیط صرف‌نظر شد (شکل 10).

- [12] Lade, R., Wasewar, K., Sangtyani, R., Kumar, A., Peshwe, D. and Shende, "Effect of Aluminium Nanoparticles on Rheology of AP Based Composite Propellant: Experimental Study and Mathematical Modelling," *Molecular Simulation*, Vol. 47, No. 6, pp.526-535, 2021.
- [13] Restasari, A., Budi, R.S. and Hartaya, K., "Pseudoplasticity of Propellant Slurry with Varied Aluminium Content for Castability Development," In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1005, No. 1, P. 012034. Iop Publishing, 2018.
- [14] Rueda, M.M., Auscher, M.C., Fulchiron, R., Périé, T., Martin, G., Sonntag, P. and Cassagnau, P., "Rheology and Applications of Highly Filled Polymers: A Review of Current Understanding. Progress in Polymer Science, Vol. 66, pp. 22-53, 2017.
- [15] Pang, W., "Boron-Based Fuel-Rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects," CRC Press, 2019.
- [16] Barghamadi, M. and Ghasemi, I., "Rheology of Highly Filled Polymers," In *Persian, Basparesh*, Vol. 10, No. 4, pp. 16-30, 2021.
- [17] Esapur, A. and Kebritchi, A., "Chemorheological Investigation on The Effect of Three Polymerization Retardants on Hydroxyl Terminated Poly butadiene-based Polyurethane-Forming Rate," In *Persian, Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp.17-31, 2023.
- [18] Erişken, C., Göçmez, A., Yilmazer, Ü., Pekel, F. and Özkar, S., "Modeling and Rheology of HTPB Based Composite Solid Propellants," *Polymer Composites*, Vol. 19, No. 4, pp.463-472, 1998.
- [19] Kukla, C., Duretek, I., Gonzalez-Gutierrez, J. and Holzer, C., "Rheology of Highly Filled Polymers," *Polymer Rheology*, pp.153-173, 2018.
- [20] Mahanta, A.K., Dharmasaktu, I. and Pattanayak, P.K., "Rheological Behaviour of HTPB-Based Composite Propellant: Effect of Temperature and Pot Life on Casting Rate," *Defence Science Journal*, Vol. 57, No. 4, pp.435-442, 2007.
- [21] Abdillah, L.H., Winardi, S., Sumarno, S. and Nurtono, T., "Effect of Mixing Time to Homogeneity of Propellant Slurry," *IPTEK Journal of Proceedings Series*, (1), pp.94-98, 2018.
- [22] Da Cunha, B.C.C. And Rocco, J.A.F.F., "The Influence of the Type and Size of the Reactor and The Influence of the Heating Interruption During Curing on The Solid Composite Propellant Properties. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 139, No. 6, P.51609, 2022.
- [23] Abdillah, L.A., Restasari, A., Hartaya, K. And Budiman, Y., "The Selection of Composite Solid Propellant Process Condition Based on Flow Characteristics of Propellant Slurry," In *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2226, No. 1. AIP Publishing, 2020.
- [24] Muthiah, R.M., Manjari, R., Krishnamurthy, V.N. And Gupta, B.R., "Effect of Temperature on the Rheological Behavior of Hydroxyl Terminated Polybutadiene Propellant Slurry," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 31, No. 2, pp.61-66, 1991.
- [25] Muthiah, R., Manjari, R., Krishnamurthy, V.N. And Gupta, B.R., "Rheology of HTPB Propellant: Effect of Mixing Speed and Mixing Time," *Defence Science Journal*, Vol. 43, No. 2, pp.167-172, 1993.
- [26] Mohamad, T.N.H., Kebritchi, A., Niazi, M.R. and Mombini, J., "Effect of Curing Agent, Temperature, and Catalyst on Physical-Mechanical Properties of HTPB-Based Highly-filled Composite," In *Persian, IQBQ*; Vol. 3, No. 4, pp.25-42, 2020.
- [27] Kangoie, M. And Farsani, R., "Investigating The Mechanical Behavior and Microstructure of Basalt Fibers-Aluminum Composite Fabricated by Thixomixing Method," In *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 10, No. 1, pp.2184-2192, 2023.
- [28] Wu, Y., Li, Z., Ji, Y.C. and Lu, R., "Experimental Study of Rheological Properties of Solid Propellant Slurry at Low-Shear Rate and Numerical Simulation," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 137, No. 42, P.49287, 2020.
- [29] Sapozhnikov, I. and Chernov, V., "Rheological Properties of Composite Polymer Liner Based on Hydroxyl-Terminated Polybutadiene," *Journal of Aerospace Technology and Management*, Vol. 12, P.E 2220, 2020.

پرشده با افزایش سرعت برشی به رقیق‌شدگی برشی تغییر می‌کند. افزایش گرانیروی به علت ذرات جامد ریزتر و افزایش وزن مولکولی و تشکیل اتصالات عرضی در ساختار پیش‌پلیمر می‌باشد.

2- سیالیت دوغاب کامپوزیت هنگامی که با ذرات ریزودرشت آموموم پرکلرات ترکیب می‌شوند و تشکیل کامپوزیت بایندر/آلومینیوم/AP/HTPB/Al/AP را می‌دهند، رفتار غیر نیوتنی بیشتری از خود نشان دادند و هم‌چنین هنگامی که عامل شبکه‌کننده به کامپوزیت اضافه گردید کامپوزیت شبه‌پلاستیک‌تر شد.

3- نشان داده شد که رفتار رئولوژیکی کامپوزیت بسیار پرشده به‌طور قابل‌توجهی به برهمکنش‌های فیزیکی میان مواد پرکننده و ماتریس بستگی دارد. علاوه بر این، مشاهده شد که تغییرات اندازه ذرات جامد در طول فرآورش منجر به رفتار رئولوژیکی غیرمنتظره کامپوزیت بسیار پرشده می‌شود.

4- همگن‌ترین دوغاب کامپوزیت در زمان کل فرآیند اختلاط 135 دقیقه به دست آمد که ناشی مرطوب شونده‌گی بهتر ذرات پرکننده با ماتریس پلیمری و اختلاط کامل ذرات پرکننده با بایندر (اتصال‌دهنده) می‌باشد.

## 6- مراجع

- [1] Rothberg, H.S., Pietsch, S., Schneider, G.A. and Heinrich, S., "Fabrication of Highly Filled Composites with an Innovative Miniaturized Spouted Bed," *Processes*, Vol. 8, No. 5, pp. 521, 2020.
- [2] Bek, M., Gonzalez-Gutierrez, J., Kukla, C., Pušnik Črešnar, K., Maroh, B. and Slemenik Perše, L., "Rheological Behaviour of Highly Filled Materials for Injection Moulding and Additive Manufacturing: Effect of Particle Material and Loading," *Applied Sciences*, Vol. 10 No. 22, pp. 7993, 2020.
- [3] Muthiah, R.M., Krishnamurthy, V.N. and Gupta, B.R., "Rheology of HTPB Propellant. I. Effect of Solid Loading, Oxidizer Particle Size, and Aluminum Content," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 44, No. 11, pp. 2043-2052, 1992.
- [4] Bandgar, B.M., Mukundan, T., Muthiah, R., Sharma, K. and Krishnamurthy, V.N., "Rheological Characterization and Modeling of Composite Propellant Slurry," 2003.
- [5] Zhang, Q., Shu, Y., Liu, N., Lu, X., Shu, Y., Wang, X., Mo, H. And Xu, M., "Hydroxyl Terminated Polybutadiene: Chemical Modification and Application of These Modifiers in Propellants and Explosives," *Central European Journal of Energetic Materials*, Vol. 16, No. 2, pp. 153-183, 2019.
- [6] Zhang, P., Tan, W., Zhang, X., Chen, J., Yuan, J. and Deng, J., "Chemical Modification of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene and Its Application in Composite Propellants," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 60, No. 10, pp. 3819-3829, 2021.
- [7] Quagliano Amado, J.C., Ross, P.G., Mattos Silva Murakami, L. and Narciso Dutra, J.C., "Properties of Hydroxyl - Terminal Polybutadiene (HTPB) and Its Use as A Liner and Binder for Composite Propellants: A Review of Recent Advances," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 47, No. 5, P.E 202100283, 2022.
- [8] Lysien, K., Stolarczyk, A. And Jarosz, T., "Solid Propellant Formulations: A Review of Recent Progress and Utilized Components," *Materials*, Vol. 14, No. 21, P. 6657, 2021.
- [9] Prasad, C.H., Arunachalam, V. and Ranganathan, V., "Effect of the Formulation of Ingredients and the Process Parameters on the Fracture Toughness of HTPB Based Composite Solid Propellant." *Journal of Energy and Chemical Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 94-105, 2014.
- [10] John, T., "Studies on Burning Rates of Aluminum, Magnesium and Their Alloy Based Fuel Rich Propellants for Integrated Rocket Ramjet Applications," M.Sc. Thesis, Poona University (India), 1988.
- [11] Athawale, B.K., "Studies on Fuel Rich Metallized Solid Rocket Propellants," Ph.D. Thesis, Savitribai Phule Pune University (India), 1995.



اصلاحیه به:

مقاله چاپ شده در فصلنامه جلد 10، شماره 3، پائیز 1402، صص: 2257-2265

## ارزیابی ترک زمینه در کامپوزیت‌های متعامد به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده لمب

امیررضا امیری‌نژاد<sup>1</sup>، سیاوش کاظمی‌راد<sup>2\*</sup>، محمود مهرداد شکرپه<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* skazemirad@iust.ac.ir، صندوق پستی 16846-13114

نویسندگان درخواست تغییر نام انگلیسی نویسنده اول از “Amirreza, Amirinejad” به “Amirreza, Amirinejad” در بخش انگلیسی ارجاع به مقاله را داشته‌اند که در این اصلاحیه اعمال شده است. لازم به ذکر است این امر بنا به درخواست کتبی نویسندگان انجام شده است.

### Corrigendum to:

The paper was published in: Vol. 10, No. 3, Autumn 2024, Pages: 2257-2265

### Evaluation of matrix cracking in cross-ply composites using the finite element simulation of guided Lamb wave propagation

Amirreza Amirinejad<sup>1</sup>, Siavash Kazemirad<sup>1\*</sup>, Mahmood Mehrdad Shokrieh<sup>1</sup>

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\*P.O. Box 16846-13114, Tehran, Iran, skazemirad@iust.ac.ir

The authors requested to change the English name of the first author from “Amirreza, Amirinejad” to “Amirreza, Amirinejad” in the English section of the article reference, which is implemented in this amendment. It should be noted that this was done according to the written request of the authors.



نشریه علمی پژوهشی  
**کامپوزیت**  
علوم و فناوری  
<http://jstc.iust.ac.ir>



## قالب پیش‌نویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرم‌افزار ورد (استایل عنوان)

نام و نام‌خانوادگی نگارنده اول<sup>1</sup>، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم<sup>2\*</sup>، نام و ... نگارنده سوم<sup>3</sup>، ... (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمی نگارنده، رشته تخصصی، نام سازمان، نام شهر (استایل مشخصات نویسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* شهر، صندوق پستی 16846-13114، پست الکترونیکی نویسنده‌دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

### چکیده (سبک عنوان چکیده)

### اطلاعات مقاله:

در این قالب (تمپلیت)، شیوه‌ی تهیه‌ی سریع ساختار مقاله با استفاده از امکانات استایل (سبک) نرم‌افزار ورد برای مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت شرح داده شده است. روش قالب‌بندی مقاله، بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازه آن‌ها، به‌طور کامل در استایل‌ها تهیه شده است و کافی است نویسندگان با کپی کردن متن مقاله و چسباندن (پیست) آن در بخش‌های مختلف و انتخاب استایل مربوط، مقاله خود را تهیه نمایند. نویسندگان محترم مقالات باید توجه داشته باشند، مجله از پذیرش مقالاتی که خارج از این قالب تهیه شده باشند، معذور است. برای آماده‌سازی مقاله از همین فایل و کمک گرفتن از نوار ابزار «استایل‌ها» (Styles) استفاده کنید. توجه شود که از نسخه ورد 2010 برای نگارش مقالات استفاده شود تا هماهنگی‌های لازم بین کاربران نظیر سردبیر، دبیر تخصصی، داور و ویراستار برقرار گردد. چکیده برای مقاله پژوهشی کامل حداقل 180 و حداکثر شامل 250 کلمه می‌باشد. چکیده باید به‌طور صریح و شفاف، موضوع و هدف پژوهش، روش‌های انجام و نتایج آن را مطرح کند. در چکیده از ذکر جزئیات کار، شکل‌ها، جدول‌ها، فرمول‌ها، مراجع و پاورقی پرهیز شود. لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.

دریافت: .....  
پذیرش: .....  
کلیدواژه‌گان (استایل عنوان کلید واژه‌گان)  
حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده کاما (استایل کلیدواژه‌گان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژه‌گان است و تمامی اجزای آن مانند بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

## A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname<sup>1</sup>, Fathollah Taheri-Behrooz<sup>2\*</sup>, Davoud Shahgholian<sup>3</sup>, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

### Keywords (Style: Keywords Title)

Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As:  
Composites, Foam, Shear, Deflection

### Abstract (Style: Abstract Title)

The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)

کپی و سپس چسباندن (پیست<sup>2</sup>) متن خود در این فایل، سبک<sup>3</sup> مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن می‌توانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:

Paste option → match with Destination format

### 1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1)

برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت<sup>1</sup>) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با

<sup>3</sup> Style

<sup>1</sup> Template

<sup>2</sup> Paste

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in Microsoft word," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2454-2457, 2024. <https://doi.org/...>

...

شکل‌ها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکان‌های ذکر شده، مشخص نمایید:

Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position

محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف می‌شوند.

عناوین افقی و عمودی شکل‌ها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتنالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتنالیک می‌آیند(توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتنالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن<sup>2</sup> با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین<sup>3</sup>) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

استفاده از کلمات فارسی در شکل‌ها قابل قبول نمی‌باشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاع‌ها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکل‌های هر مقاله ارائه گردند.

در کلیه‌ی محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد.

از نویسندگان محترم درخواست می‌گردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به هم‌ریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.

برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه شکل‌ها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

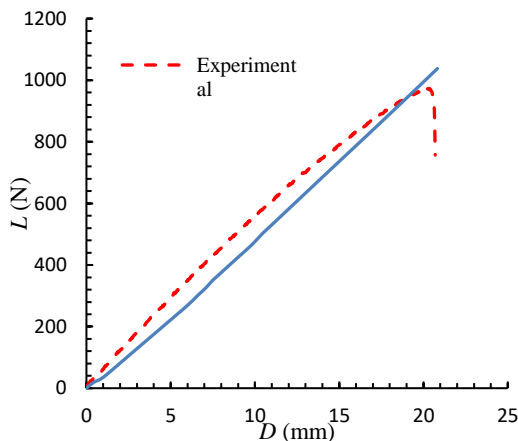


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی 5 میلی‌متر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علائمی نظیر ، : ، ؛ و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیه‌ی این علائم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته می‌شوند.

حداکثر صفحات پیش‌نویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

### 1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می‌شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می‌یابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره‌گذاری شوند و نمی‌توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,5,7].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-15]" خودداری شود. در مقاله‌های پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شده‌اند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آن‌ها باید اندک باشد.

### 1-2- اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی<sup>1</sup> مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال 1.2 صحیح و 1/2 غلط می‌باشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می‌شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می‌شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می‌شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

### 2- شکل‌ها، نمودارها و جدول‌ها (استایل عنوان سطح 1)

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت دوستونی در مقاله درج می‌شوند. در صورتی که نتوان آن‌ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می‌شوند. (استایل متن اصلی)

### 1-1- شکل‌ها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم شکل‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، شکل‌ها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکل‌ها در زیر شکل قرار می‌گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می‌گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی شکل بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
- به همه‌ی شکل‌ها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکل‌ها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سائز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

<sup>1</sup> English (Style: Sub Title)

<sup>2</sup> Times New Roman

<sup>3</sup> Gridlines

**2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)**

نکات کلی که باید در ترسیم جدول‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- جدول‌ها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می‌گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
  - عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
  - جدول‌ها حتی‌الامکان فقط با سه خط افقی اصلی و بدون خطوط عمودی تنظیم می‌شوند.
  - به همگی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.
  - جدول‌ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
  - استفاده از اعداد فارسی در جدول‌ها قابل قبول نمی‌باشد.
  - در صورتی که از جدول‌های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می‌باشد.
  - متون داخل جدول‌ها باید به زبان فارسی و با قلم بی‌نازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون‌ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین، 7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می‌باشد.
  - جدول‌ها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینه‌های رنگی و خاکستری در تهیه جدول‌ها پرهیز نمایید.
- جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.  
برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه جدول‌ها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

**جدول 1** اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

**Table 1** Fonts sizes (Style: Table Title)

زبان متن	فارسی	لاتین
نوع قلم	بی‌نازنین	تایمز نیو رومن
اندازه قلم	10	9
عناوین بخش‌های سطح 1	10	9
عناوین بخش‌های سطح 2	9	8
متن اصلی مقاله	10	9
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	9	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها <sup>(9)</sup>	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

<sup>(9)</sup>فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

**3- روابط و فرمول‌های ریاضی (استایل عنوان سطح 1)**

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله<sup>1</sup> موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث 9pt<sup>2</sup> و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدور برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ<sup>3</sup> استفاده نشود.

در نوشتن فرمول‌ها رعایت نکات زیر الزامی است:

- 1- در فرمول‌نویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک می‌آیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک می‌آیند.
- 2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.
- 3- وقتی ادامه فرمول در سطری بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعداز سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله  $(a.b)$  به جای نقطه ضرب  $(a*b)$  استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^K} = Q_{11}^K \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^K + Q_{66}^K) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k + Q_{22}^K \sin^4 \theta^k \quad (1)$$

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (a-3)$$

**4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)**

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایه‌ی املا‌ی زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله‌ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصله‌ی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را به‌صورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می‌شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است.

در مورد «ها» جمع نیز دقت کنید که از کلمه‌ی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصله‌ی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل‌ها» را به‌صورت «شکل‌ها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادهات» و «اساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

**1-4- علائم، نشانه‌ها و ارقام (استایل عنوان سطح 2 و 3)**

از علائم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. استفاده از ممیز

<sup>3</sup> Math Type

<sup>1</sup> Insert -> Symbols -> Equation

<sup>2</sup> Cambria Math

تذکره: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت<sup>1</sup> در نرم‌افزار اندنوت<sup>2</sup> استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان<sup>3</sup> مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

#### مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

(توجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند)

مثال:

- [1] Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آن‌ها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

- [2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

#### کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

- [3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

#### پایان نامه‌ها:

- [4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

#### ثبت اختراع:

- [5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

#### پایگاه‌های الکترونیکی:

- [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, available in 13, February 2005.

#### استانداردها:

- [7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم‌علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست‌علایم باید دقیقاً یکسان باشد.

در صورت نیاز، لیست‌علایم و نشانه‌ها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج می‌شود. این لیست به صورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

#### 5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

$E$  مدول یانگ ( $Nm^{-2}$ )

$P$  نیرو ( $Nm^{-2}$ )

$T$  دما (K)

علایم یونانی

$\sigma$  تنش ( $Nm^{-2}$ )

$\epsilon$  کرنش

بالانویس‌ها

$k$  تعداد لایه

زیرنویس‌ها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

#### 6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست‌علایم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

#### 7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم‌تایمز نیو رومن 8 نوشته می‌شوند. شماره مرجع داخل کروه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجدداً تأکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- ✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی‌ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است، خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است [5]". این نوع ارجاع نادرست است و کمکی به خواننده در درک مطلب نخواهد داشت.
- ✓ از ارجاع به پایان‌نامه‌های کارشناسی خودداری نمایید.
- ✓ نام مجله‌ها و نظایر آن به‌طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

<sup>3</sup> Language

<sup>1</sup> JSTC.ens (EndNote Style)

<sup>2</sup> EndNote