

مطالعه تأثیر مشخصات تقویت کننده کاربرد سیلیسیوم بر خواص مکانیکی نانوماده مرکب زمینه آلیاژ آلومینیوم

در این پژوهش خواص مکانیکی نانوماده مرکب زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ که توسط نانوذرات کاربرد سیلیسیوم تقویت شده، مطالعه شده است. عوامل مورد بررسی شامل: اندازه، شکل هندسی و کسر حجمی نانوذرات بوده است. با استفاده از الگوریتم جذب متوالی تصادفی، یک جزء حجمی نمونه از نانوماده مرکب با ذرات کروی و بیضوی با توزیع تصادفی شبیه سازی شد. نتایج حاصل نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوذرات، باعث افزایش خواص مکانیکی از جمله مدول الاستیک، مدول برشی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی می شود. خواص مکانیکی در نمونه های تقویت شده با نانوذرات کروی با کسر حجمی ده درصد، با افزایش اندازه ذرات، کاهش یافته است. همچنین خواص مکانیکی برای تقویت کننده های بیضوی در مقایسه تقویت کننده های کروی کمتر بوده است.

فرنام رئوف مهر^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد

محمد رضا دشت بیاض^۲

دانشیار

واژه های راهنما: نانوماده مرکب زمینه فلزی، جزء حجمی نمونه، خواص مکانیکی، روش اجزای محدود

۱- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم جزء آلیاژهای پرکاربرد در صنایعی مانند خودروسازی و هوافضا هستند. در این صنایع لازم است که سازه علاوه بر داشتن استحکام بالا، از وزن پایینی برخوردار باشد [۱، ۲]. آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به علت داشتن مقاومت خوردگی و استحکام بالا، بیش تر از سایر آلیاژهای آلومینیوم در صنایع فوق الذکر مورد توجه واقع شده است [۳، ۴]. نیاز به داشتن استحکام بالا به همراه انعطاف پذیری مناسب، باعث ایجاد انگیزه در پژوهشگران جهت ساخت مواد مرکب زمینه فلزی^۳ گردیده است. پژوهش های سال های اخیر، اثرات استفاده از نانوذرات^۴ سرامیکی به عنوان فاز تقویت کننده در انواع فلزات و آلیاژها، تحت نام نانوماده مرکب^۵ را نشان می دهند [۵].

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران،

raoofmehrfarnam@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران،

dashtbayazi@uk.ac.ir

^۳ Metal matrix composites

^۴ Nanoparticles

^۵ Nanocomposite

بهره‌گیری از تقویت کننده‌های ذره‌ای نسبت به تقویت کننده‌های پیوسته از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است و ماده‌ی مرکب حاوی ذرات تقویت کننده نیز می‌تواند با روش‌های روزن‌رانی^۱ و نورد، شکل‌دهی شود. اغلب فازهای که به عنوان تقویت کننده به فلزات و یا آلیاژها زمینه افزوده می‌شوند، از خانواده‌ی ترکیبات بوریدها، نیتريد‌ها و کاربیدها هستند [۶-۸]. افزودن تقویت کننده‌های مذکور به زمینه، بهبود طیف گسترده‌ای از خواص مکانیکی را به دنبال دارد. در این میان، کاربرد سیلیسیوم به علت داشتن خواص ویژه، از جمله ضریب انبساط حرارتی بالا و مقاومت خوردگی مناسب، مورد توجه پژوهش‌گران واقع شده است [۹].

پژوهش‌های انجام شده در زمینه مطالعه خواص مکانیکی انواع نانومواد مرکب را می‌توان به دو حوزه‌ی مطالعه عددی از طریق روش اجزای محدود و روش‌های تجربی طبقه‌بندی کرد. در اکثر پژوهش‌ها سعی بر آن بوده است که علاوه بر بررسی رفتار مکانیکی نانوماده مرکب بصورت تجربی، بصورت عددی نیز خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار گیرند. از جمله عواملی که بر روی خواص مکانیکی نانوماده مرکب مؤثر است، شکل هندسی، اندازه و کسر حجمی ذرات هستند. سو و همکاران [۱۰] رفتار مکانیکی ماده‌ی مرکب با زمینه‌ی آلومینیوم که توسط ذرات کاربرد سیلیسیوم تقویت شده است را به روش تجربی و عددی مطالعه نموده‌اند. آن‌ها در ابتدا بصورت تجربی تأثیر ذرات تقویت کننده بر خواص مکانیکی را مطالعه کرده‌اند تا اثرات نسبت منطری^۲ و اندازه ذرات را بر خواص مکانیکی مشخص کنند. آن‌ها دریافتند در صورتی که بین فاز زمینه و تقویت کننده اتصال چسبنده وجود داشته باشد، استحکام ماده مرکب نسبت به حالتی که فصل مشترک از نوع اصطکاکی باشد، بیشتر است. عیسی و همکاران [۱۱] نشان دادند که با اضافه کردن یک درصد کسر وزنی پودر سیلیکا به زمینه آلومینیوم، خواص مکانیکی ماده‌ی مرکب حاصل، نسبت به آلومینیوم خالص، افزایش یافته است. آن‌ها گزارش کردند که سختی و استحکام نهائی کشش به ترتیب ۴۱ و ۲۴ درصد افزایش یافته‌اند و در مقابل، انعطاف پذیری ۱۲/۶ درصد کاهش یافته است. ژو و همکاران [۱۲] ضمن بهره‌گیری از الگوریتم جذب متوالی تصادفی^۳، جزء حجمی نمونه^۴ از ماده مرکب را مدل‌سازی کرده‌اند. آن‌ها این روش را در مدل‌سازی ریزساختار ماده‌ی مرکب با زمینه‌ی آلیاژ منیزیم حاوی الیاف کوتاه کربن و با جهت‌گیری تصادفی بکار بسته‌اند. آن‌ها دریافتند که استفاده از الیاف کوتاه کربن، استحکام آلیاژ منیزیم را بطور چشمگیری افزایش می‌دهد. نکته حائز اهمیت در پژوهش مذکور این است که تنها مسئله تنش و کرنش صفحه‌ای بررسی شده و انواع تغییر شکل‌های کششی و برشی در جهات مختلف به جزء حجمی نمونه اعمال نشده است. ناون و همکاران [۱۳] نانوماده مرکبی با زمینه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی نانوذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیوم را به روش متالورژی پودر تولید کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که نانوماده مرکب علاوه بر استحکام و مدول یانگ بالا، از انعطاف‌پذیری مطلوب و چگالی پایین برخوردار است. علاوه بر این نشان دادند که انجام هم‌زمان عملیات حرارتی و اثر پیر سختی، سبب استحکام بیش از پیش نانوماده مرکب شده است. ویژگی قابل توجه ذرات تقویت کننده نانومتری (نانوذرات) در مقایسه با ذرات تقویت کننده میکرومتری (میکروذرات) این است که شکست در نانوذرات کمتر رخ می‌دهد و اتصال موثر زمینه با نانوذرات بیش‌تر است. گائو و همکاران [۹] سه توزیع مختلف از ذرات کاربرد سیلیسیوم را به صورت دیواره‌های موازی، متقاطع و همگن در کسر حجمی ۰/۱ درصد ایجاد کرده‌اند و اثر نوع چیدمان بر خواص مکانیکی ماده مرکب را به صورت عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین، سازوکارهای شکست در

^۱ Extrusion

^۲ Aspect ratio

^۳ Random sequential adsorption algorithm

^۴ Representative volume element

هریک از فازهای زمینه و تقویت کننده در جزءهای حجمی نمونه را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها دریافتند که جزء حجمی نمونه حاوی ذراتی که بطور همگن در فاز زمینه پخش شده است، ضریب تمرکز تنش^۱ کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته و از چقرمگی بیش‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است. دلیل این امر نیز پایین بودن ضریب تمرکز تنش درون جزء حجمی نمونه ذکر شده است. در پژوهش آن‌ها، ابعاد ذرات ثابت و شکل هندسی آن‌ها بیضوی در نظر گرفته شده است. پادماواتی و همکاران [۱۴] با استفاده از روش ریخته‌گری مستقیم، ماده مرکبی با زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ تولید کردند که تقویت کننده از جنس کاربرد سیلیسیوم و دی اکسید تیتانیوم در مقیاس میکرومتر و نانومتر بوده است. مواد مرکب تولید شده، از دو منظر ۱- اندازه تقویت کننده‌ها و ۲- سختی و استحکام نهایی و تسلیم در حالت کششی و فشاری مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها ثابت کردند که ماده مرکب حاوی نانوذرات، خواص مکانیکی بهتری نسبت به تقویت کننده‌های با ابعاد میکرومتری دارد. همچنین، ماده مرکب با نانو تقویت کننده‌ی با یک درصد وزنی و ماده مرکب با میکرو تقویت کننده‌ها با ده درصد وزنی، بهترین خواص مکانیکی را نسبت به سایر درصدهای وزنی داشته‌اند. گائو و همکاران [۱۵]، اثر آسیب‌های سطحی بر روی ماده‌ی مرکب تقویت شده با ذرات کاربرد سیلیسیوم را که تحت کشش تک جهته قرار گرفته است را با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که هرچه مقدار عمق ترک سطحی افزایش پیدا کند، استحکام ماده مرکب کاهش می‌یابد.

با توجه به پیشینه مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که تاکنون اثر مشخصه‌هایی از جمله شکل هندسی و درصد کسر حجمی ذرات به صورت هم زمان بر روی رفتار مکانیکی نانوماده مرکب بصورت عددی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش، ابتدا با استفاده از یک الگوریتم مناسب، جزءهای حجمی نمونه با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد از تقویت کننده‌های کروی و بیضوی شکل مدل‌سازی شده‌اند. سپس اثر کسر حجمی و شکل هندسی نانوذرات تقویت کننده‌ی کاربرد سیلیسیوم بر خواص مکانیکی نانوماده مرکب زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. مدول الاستیک، مدول برشی، ضریب پواسون، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی ماده مرکب زمینه آلومینیوم از جمله خواص مکانیکی هستند که به روش اجزای محدود استخراج شده‌اند. رفتار مکانیکی در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و منحنی‌های تنش - کرنش مربوط به هر یک از آن‌ها ترسیم شده است. در نهایت به منظور صحت سنجی، نتایج حاصل از مطالعات عددی با نتایج حاصل از پژوهش‌های تجربی موجود مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

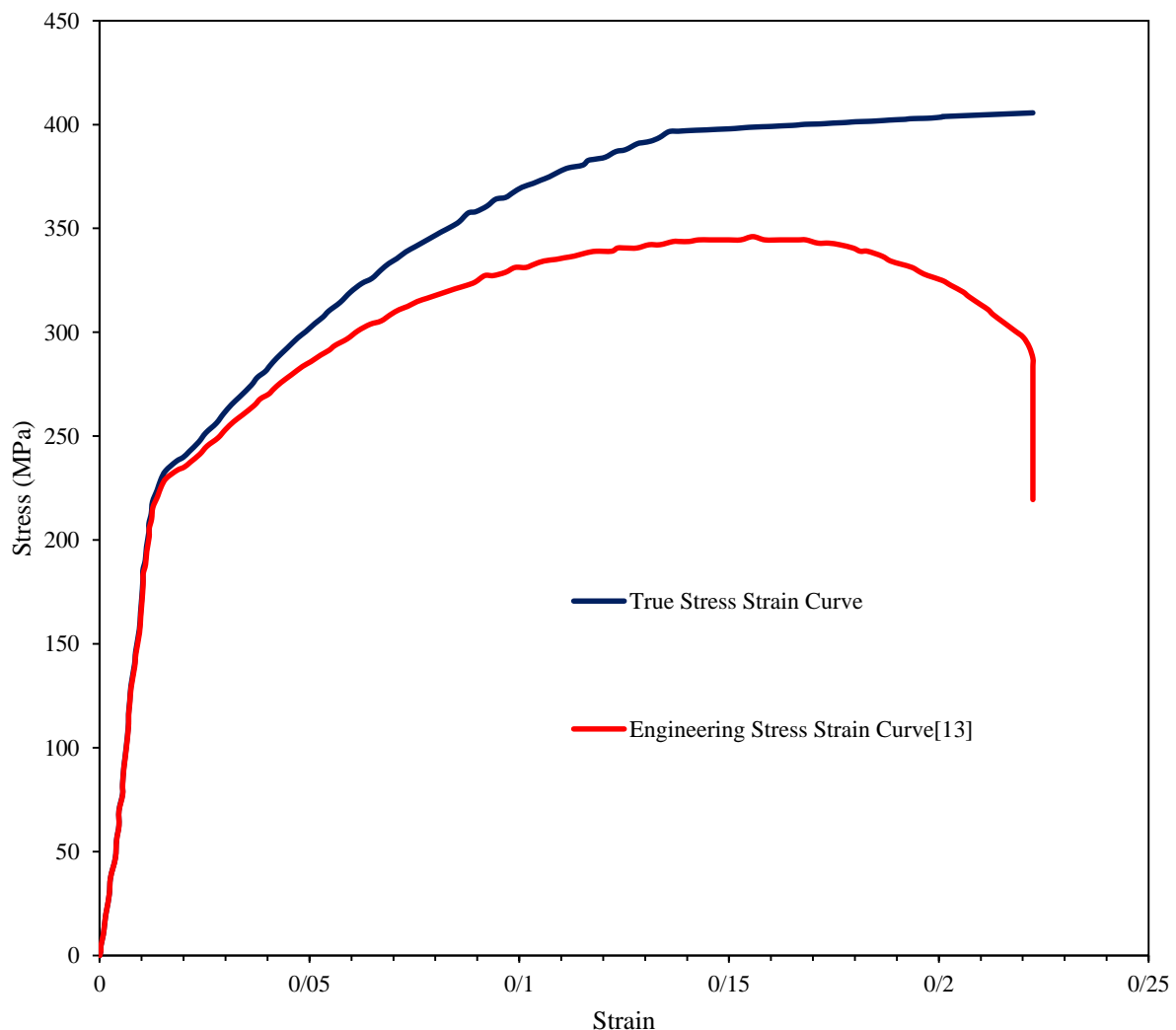
فاز زمینه نانوماده مرکب از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در نظر گرفته شده است. آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ ترکیبی از فلزات آلومینیوم - منیزیوم - سیلیسیوم است. ویژگی‌های بارز این آلیاژ مقاومت زیاد در برابر خوردگی، استحکام بالا، امکان جوشکاری و عملیات حرارتی هستند. از نانوذرات کاربرد سیلیسیوم به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شده است که بصورت یکنواخت در فاز زمینه توزیع شده‌اند. برای نانوذرات دو شکل کروی و بیضوی انتخاب شده است. اندازه نانوذرات کروی به ترتیب ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر با کسر حجمی‌های ۱۰ و ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای نانوذرات بیضوی شکل، نسبت منطری ۲ و کسر حجمی‌های ۱۰ و ۱۵ درصد انتخاب شده است. مشخصات مکانیکی هر یک از فازهای ماده مرکب در جدول (۱) آورده شده است.

^۱ Stress concentration factor

جهت تعیین رفتار الاستیک - پلاستیک، در شکل (۱) منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی^۱ و حقیقی^۲ آلومینیوم ۶۰۶۱ نمایش داده شده است. در واقع منحنی تنش - کرنش مهندسی از مرجع شماره [۱۳] گرفته شده و توسط روابط تبدیل، تنش و کرنش‌های مهندسی به تنش و کرنش‌های حقیقی تبدیل شده‌اند؛ سپس منحنی تنش-کرنش حقیقی رسم شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی زمینه و تقویت کننده موجود در نانوماده مرکب [۱۳]

فاز	چگالی (g/cm ³)	ضریب پواسون	مدول الاستیک (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی شکست (MPa)
آلومینیوم ۶۰۶۱	۲/۷۱	۰/۳۳	۶۹/۵	۲۲۸	۳۴۲
کاربید سیلیسیوم	۳/۲	۰/۱۷	۴۲۷	۱۰۰۰	—



شکل ۱- منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی [۱۳] و حقیقی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

^۱ Engineering stress-strain

^۲ True stress-strain

معادلات ساختاری^۱ حاکم بر ناحیه‌ی پلاستیک با استفاده از داده‌های منحنی تنش - کرنش حقیقی آلومینیوم به دست آمده‌اند. معادلات ساختاری به ترتیب تحت نام‌های هولمن^۲، لودویگ^۳، سویفت^۴ و ووس^۵ در زیر به کار برده شده‌اند [۱۶]:

$$\sigma = K(\epsilon^n) \quad (۱)$$

$$\sigma = \sigma_0 + K(\epsilon^n) \quad (۲)$$

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (۳)$$

$$\sigma = (A + B)(1 - \exp(-n\epsilon)) \quad (۴)$$

σ تنش سیلان^۶، ϵ کرنش پلاستیک^۷، σ_0 و ϵ_0 به ترتیب تنش و کرنش‌های اولیه، K ، n ، A و B ثوابت ماده هستند. پس از مشخص شدن منحنی‌های تنش سیلان، ضرایب معادلات ساختاری محاسبه شده‌اند. جدول (۲) ضرایب معادلات ساختاری را نشان می‌دهد. در شکل (۲) منحنی‌های تنش سیلان حاصل از معادلات ساختاری و منحنی تنش - کرنش حقیقی جهت مقایسه و انتخاب نشان داده شده‌اند. با مقایسه منحنی حاصل از معادلات ساختاری در شکل (۲)، معادله (۴) یا معادله ووس، انطباق بیش تری با منحنی جریان تنش حقیقی فاز زمینه نشان می‌دهد.

جدول ۲- ضرایب معادلات سختی آلومینیوم ۶۰۶۱

معادله	K (MPa)	n	σ_0 (MPa)	ϵ_0	B (MPa)	A (MPa)
هولمن	۵۸۶/۷۶۳	۰/۱۸۵۸	-	-	-	-
لودویگ	۵۷۹/۴۶۵	۰/۱۹۳۸	-	۰/۰۰۱۲	-	-
سویفت	۹۳۸/۷۰۶	۰/۷۳۴	۲۲۵	-	-	-
ووس	-	۱۴/۹۰۶۸	-	-	۴۳۳/۹۸۰	۲۲۰/۸۰۴

^۱ Constitutive law

^۲ Hollomon

^۳ Ludwig

^۴ Swift

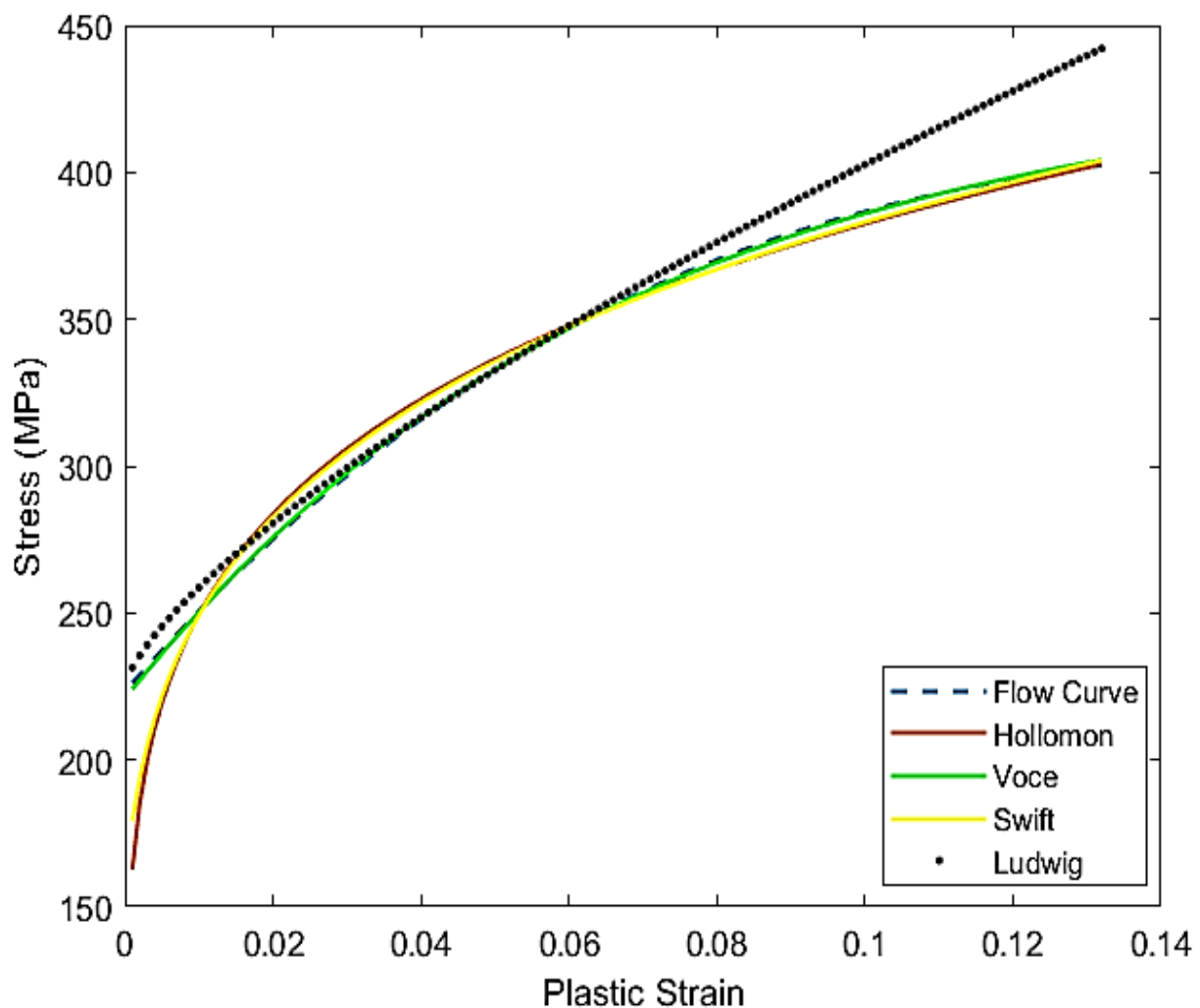
^۵ Voce

^۶ Flow stress

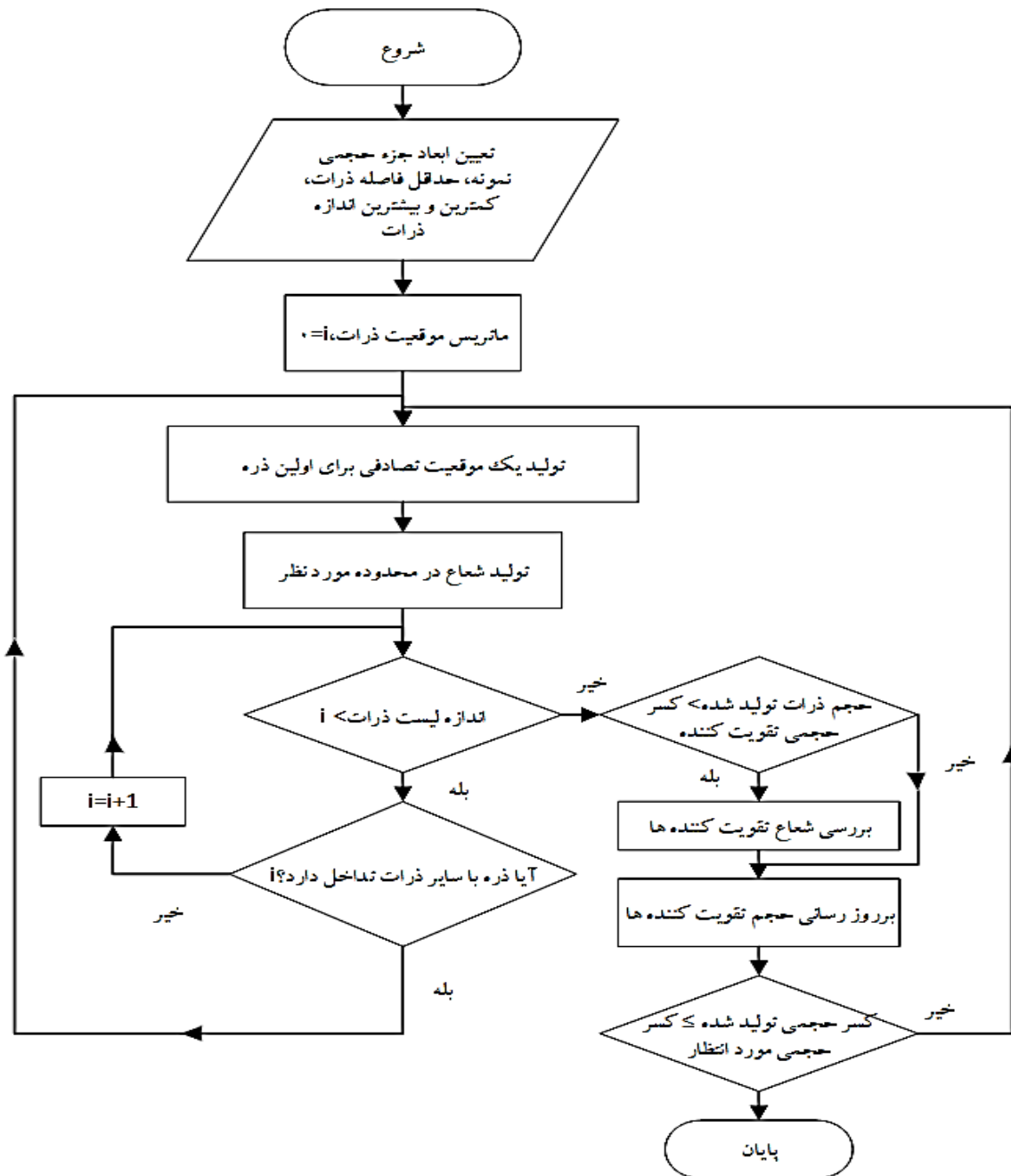
^۷ Plastic strain

۱-۲- مدل سازی جزء حجمی نمونه

شکل (۳) الگوریتم مورد استفاده برای تولید جزء حجمی نمونه را نشان می دهد. روند تولید جزء حجمی نمونه بر اساس الگوریتم شکل (۳) در شکل (۴) نشان داده شده است. در واقع ورودی های برنامه شامل: ابعاد جزء حجمی نمونه، کمترین و بیشترین اندازه ی نانوذرات و خروجی های برنامه موقعیت قرارگیری نانوذرات و شکل هندسی آن ها بوده اند. روند اجرای الگوریتم به این صورت بوده است که برای قرارگیری نانوذرات در درون ماده زمینه مانند شکل (۴-الف)، ابتدا یک مکعب با ابعاد مشخص مدل شده است. سپس مانند شکل (۴-ب)، نانوذرات در داخل مکعب ایجاد شده به صورت تصادفی پراکنده شده اند. در ایجاد جزء حجمی نمونه علاوه بر کنترل درصد کسر حجمی نانوذرات، عدم همپوشانی آنها نیز مورد توجه قرار گرفته است. در برنامه ی نوشته شده مطابق با الگوریتم شکل (۳)، موقعیت قرارگیری نانوذرات تقویت کننده در جزء حجمی نمونه، شکل هندسی نانوذرات، ابعاد جزء حجمی نمونه، کمترین و بیشترین اندازه ی نانوذرات تعیین شده اند. آنگاه مانند شکل (۴-ج)، نانوذرات تولید شده، از درون مکعب حذف شده اند به طوری که یک مکعب متخلخل حاصل شده است. در نهایت، مانند شکل (۴-د)، نانوذرات تقویت کننده با موقعیت مکانی و شعاع اولیه خود، در محل های خالی شده از زمینه قرار گرفته اند.



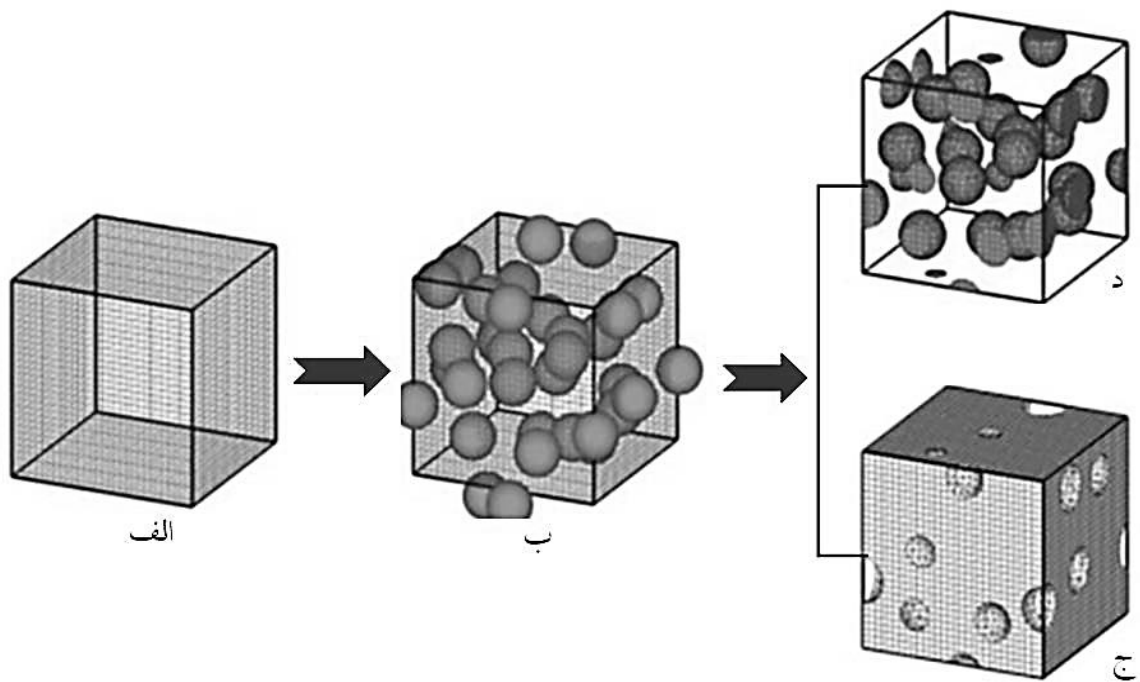
شکل ۲- منحنی های معادلات ساختاری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ برحسب تنش ها و کرنش های پلاستیک



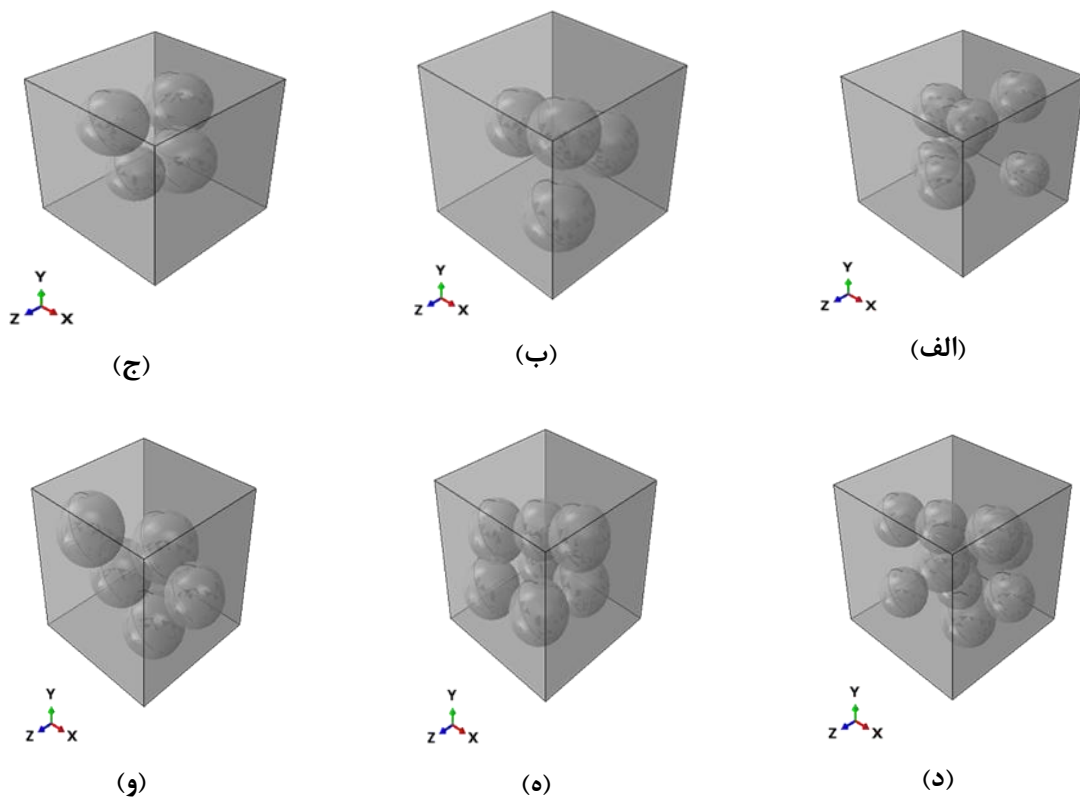
شکل ۳- الگوریتم تولید جزء حجمی نمونه با توزیع تصادفی نانوذرات تقویت کننده در فاز زمینه

جهت اجرای الگوریتم مذکور و ایجاد مدل هندسی در نرم افزار آباکوس، ماکرویی به زبان برنامه نویسی پایتون نوشته و اجرا شده است. ابعاد جزء حجمی نمونه برای مدل سازی $40 \times 40 \times 40$ نانومتر در نظر گرفته شده است. تقویت کننده های کروی و بیضوی با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد و اندازه نانوذرات کروی ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر در زمینه جزء حجمی نمونه مدل سازی شده اند. ذرات تقویت کننده بیضوی با نسبت منظری ۲ در نانوماده مرکب، مدل شده اند.

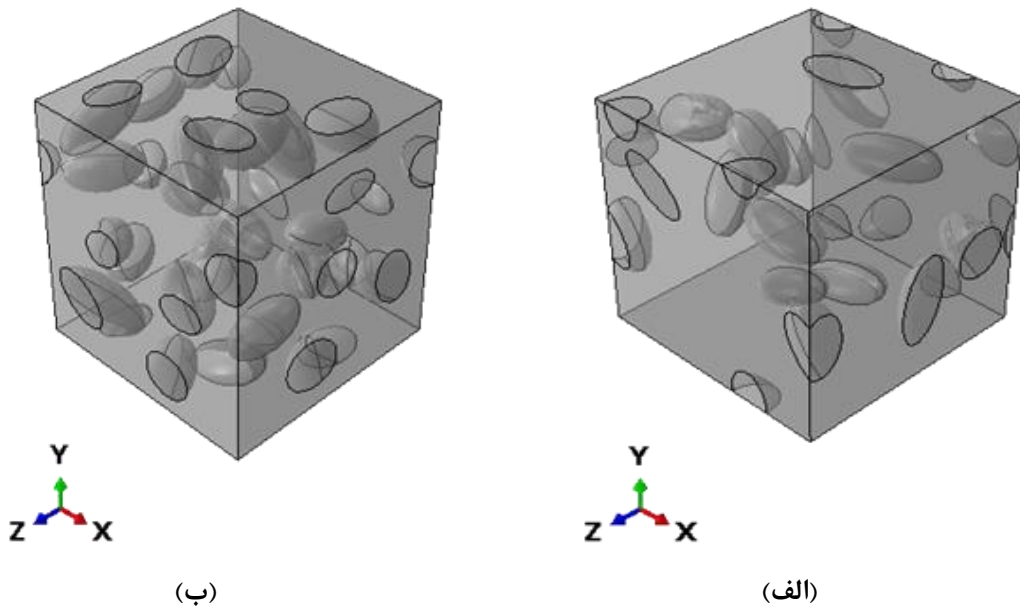
شکل (۵) جزء های حجمی نمونه سازی شده برای انواع ذرات کروی را نمایش می دهد. شکل (۶) جزء های حجمی مدل سازی شده با نانوذرات بیضوی شکل با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد و نسبت منظری ۲ را نشان می دهد.



شکل ۴- روش تولید مدل جزء حجمی نمونه؛ (الف) تولید مکعبی از ماده‌ی زمینه، (ب) موقعیت دهی تصادفی به ذرات تقویت کننده، (ج) خالی کردن محل قرارگیری ذرات و (د) تولید مجدد نانوذرات تقویت کننده در موقعیت‌های خالی ایجاد شده در مکعب



شکل ۵- جزءهای حجمی نمونه شبیه‌سازی شده به ترتیب با کسرهای حجمی و اندازه نانوذرات کروی؛ (الف) ۱۰ درصد و ۱۴ نانومتر، (ب) ۱۰ درصد و ۱۶ نانومتر، (ج) ۱۰ درصد و ۱۸ نانومتر، (د) ۱۵ درصد و ۱۴ نانومتر، (ه) ۱۵ درصد و ۱۶ نانومتر، (و) ۱۵ درصد و ۱۸ نانومتر



شکل ۶- جزءهای حجمی نمونه شبیه سازی شده با نانوذرات بیضوی شکل با نسبت منظری ۲ و کسرهای حجمی؛ (الف) ۱۰ و (ب) ۱۵ درصد

۲-۲- شبیه سازی اجزای محدود

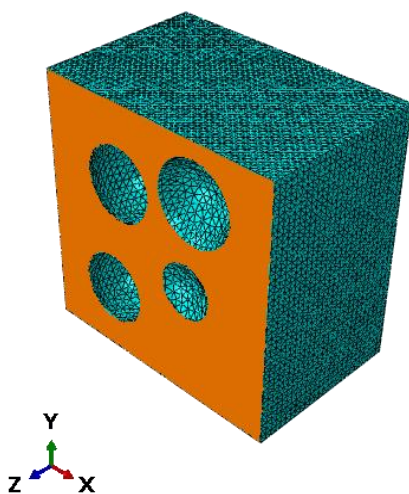
از المان هرمی چهار وجهی C3D10M در نرم افزار آباکوس برای المان بندی فازهای زمینه و نانوذرات تقویت کننده، استفاده شده است. تعداد المان های ایجاد شده در جزء حجمی نمونه به کسر حجمی، میانگین شعاع ذرات و شکل هندسی آنها وابسته بوده است. برای بررسی اثر تعداد المان ها بر همگرایی جواب ها، چهار اندازه مش انتخاب شده و در هر بار تحلیل، درصد خطا نسبت به حالت پیشین خود مقایسه شده است. اندازه المانی که منجر به کمترین میزان خطا شده است، به عنوان اندازه ی مطلوب در نظر گرفته شده است. شکل (۷) یک جزء حجمی نمونه المان بندی شده برای فازهای تقویت کننده و زمینه را نشان می دهد. اتصال بین فازهای زمینه و تقویت کننده بر اساس پیشنهاد مرجع [۱۴] بصورت چسبنده انتخاب شده است. در شکل (۸) شرایط مرزی همگن اعمال شده بر روی جزءهای حجمی نمونه نشان داده شده است. در شکل های (۸-الف)، (۸-ب) و (۸-ج) بارگذاری کششی اعمال شده و در شکل های (۸-د)، (۸-ه) و (۸-و)، بارگذاری برشی اعمال شده است. برای اعمال شرایط مرزی مطابق با شکل (۸-الف) در سطح A، درجه آزادی گره ها در راستای X بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای Y و Z اجازه حرکت دارند. در سطح B، درجه آزادی گره ها در راستای Y بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای X و Z اجازه حرکت دارند. در سطح C، درجه آزادی گره ها در راستای Z بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای X و Y اجازه حرکت دارند. در سطح D، در راستای X جابجایی اعمال شده است. در شکل (۸-ب)، در سطح A، درجه آزادی گره ها در راستای X بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای Y و Z اجازه حرکت دارند. در سطح B، درجه آزادی گره ها در راستای Y بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای X و Z اجازه حرکت دارند. در سطح C، درجه آزادی گره ها در راستای Z بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای X و Y اجازه حرکت دارند. در سطح E، در راستای Y جابجایی اعمال شده است. در شکل (۸-ج)، در سطح A، درجه آزادی گره ها در راستای X بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای Y و Z اجازه حرکت

دارند. در سطح B، درجه آزادی‌ها در راستای Y بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای X و Z اجازه حرکت دارند. در سطح C، درجه آزادی گره‌ها در راستای Z بصورت غلتکی محدود شده است و در راستاهای X و Y اجازه حرکت دارند و در گره‌های سطح F، در راستای Z جابجایی اعمال شده است. در شکل (د-۸) درجه آزادی گره‌های سطح B بصورت لولا محدود شده و درجه آزادی گره‌های سطح E بصورت غلتکی در راستای X و Y محدود شده و در راستای Z جابجایی اعمال شده است. در شکل (ه-۸)، درجه آزادی گره‌های سطح A بصورت لولا محدود شده و درجه آزادی گره‌های سطح D بصورت غلتکی در راستای X و Y محدود شده و در راستای Z جابجایی اعمال شده است. در شکل (و-۸)، درجه آزادی گره‌های سطح A بصورت لولا محدود شده و درجه آزادی گره‌های سطح D بصورت غلتکی در راستای X و Z محدود شده و در راستای Y جابجایی اعمال شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبات مربوط به ناحیه الاستیک، مقدار جابجایی اعمال شده به اندازه ۰/۰۱ درصد طول جزء حجمی نمونه بوده و جهت بررسی رفتار پلاستیک به عنوان نمونه فقط شرایط مرزی مذکور در شکل (۸-الف) انتخاب شده و جابجایی اعمال شده به اندازه ۱۸ درصد طول جزء حجمی نمونه بوده است.

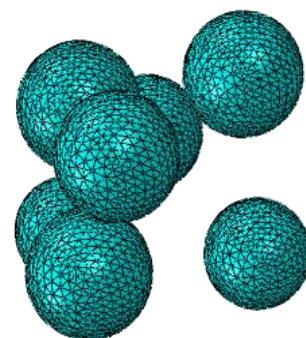
۲-۳- تحلیل رفتار الاستیک

با توجه به شرایط مرزی مذکور در شکل (۸)، جزءهای حجمی نمونه در نرم‌افزار آباکوس در جهات مختلف در معرض تغییر شکل کششی و برشی قرار گرفته‌اند و تنش و کرنش‌های ایجادشده در جزءهای حجمی نمونه استخراج شده‌اند. از تنش و کرنش‌های حاصل شده برای محاسبه ضرایب ماتریس سفتی مطابق با رابطه (۵) استفاده شده است.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (5)$$

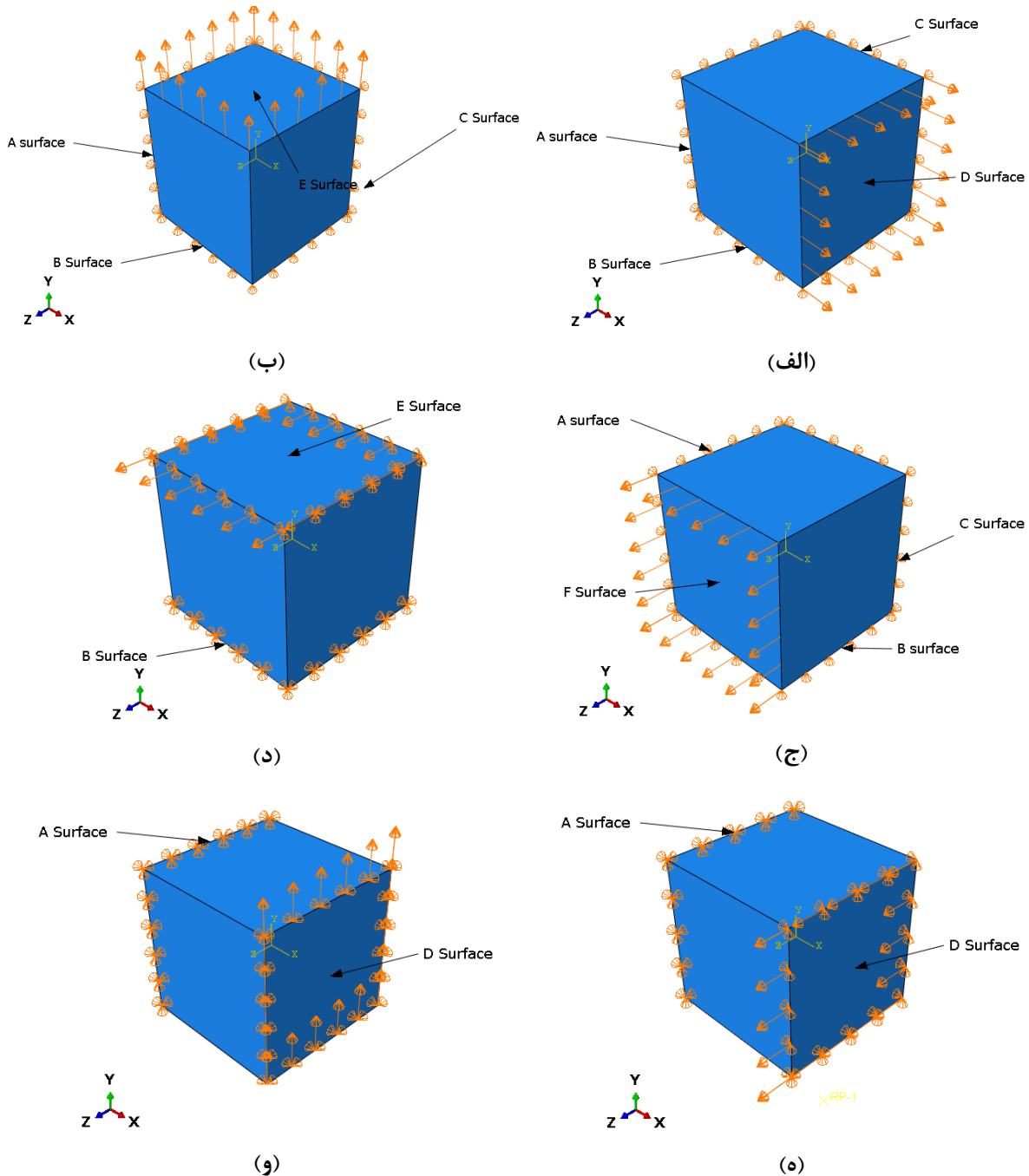


(ب)



(الف)

شکل ۷- (الف) المان‌بندی جزء حجمی نمونه با کسر حجمی ۱۰ درصد و اندازه ذرات کروی ۱۴ نانومتر و (ب) زمینه



شکل ۸- شرایط مرزی همگن اعمال شده بر روی جزء حجمی نمونه شامل: (الف) جابجایی کششی در راستای محور X ، (ب) جابجایی کششی در راستای محور Y ، (ج) جابجایی کششی در راستای محور Z ، (د) جابجایی برشی در صفحه YZ ، (ه) جابجایی برشی در صفحه XZ ، و (و) جابجایی برشی در صفحه XY

C_{ijz} مؤلفه‌های ماتریس سفتی^۱، σ_i مؤلفه‌های تنش و ϵ_z مؤلفه‌های کرنش در جزء حجمی نمونه هستند. برای محاسبه‌ی ضرایب ستون اول از ماتریس سفتی مطابق با شکل (۸-الف) المان حجمی نمونه در راستای X در معرض جابجایی قرار می‌گیرد. از این رو مقدار کرنش در سایر راستاها صفر بوده؛ اما تنش در تمامی جهات وجود دارد.

^۱ Stiffness matrix

بر اساس رابطه (۶) مقادیر ستون اول ماتریس سفتی محاسبه شده‌اند:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \\ C_{31} \\ C_{41} \\ C_{51} \\ C_{61} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

برای محاسبه‌ی سایر ضرایب ماتریس سفتی، سایر شرایط مرزی اعمالی مطابق با شکل (۸) به ترتیب در سایر جهات در نظر گرفته شده است. پس از محاسبه‌ی ضرایب ماتریس سفتی همانطور که در مرجع [۱] در رابطه با شرط مثبت معین بودن ضرایب ماتریس سفتی آمده است، ماتریس‌های به دست آمده بررسی شده‌اند. با داشتن ضرایب ماتریس سفتی و با استفاده از رابطه (۷)، مقادیر ماتریس عکس سفتی^۱ S_{ij} محاسبه شده است [۱]:

$$[S] = [C]^{-1} \quad (۷)$$

از آنجا که تقویت کننده‌های کروی و بیضوی به صورت تصادفی در درون زمینه پخش شده‌اند، در نتیجه ماده، بی‌نهایت صفحه‌ی تقارن دارد. از بین تمام صفحات تقارن، تنها سه صفحه تقارن عمود بر هم انتخاب شده است. از این رو از نظر خواص مکانیکی، رفتار جزءهای حجمی نمونه، اورتوتروپیک^۲ محسوب می‌شود و با استفاده از ثوابت موجود در ماتریس عکس سفتی، ثوابت الاستیک از طریق رابطه (۸) استخراج شده‌اند:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{21}}{E_{11}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-\nu_{32}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_{33}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{33}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

E_{ij} مدول‌های یانگ، G_{ij} مدول‌های برشی و ν_{ij} ضرایب پواسون هستند.

^۱ Compliance matrix

^۲ Orthotropic

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین ضرایب ماتریس سفتی و ثوابت الاستیک

در جدول (۳) ضرایب ماتریس سفتی برای نانومواد مرکب حاوی ۱۰ درصد تقویت کننده کروی با اندازه‌ی ذرات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود درایه‌های موجود روی قطر اصلی ماتریس سفتی همگی مثبت بوده و با افزایش کسر حجمی از ۱۰ به ۱۵ درصد، مقدار این درایه‌ها افزایش یافته‌اند. جدول (۴) ضرایب ماتریس سفتی برای نانوماده مرکب حاوی تقویت کننده‌های بیضوی در کسر حجمی‌های ۱۰ و ۱۵ درصد را نشان می‌دهد. مقایسه ضرایب C_{44} ، C_{55} و C_{66} در جدول‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهد که سفتی‌های برشی در نانومواد مرکب دارای تقویت کننده‌های بیضوی در مقایسه با تقویت کننده‌های کروی بالاتر است.

جدول (۵) ثوابت الاستیک مهندسی برای نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد با تقویت کننده‌های بیضوی و کروی را نشان می‌دهد. نتایج مندرج در جدول (۵) نشان می‌دهد که مدول الاستیک، مدول برشی و ضریب پواسون در انواع نانومواد مرکب مورد بررسی با یکدیگر اختلاف قابل ملاحظه‌ای ندارند. در نتیجه رفتار الاستیک نانوماده مرکب مورد نظر همسانگرد^۱ است. در شکل (۹) تغییرات مدول برشی G_{23} در نانومواد مرکب با کسر حجمی‌های ۱۰ و ۱۵ درصد با شکل هندسی تقویت کننده بیضوی و کروی با اندازه ذرات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر، نشان داده شده است. مقایسه مدول برشی G_{23} در نانومواد مرکب با تقویت کننده‌های بیضوی نسبت به تقویت کننده‌های کروی در شکل (۹) بیان می‌کند که نانوماده مرکب حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد تقویت کننده بیضوی نسبت به میانگین تقویت کننده‌های کروی به ترتیب ۲۵/۷۳ و ۲۲ درصد افزایش نشان داده است.

شکل (۱۰) تغییرات مدول G_{13} در نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد و شکل هندسی تقویت کننده بیضوی و کروی با اندازه ذرات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مدول برشی G_{13} برای تقویت کننده‌های بیضوی با کسرهای حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب ۲۶/۷۲ و ۲۳/۲۲ درصد نسبت به میانگین مدول برشی G_{13} در تقویت کننده کروی افزایش داشته است.

در شکل (۱۱) تغییرات مدول برشی G_{12} برای نانومواد مرکب در کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد با شکل هندسی تقویت کننده بیضوی و کروی با اندازه ذرات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر، نشان داده شده است. مدول برشی G_{12} در مواد مرکب حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد تقویت کننده بیضوی به ترتیب، ۲۵/۸۵ و ۲۳/۲۴ درصد نسبت به میانگین مدول برشی G_{12} در تقویت کننده‌های کروی افزایش داشته است. علت بالاتر بودن مدول‌های برشی G_{12} ، G_{13} و G_{23} در نانومواد مرکب حاوی نانوذرات بیضوی نسبت به نانوذرات کروی می‌تواند ناشی از سازوکار مکانی حضور ذرات نانومتر در زمینه‌ی نانوماده مرکب باشد. در واقع مطابق با تصاویر شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب)، نانوذرات بیضوی تا سطح خارجی جزء‌های حجمی نمونه حضور دارند. در نتیجه درصد حضور نانوذرات بیضوی نسبت به زمینه در سطح جزء حجمی نمونه در مقایسه با نانوذرات کروی، بالاتر است. در مقابل، مطابق با تصاویر شکل‌های (۵-الف تا ۵-و)، نانوذرات کروی فقط در درون جزء حجمی نمونه حضور دارند و درصد حضور ماده زمینه در سطح جزء حجمی نمونه در مقایسه با نانوذرات بیضوی، بالاتر است. در نتیجه در هنگام اعمال بار برشی به نمونه‌های حاوی تقویت کننده‌های بیضوی، تقویت کننده‌های بیضوی، نقش بیش‌تری در تحمل بار برشی در مقایسه با تقویت کننده‌های کروی در سطح جزء حجمی نمونه، ایفا می‌کنند و این پدیده، باعث افزایش مدول برشی جزء حجمی نمونه در تقویت کننده‌های بیضوی می‌شود.

^۱ Isotropic

جدول ۳- ضرایب ماتریس سفتی برای کسر حجمی های ۱۰ و ۱۵ درصد و نانوذرات تقویت کننده کرووی با اندازه ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر

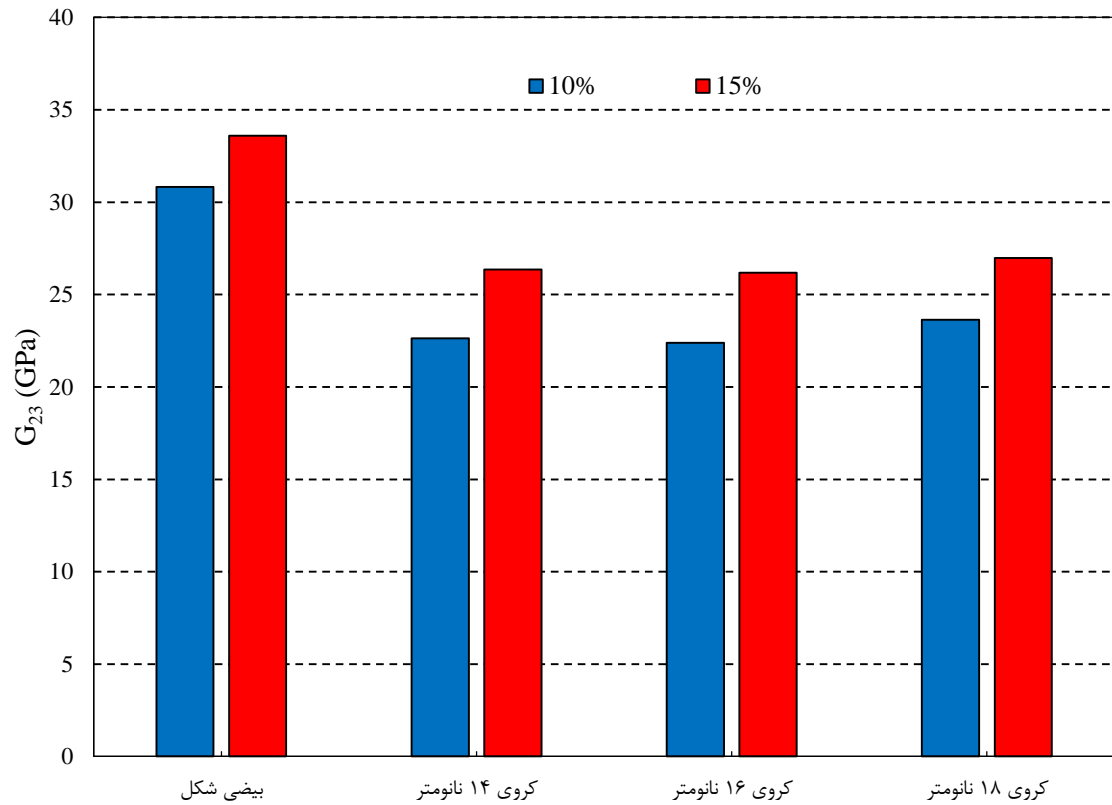
ضرایب ماتریس C _{ij} (مگاپاسکال)							اندازه ذرات (nm)	کسر حجمی (%)
i \ j	۱	۲	۳	۴	۵	۶		
۱	۱۱۴۸۴۰	۵۴۰۰۶/۱۰	۵۴۰۰۶/۹۰	-۹۲/۲۲	۵/۷۲	-۱۱۵/۷۹	۱۴	۱۰
۲	۵۴۰۷۸/۲۰	۱۱۵۰۸۷	۵۳۹۴۵/۷۰	۲۶/۲۰	۰/۳۱	۳۰/۰۲		
۳	۵۴۰۱۸/۹۰	۵۳۹۴۶/۲۰	۱۱۵۱۴۷	۴۹/۶۱	-۶۴/۹۰	-۵۰/۷۲		
۴	-۹۸/۷۳	۲۵/۱۴	۴۶/۶۱	۳۰۶۰۴/۶۰	-۲۴/۶۴	-۱۰/۶۲		
۵	۳/۶۷	-۱/۵۶	-۶۶/۶۳	-۲۳/۱۴	۳۰۳۹۰/۸۰	۴۲/۷۲		
۶	-۱۱۹/۱۹	۲۳/۹۶	-۶۱/۷۸	-۱۰/۴۸	۴۳/۵۵	۳۰۶۱۱/۸۰		
۱	۱۱۵۲۰۶	۵۳۹۱۴	۵۴۰۳۹/۲۰	-۲۶/۷۹	۳۵/۴۵	۳۴/۳۷	۱۶	۱۰
۲	۵۳۹۲۵/۳۰	۱۱۵۳۹۷	۵۳۹۷۲/۸۰	-۶۲/۶۵	-۱۵/۵۰	۶/۲۳		
۳	۵۴۰۴۳/۴۰	۵۳۹۶۷	۱۱۵۴۵۵	-۴۳/۵۶	۱۲/۵۲	-۵۵/۶۸		
۴	-۳۶/۷۱	-۶۳/۶۹	-۴۸/۵۶	۳۰۴۷۵/۳۰	-۷/۲۵	۳۴/۵۶		
۵	۳۱/۵۲	-۲۱/۴۷	۱۰/۱۵	-۵/۲۸	۳۰۶۲۷/۳۰	-۹۲/۸۸		
۶	۳۴/۸۲	۴/۱۶	-۶۲/۵۰	۳۵/۱۶	-۹۱/۳۶	۳۰۶۵۴		
۱	۱۱۵۱۶۵	۵۳۹۵۳/۷۰	۵۳۹۹۴/۴۰	-۳۷/۶۷	۳/۵۱	۹/۷۱	۱۸	۱۰
۲	۵۳۹۴۴/۷۰	۱۱۵۰۳۵	۵۳۸۶۷/۸۰	-۱۷/۶۰	-۷۵/۰۴	۵۶/۴۸		
۳	۵۳۹۹۲/۹۰	۵۳۸۷۵/۳۰	۱۱۵۳۷۱	-۸/۲۲	۲۵/۰۲	۳۹/۲۹		
۴	-۴۰/۶۱	-۱۸/۹۱	-۹/۸۸	۳۰۵۱۹	۹۵/۵۳	-۱۳/۵۷		
۵	-۱/۴۷	-۸۳/۰۶	۲۲/۲۴	۹۶/۴۵	۳۰۶۱۶/۷۰	-۲۵/۵۰		
۶	۱۲/۱۸	۵۸/۱۶	۳۷/۹۹	-۱۳/۴۱	-۲۵/۳۱	۳۰۶۰۶/۵۰		
۱	۱۲۱۷۲۶	۵۶۱۸۱/۱۰	۵۶۲۵۸/۰۰	-۳۰/۱۱	۱۷/۰۴	-۱۰۶/۹۶	۱۴	۱۵
۲	۵۶۲۰۲/۱۰	۱۲۱۵۹۴	۵۵۸۷۷/۳۰	-۴۲۸/۸۸	۲۰۹/۸۷	-۳۳۵/۹۱		
۳	۵۶۲۷۱/۷۰	۵۵۸۶۸/۷۰	۱۲۰۰۰۰	۵۷/۱۴	-۳۱۱/۷۵	-۴۹/۸۳		
۴	-۳۶/۳۳	-۴۳۵/۸۳	۵۰/۱۴	۳۳۰۳۱/۶۰	-۴۷۳/۱۲	۲۶/۵۷		
۵	-۱/۴۷	-۸۳/۰۶	۲۲/۲۴	۹۶/۴۵	۳۰۳۹۰/۸۰	-۹۹/۰۰		
۶	-۱۱۷/۲۳	-۳۴۷/۵۶	-۶۵/۶۶	۲۶/۵۲	-۹۹/۴۹	۳۳۵۶۰/۸۰		
۱	۱۲۰۱۰۱	۵۵۴۵۷/۳۰	۵۵۹۵۷/۳۰	-۶۴/۰۰	۱۱۱/۵۴	-۳۲/۴۷	۱۶	۱۵
۲	۵۵۴۸۲/۷۰	۱۲۲۱۸۶	۵۵۴۸۳/۵۰	۱۷۴/۸۹	۲۰۹/۸۷	-۵۰۶/۶۷		
۳	۵۵۹۵۰/۸۰	۵۵۴۵۱/۰۰	۱۲۲۱۵۹	-۷۷/۰۴	-۳۱۱/۷۵	-۱۸/۳۴		
۴	-۶۲/۲۳	۱۷۶/۳۰	-۷۵/۷۵	۳۲۶۹۳/۳۰	-۴۷۳/۱۲	۶۱/۵۰		
۵	۱۰۶/۷۶	-۲۷۵/۲۱	-۴۲/۵۱	-۶۷۷/۳۷	۳۲۶۵۱/۷۰	-۷۴/۸۶		
۶	-۴۱/۶۳	-۵۱۸/۰۱	-۳۲/۶۷	۶۱/۴۱	-۷۴/۹۵	۳۲۸۳۷/۴۰		
۱	۱۲۲۷۰۲	۵۵۶۷۰/۳۰	۵۵۸۱۰/۳۰	۶۱/۰۴	-۳/۹۸	۶۸/۶۴	۱۸	۱۵
۲	۵۵۶۸۱/۷۰	۱۲۴۰۷۴	۵۵۶۷۰/۰۰	-۱۰۵/۴۰	۶۹/۶۵	-۹۳/۶۷		
۳	۵۵۸۲۹/۶۰	۵۵۶۷۹/۱۰	۱۲۳۳۴۰	۱۴/۱۳	۵۰/۱۳	۸۸/۸۲		
۴	۵۹/۶۳	-۱۰۶/۳۷	۱۳/۰۰	۳۳۶۸۳/۲۰	-۷۱/۱۷	۲۹/۹۲		
۵	-۱/۴۸	۶۹/۶۰	۵۲/۶۶	-۷۰/۵۶	۳۳۱۶۳/۱۰	۳/۷۰		
۶	۷۲/۹۶	-۸۹/۴۶	۹۲/۴۳	۲۹/۷۲	۳/۹۱	۳۳۲۰۴/۴۰		

جدول ۴- ضرایب ماتریس سفتی برای نانومواد مرکب در کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد با تقویت کننده بیضوی شکل

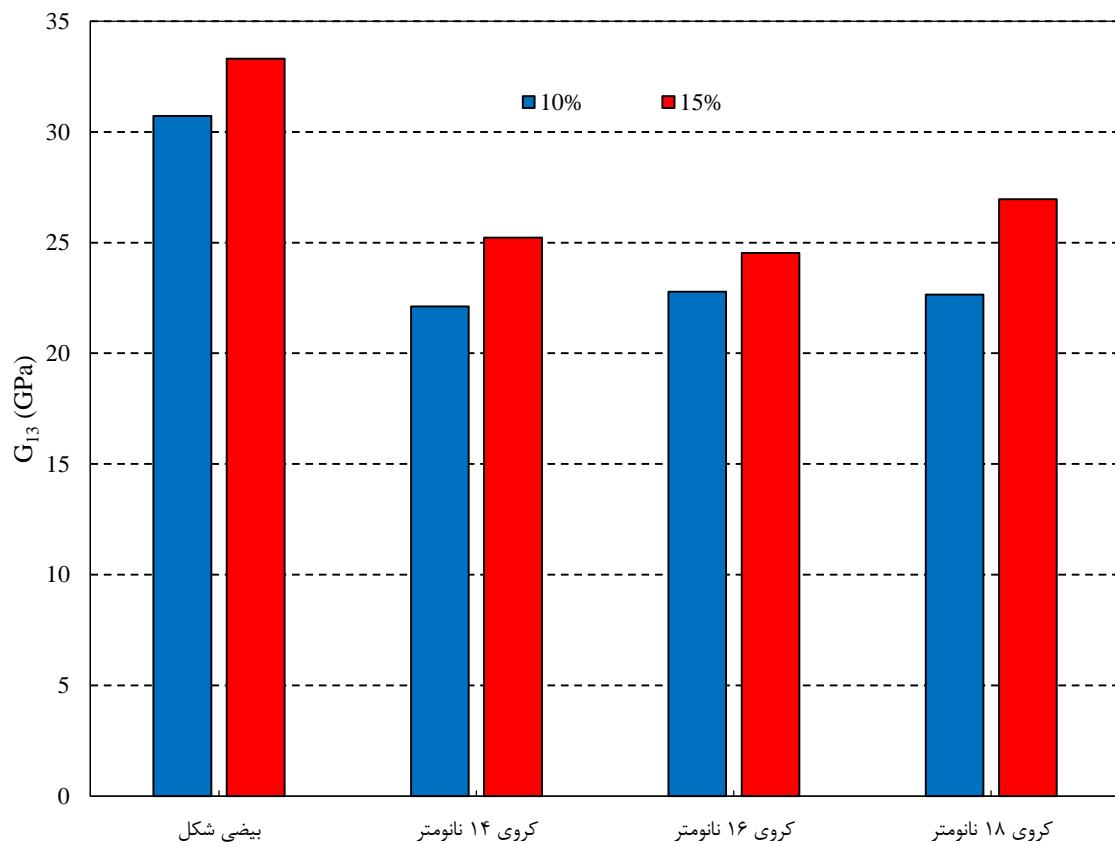
i \ j	ضرایب ماتریس C_{ij} (مگاپاسکال)						شکل نانوذرات	کسر حجمی (%)
	۱	۲	۳	۴	۵	۶		
۱	۱۱۵۶۲۴	۵۴۱۳۵/۳۰	۵۴۱۴۸/۶۰	-۱۹۱/۰۳	۳۱/۶۹	۹۲/۲۲	بیضوی	۱۰
۲	۵۴۱۲۷/۶۰	۱۱۶۳۰۶	۵۴۱۳۳/۴۰	-۱۶۳/۶۷	-۲/۲۰	-۱۱/۴۷		
۳	۵۴۱۵۷/۸۰	۵۴۱۴۸/۷۰	۱۱۵۷۴۵	-۹/۱۹	۱۶۹/۱۴	۱۳۵/۷۴		
۴	-۱۹۵/۸۰	-۱۶۹/۹۱	-۱۶/۷۹	۳۰۷۳۲/۸۰	۳۶/۷۷	۶۴/۴۶		
۵	۳۶/۴۹	۳/۱۵	۱۷۲/۲۶	۳۸/۱۲	۳۰۸۲۲/۰۰	-۱۱۴/۶۶		
۶	۹۸/۰۰	-۱۳/۵۷	۱۳۰/۵۵	۶۵/۴۹	-۱۱۴/۵۶	۳۰۷۱۷/۹۰		
۱	۱۲۲۸۰۲	۵۵۹۴۸/۷۰	۵۵۹۲۹/۵۰	-۳/۹۴	۶۱/۹۸	-۶۴/۷۴	بیضوی	۱۵
۲	۵۵۹۶۲/۷۰	۱۲۲۶۹۱	۵۶۰۹۳/۷۰	-۶۲/۷۲	-۲۱۴/۴۴	۱۱۳/۳۱		
۳	۵۵۹۳۱/۸۰	۵۶۰۸۲/۴۰	۱۲۲۶۹۵	۸۶/۸۱	۱۲۸/۲۷	-۲۵/۱۳		
۴	-۸/۲۷	-۶۷/۰۵	۸۲/۰۹	۳۳۴۱۸/۲۰	۱۰۲/۷۰	۲۶/۲۷		
۵	۵۳/۶۱	-۲۲۳/۲۸	۱۲۰/۶۷	۱۰۳/۷۹	۳۳۵۹۶/۶۰	۷۳/۰۰		
۶	-۶۹/۸۶	۱۲۶/۵۹	-۳۴/۷۷	۲۶/۵۴	۷۱/۲۱	۳۳۳۰۹/۴۰		

جدول ۵- ثوابت الاستیک مهندسی برای نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد با تقویت کننده‌های بیضوی و کروی

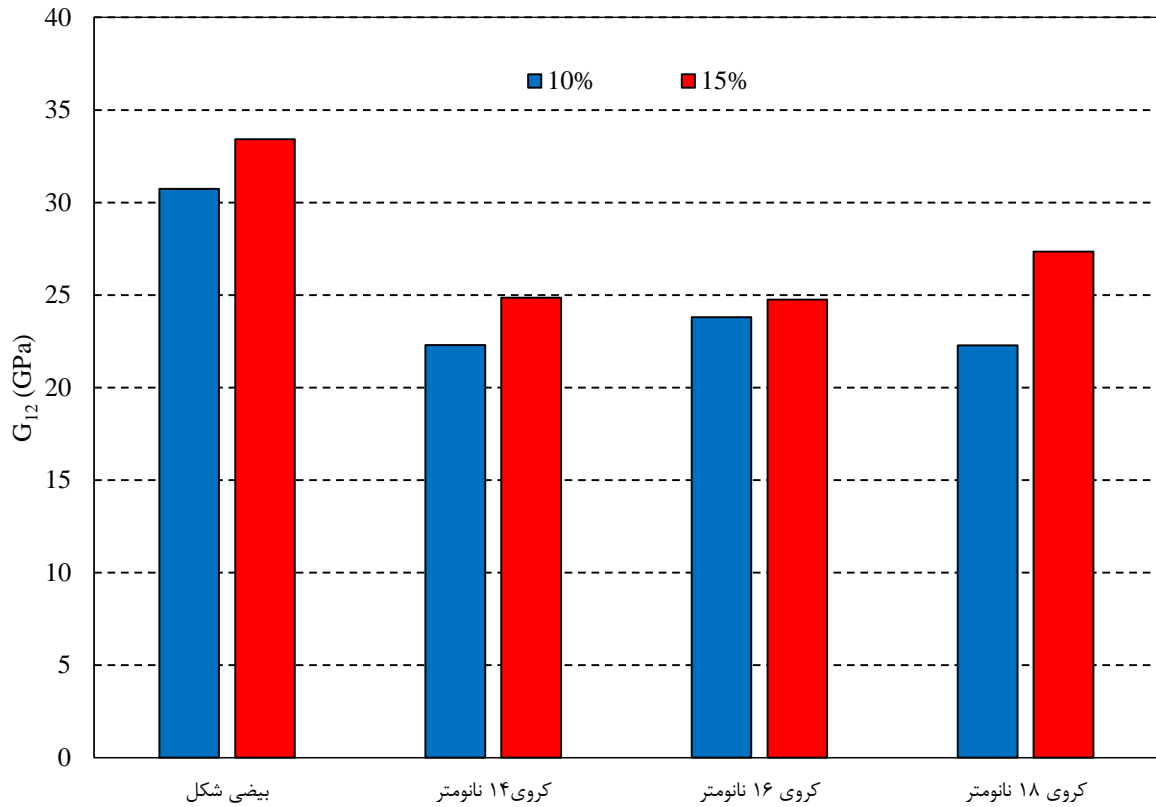
بیضوی		کروی						شکل نانوذرات
۱۵	۱۰	۱۵	۱۰	۱۵	۱۰	۱۵	۱۰	کسر حجمی (%)
نسبت منطری ۲		۱۸ نانومتر		۱۶ نانومتر		۱۴ نانومتر		اندازه ذرات
۰/۳۱۳	۰/۳۱۶	۰/۳۱۲	۰/۳۱۹	۰/۳۰۸	۰/۳۱۸	۰/۳۱۱	۰/۳۲۱	v_{12}
۰/۳۱۲	۰/۳۱۹	۰/۳۱۴	۰/۳۱۹	۰/۳۱۵	۰/۳۱۹	۰/۳۱۶	۰/۳۲۱	v_{21}
۰/۳۱۲	۰/۳۲۰	۰/۳۱۶	۰/۳۲۰	۰/۳۲۳	۰/۳۲۱	۰/۳۱۸	۰/۳۲۰	v_{31}
۰/۳۱۳	۰/۳۲۰	۰/۳۱۴	۰/۳۱۹	۰/۳۲۴	۰/۳۲۰	۰/۳۱۵	۰/۳۱۸	v_{13}
۰/۳۱۵	۰/۳۱۶	۰/۳۱۲	۰/۳۱۸	۰/۳۰۹	۰/۳۱۸	۰/۳۰۹	۰/۳۱۸	v_{32}
۰/۳۱۵	۰/۳۱۸	۰/۳۱۲	۰/۳۱۸	۰/۳۱۵	۰/۳۱۸	۰/۳۰۶	۰/۳۱۷	v_{23}
۸۷/۷۹	۸۱/۱۷	۱۰۹/۹۱	۸۸/۰۵	۹۸/۰۹	۸۹/۱۰	۹۸/۱۶	۸۵/۸۰	E_{11}
۸۷/۵۶	۸۱/۸۰	۱۱۰/۱۱	۸۸/۴۵	۹۹/۷۸	۸۷/۴۵	۹۸/۶۳	۸۵/۶۷	E_{22}
۸۷/۵۸	۸۱/۲۷	۱۰۱/۳۷	۸۷/۱۷	۹۹/۴۵	۹۳/۲۵	۹۷/۲۷	۸۶/۳۳	E_{33}
۳۳/۵۹	۳۰/۸۲	۲۶/۹۷	۲۳/۶۴	۲۶/۱۸	۲۲/۳۹	۲۶/۳۶	۲۲/۶۳	G_{23}
۳۳/۳۱	۳۰/۷۲	۲۶/۹۶	۲۲/۶۵	۲۴/۵۳	۲۲/۷۸	۲۵/۲۳	۲۲/۱۱	G_{13}
۳۳/۴۲	۳۰/۷۳	۲۷/۳۵	۲۲/۲۷	۲۴/۷۵	۲۳/۸۰	۲۴/۸۶	۲۲/۲۹	G_{12}



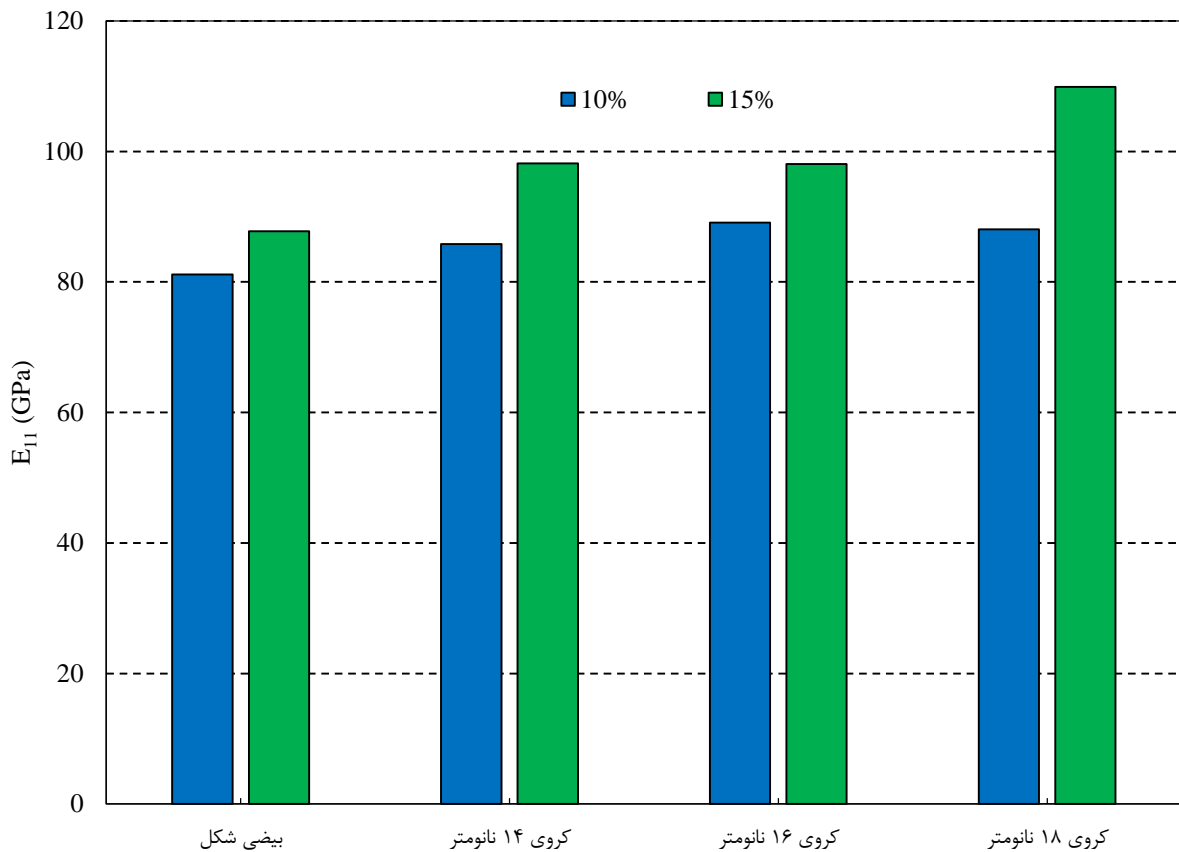
شکل ۹- مقایسه تغییرات مدول برشی G_{23} در نانو مواد مرکب با تقویت کننده‌های کروی و بیضی



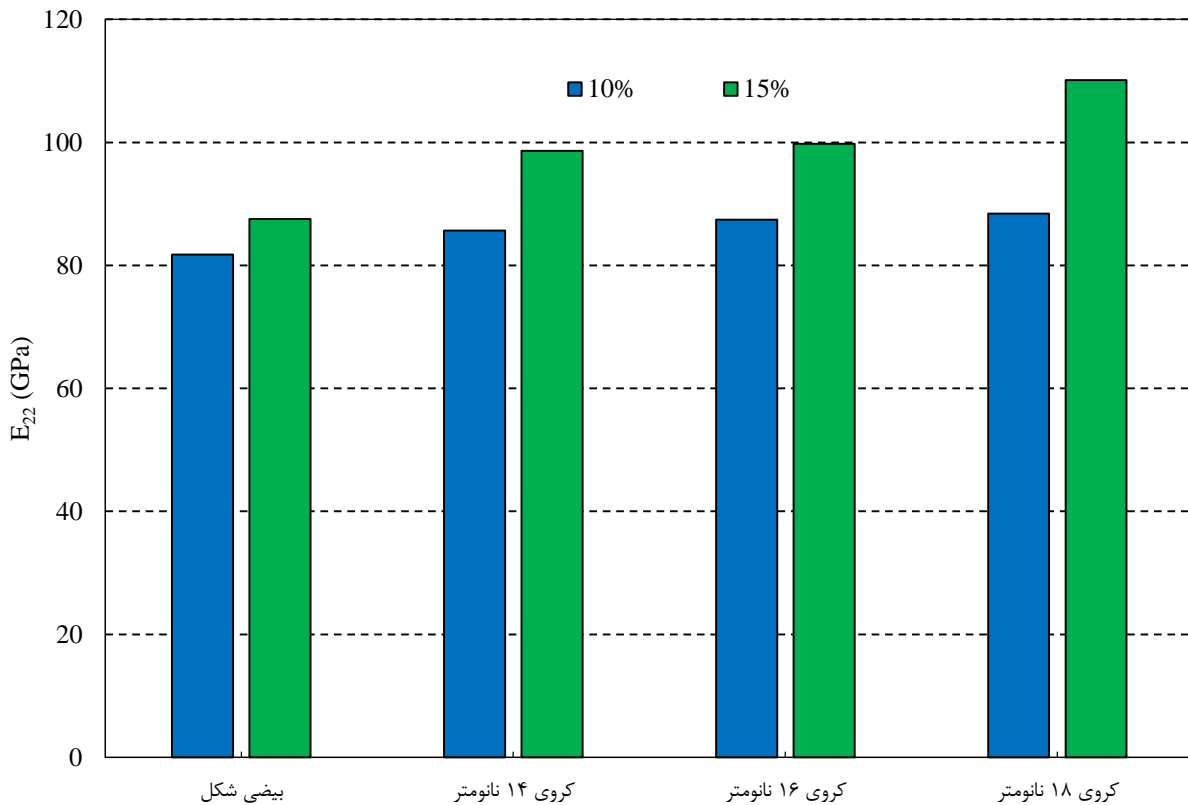
شکل ۱۰- مقایسه تغییرات مدول برشی G_{13} در نانو مواد مرکب با تقویت کننده‌های کروی و بیضی شکل



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات مدول برشی G_{12} در مواد مرکب با تقویت کننده‌های کروی و بیضی



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات مدول برشی E_{11} در نانومواد مرکب با تقویت کننده‌های کروی و بیضی شکل



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات مدول برشی E_{22} در نانومواد مرکب با تقویت کننده‌های کروی و بیضوی

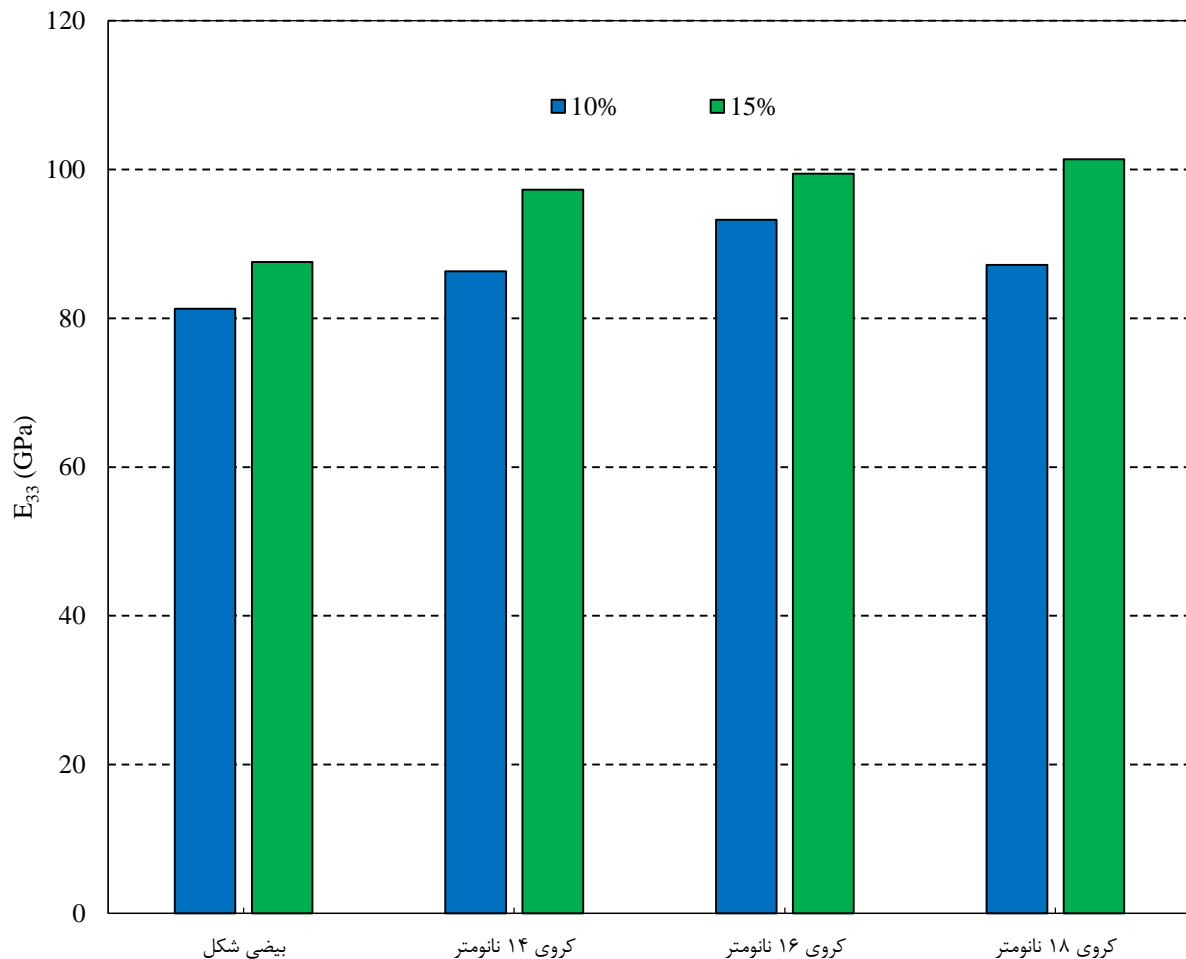
شکل (۱۲) تغییرات مدول الاستیک E_{11} در نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد تقویت کننده‌های بیضوی و کروی با اندازه ذرات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدول E_{11} نانوماده مرکب حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد تقویت کننده بیضوی به ترتیب ۷/۱۵ و ۱۶/۲۵ درصد نسبت به میانگین مدول E_{11} تقویت کننده‌های کروی کاهش داشته است.

در شکل (۱۳) تغییرات مدول E_{22} در نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد تقویت کننده‌های بیضوی و کروی با اندازه ذرات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر، مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که مدول E_{22} نانوماده مرکب با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد تقویت کننده‌های بیضوی به ترتیب، ۶/۵۹ و ۱۷/۴۴ درصد نسبت به میانگین مدول E_{22} تقویت کننده‌های کروی کاهش داشته است.

در شکل (۱۴) تغییرات مدول E_{33} در نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد تقویت کننده‌های بیضوی و کروی با اندازه ذرات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر، مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که مدول E_{33} نانوماده مرکب با کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد تقویت کننده‌های بیضوی به ترتیب، ۸/۴۹ و ۱۱/۸۳ درصد نسبت به میانگین مدول E_{33} تقویت کننده‌های کروی کاهش داشته است.

در جدول (۶) درصد نسبی اختلاف بین مقادیر مدول الاستیک E_{11} حاصل از پژوهش حاضر و مقادیر ارائه شده در مرجع [۱۳] نشان داده شده است. کمترین درصد نسبی اختلاف برای نانوماده مرکب با کسر حجمی ۱۰ درصد و اندازه ذرات ۱۸ نانومتر، ۱/۷۵ درصد و بیشترین درصد نسبی اختلاف برای نانوماده مرکب با کسر حجمی ۱۰ درصد و اندازه ذرات ۱۴ نانومتر، ۴/۸۹ درصد است. برای نانوماده مرکب با کسر حجمی ۱۵ درصد

تقویت کننده، کمترین درصد نسبی اختلاف برای اندازه ذرات ۱۴ نانومتر، ۰/۳۷ درصد و بیشترین درصد نسبی اختلاف برای اندازه ذرات ۱۸ نانومتر، ۱۰/۰۹ درصد است. با توجه به پایین بودن درصد نسبی اختلافها (کمتر از ۱۰ درصد) داده‌های حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تخمین مدول الاستیک E_{11} انطباق خوبی با نتایج تجربی دارند.



شکل ۱۴- مقایسه تغییرات مدول برشی E_{33} در نانومواد مرکب با تقویت کننده های کروی و بیضی شکل

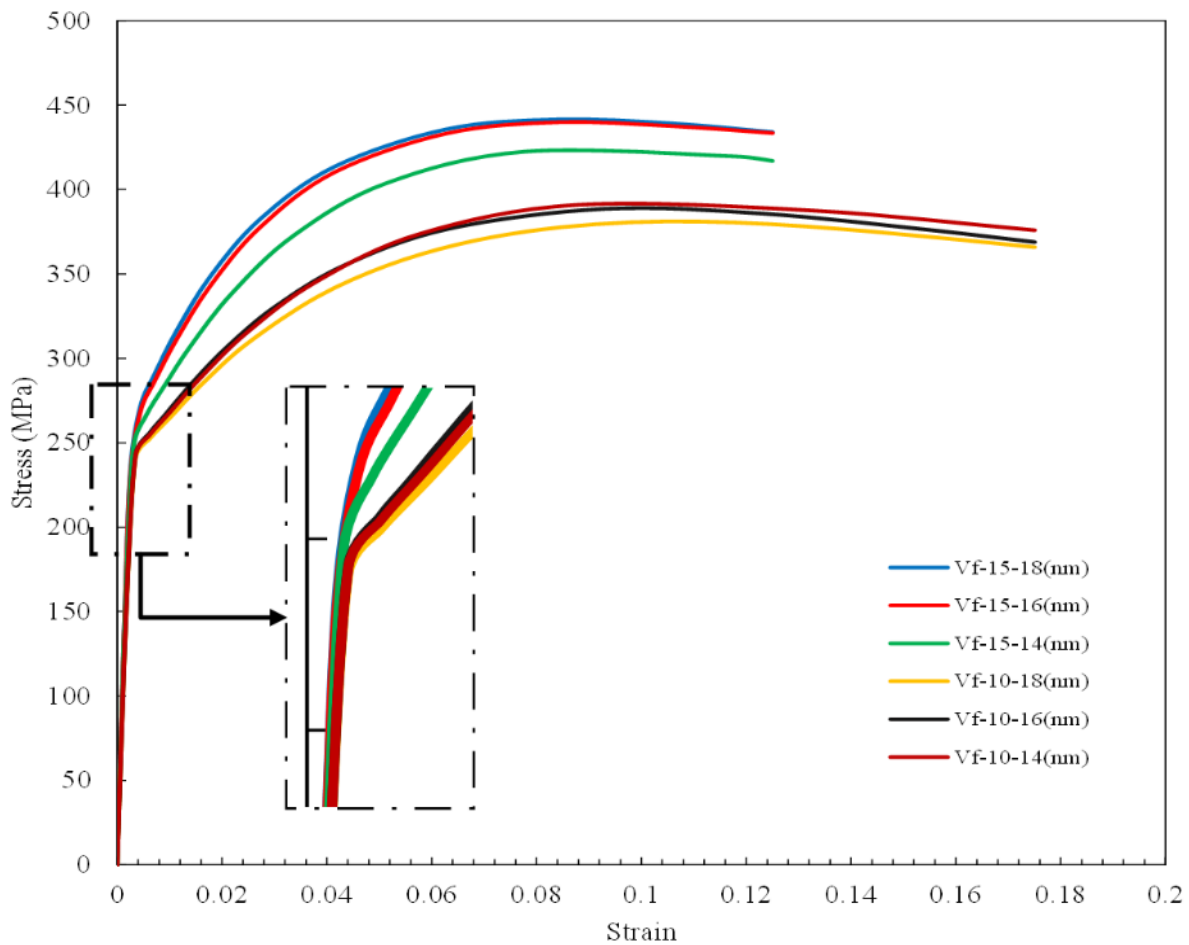
جدول ۶- مقایسه درصد نسبی اختلاف مدول الاستیک E_{11} نانومواد مرکب در کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد با مدول الاستیک در مرجع [۱۳]

مدول الاستیک درصد نسبی اختلاف	مدول الاستیک [۱۳] (مگاپاسکال)	اندازه قطر ذرات کروی (نانومتر)	درصد کسر حجمی
۴/۸۹	۹۰	۱۴	۱۰
۲/۹۱		۱۶	
۱/۷۵		۱۸	
۰/۳۷	۹۹	۱۴	۱۵
۰/۷۸		۱۶	
۱۰/۰۹		۱۸	

۳-۲- تغییر شکل پلاستیک نانوماده مرکب

در بخش تغییر شکل پلاستیک، برای تمام گره‌های المان‌های موجود در جزء حجمی نمونه در شکل (۸-الف)، جابه‌جائی‌ها و نیروها در راستای محور بارگذاری از نرم‌افزار استخراج شده‌اند. سپس از جابه‌جائی‌ها و نیروها، میانگین‌گیری شده و یک منحنی نیرو - جابجایی برای کل جزء حجمی نمونه رسم شده است. با توجه به اینکه ابعاد اولیه جزء حجمی نمونه مشخص بوده‌اند، از منحنی نیرو - جابه‌جائی، منحنی تنش و کرنش مهندسی ترسیم شده است. شکل (۱۵) منحنی‌های تنش - کرنش برای هر یک از نانو مواد مرکب مدلسازی شده را نشان می‌دهد. مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش در نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۰ درصد تقویت‌کننده، نشان می‌دهد که افزایش اندازه نانوذرات، باعث افت منحنی تنش - کرنش شده است. از آنجا که درصد کسر حجمی نانوذرات ثابت بوده‌اند، افت منحنی‌های تنش - کرنش، می‌تواند متأثر از کاهش تعداد ذرات و در نتیجه کاهش تراکم آنها باشد. بدین گونه که اگر نانوذرات را به عنوان جزی تحمل‌کننده بار در نظر بگیریم، با افزایش اندازه نانوذرات، فاصله بین نانوذرات افزایش می‌یابد و در نتیجه تراکم نانوذرات کاهش می‌یابد و به دنبال آن، زمینه نقش بیشتری در مقایسه با نانوذرات در تحمل بار ایفا می‌کند و به علت ضعیف‌تر بودن ماده زمینه، افت منحنی تنش - کرنش مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱۵) و استفاده از روش جابه‌جائی^۱ ۰/۲ درصد، مقدار استحکام تسلیم برای هر یک از نانومواد مرکب مشخص شد و جهت تعیین مقدار استحکام نهایی کششی نیز بالاترین نقطه منحنی تنش - کرنش، استخراج شد. مقادیر استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی حاصل برای انواع نانومواد مرکب با کسرهای حجمی نانوذرات ۱۰ و ۱۵ درصد و با اندازه ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر و زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ در جدول (۷) درج شده است. نتایج تجربی حاصل در مرجع [۱۳] جهت مقایسه و ارزیابی در جدول (۷) نیز درج شده است. بر اساس نتایج مندرج در جدول (۷) مشاهده می‌شود که نانومواد مرکب با کسرهای حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد، حاوی ذرات تقویت‌کننده کروی با اندازه ذرات مختلف، نسبت به آلومینیوم ۶۰۶۱، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی بالاتری دارند. اندازه نانوذرات در مرجع [۱۳]، زیر ۱۰۰ نانومتر گزارش شده است. پائین بودن درصد نسبی اختلاف استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مدلسازی در پژوهش حاضر تفاوت قابل ملاحظه‌ای با نتایج تجربی مشابه ندارد. به هر صورت تفاوت در نتایج به‌دست آمده از روش اجزاء محدود با نتایج تجربی را می‌توان ناشی از این مورد دانست که نانوماده مرکب مدلسازی شده در محیط نرم افزار حاوی ذرات تقویت‌کننده با ابعاد مشخص و دقیق هستند؛ اما در بررسی تجربی ذرات تقویت‌کننده دارای ابعاد مختلفی بوده و دارای توزیع پراکندگی متفاوتی با نمونه‌ی مدلسازی شده دارند. شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب منحنی‌های تنش - کرنش، جزءهای حجمی نمونه‌ی حاوی تقویت‌کننده‌های بیضوی و کروی با کسرهای حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد و انواع اندازه‌ی نانوذرات مختلف را نشان می‌دهند. در جدول (۸) مقادیر استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی نمونه‌های مذکور نشان داده شده‌اند. دلیل افت استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی در نمونه‌های با نانوذرات بیضوی نسبت به نمونه‌های با نانوذرات کروی ناشی از شکل هندسی تقویت‌کننده‌ها است. نانو ذرات با هندسی بیضوی در مقایسه با نانوذرات با هندسه کروی از تمرکز تنش بالاتری برخوردار هستند، در نتیجه منحنی تنش - کرنش نانومواد مرکب حاوی نانوذرات بیضوی نسبت به نانوذرات کروی در تنش‌های اسمی کمتر، استحکام تسلیم و کششی نهایی از خود نشان می‌دهند.

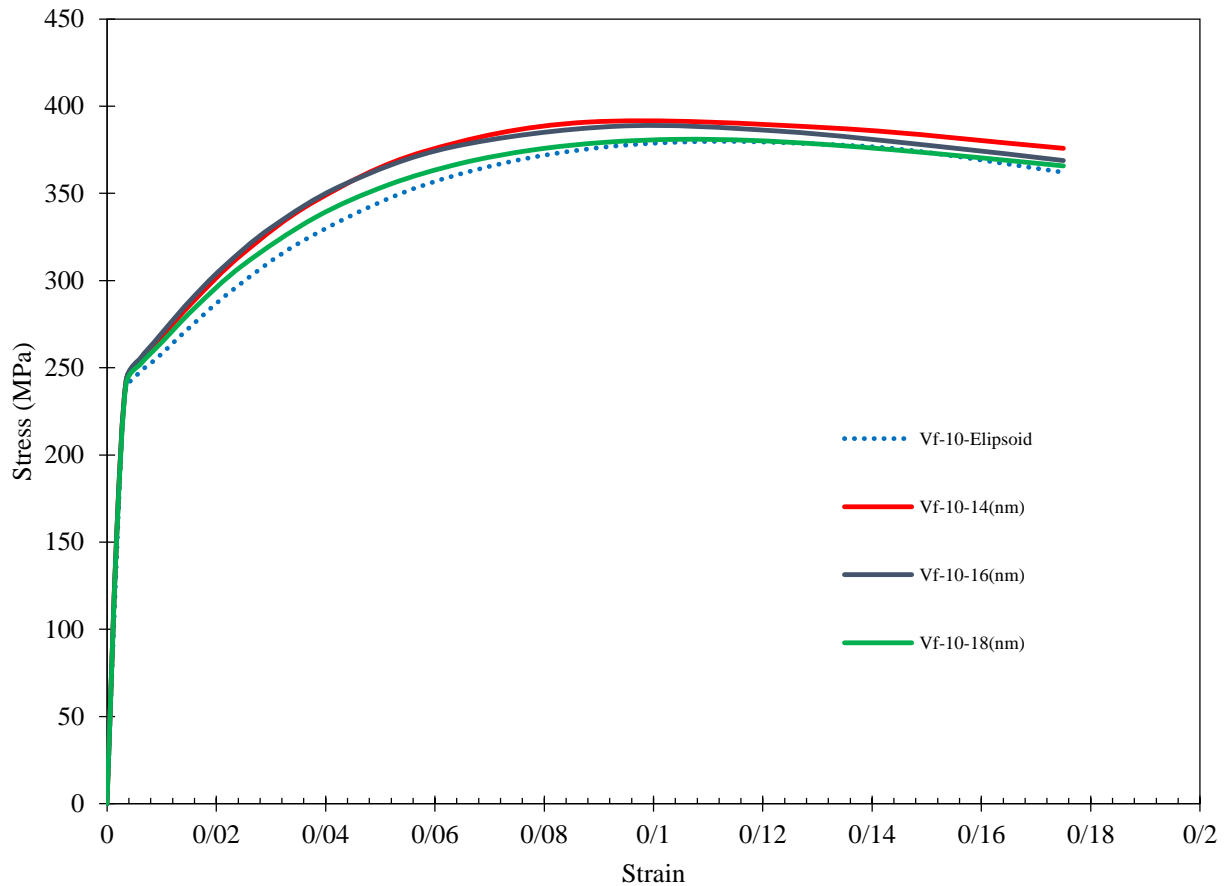
^۱ Offset method



شکل ۱۵- منحنی‌های تنش - کرنش جزء‌های حجمی نمونه در کسر حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد برای نانوذرات کروی با اندازه ۱۴، ۱۶، ۱۸ نانومتر

جدول ۷- جدول استحکام تسلیم و استحکام نهایی کشش در نمونه‌های نانوماده مرکب

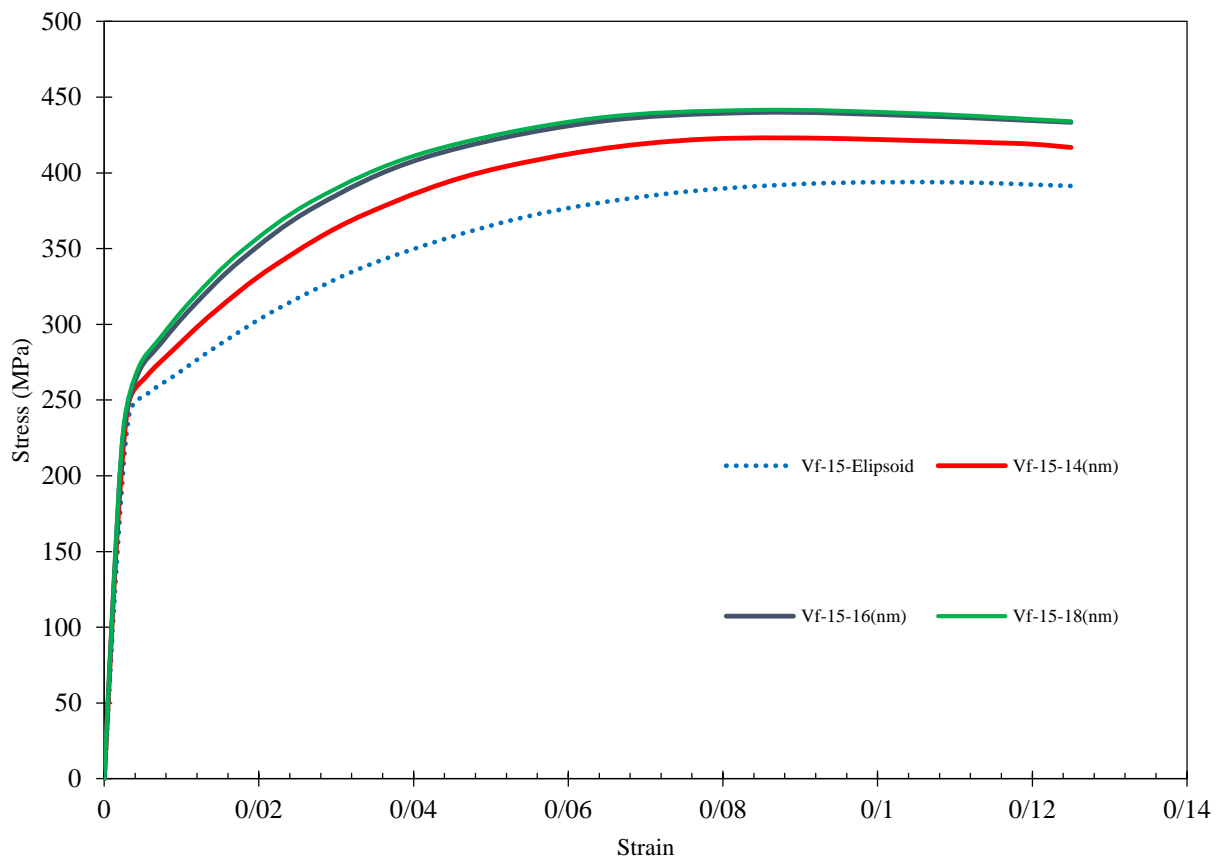
درصد نسبی اختلاف استحکام کششی نهایی	استحکام نهایی کشش (مگاپاسکال)	استحکام کششی نهایی (مگاپاسکال) [۱۳]	درصد نسبی اختلاف استحکام تسلیم	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال) [۱۳]	اندازه نانوذرات کروی	کسر حجمی
۷/۸۳	۳۹۰/۸۰	۴۲۴	۹/۶۰	۲۵۴/۰۱	۲۸۱	۱۴	۱۰
۸/۳۵	۳۸۸/۶۰		۹/۷۸	۲۵۳/۵۲		۱۶	
۱۰/۱۴	۳۸۱/۰۰		۱۰/۶۴	۲۵۱/۱۰		۱۸	
۵/۹۲	۴۲۲/۴۰	۴۴۹	۱۳/۷۴	۲۶۴/۸۰	۳۰۷	۱۴	۱۵
۲/۰۵	۴۳۹/۸۰		۱۲/۳۱	۲۶۹/۲۰		۱۶	
۱/۶۷	۴۴۱/۵۰		۱۱/۱۱	۲۷۲/۹۰		۱۸	
-	-	۳۴۲/۰۰	-	-	۲۲۶/۰۰	-	آلومینیوم ۶۰۶۱



شکل ۱۶- منحنی‌های تنش - کرنش نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۰ درصد با میانگین اندازه شعاع نانوذرات و شکل هندسی کروی و بیضی

جدول ۸- مقایسه استحکام تسلیم و استحکام نهایی کششی نانوماده مرکب با کسر حجمی ۱۰ درصد و تقویت کننده‌های بیضوی و کروی

کسر حجمی	نوع و اندازه ذرات	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	درصد نسبی اختلاف استحکام تسلیم	استحکام نهایی کششی (مگاپاسکال)	درصد نسبی اختلاف استحکام نهایی کششی
۱۰	بیضوی	۲۴۵/۶	—	۳۷۹/۷	—
	کروی ۱۴ نانومتر	۲۵۴/۰۱	۳/۳۱	۳۹۰/۸۰	۲/۸۴
	کروی ۱۶ نانومتر	۲۵۳/۵۲	۳/۲۱	۳۸۸/۶۰	۲/۲۹
	کروی ۱۸ نانومتر	۲۵۱/۱۰	۲/۱۹	۳۸۱/۰۰	۰/۳۴
۱۵	بیضوی	۲۵۳/۳	—	۳۹۳/۸	—
	کروی ۱۴ نانومتر	۲۶۴/۸۰	۴/۳۴	۴۲۲/۴۰	۶/۷۷
	کروی ۱۶ نانومتر	۲۶۹/۲۰	۵/۹۱	۴۳۹/۸۰	۱۰/۴۶
	کروی ۱۸ نانومتر	۲۷۲/۹۰	۷/۱۸	۴۴۱/۵۰	۱۰/۸۰



شکل ۱۷- منحنی‌های تنش - کرنش نانومواد مرکب با کسر حجمی ۱۵ درصد با اندازه نانوذرات مختلف و شکل‌های هندسی کروی و بیضی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جزءهای حجمی نمونه از نانومواد مرکب زمینه آلومینیم ۶۰۶۱ تقویت شده با ذرات نانومتری کاربید سیلیسیوم با شکل‌های کروی و اندازه‌های ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نانومتر و نانوذرات با شکل بیضوی با نسبت منظری ۲ و با کسرهای حجمی ۱۰ و ۱۵ درصد مدل‌سازی شدند. سپس به روش اجزای محدود، رفتار الاستیک و پلاستیک نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، خواص مکانیکی از جمله مدول الاستیک، مدول برشی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهائی افزایش می‌یابد. خواص مکانیکی در کسر حجمی ۱۰ درصد، با افزایش اندازه نانوذرات، کاهش می‌یابد. همچنین خواص مکانیکی نانوماده مرکب حاوی تقویت کننده‌های بیضوی نسبت به تقویت کننده‌های کروی کمتر می‌باشد.

مراجع

[1] K. K. Chawla, and K. K. Chawla, "*Metal Matrix Composites: Science and Engineering*", Second Edition, Springer, (Springer Science+Business Media New York), New York, NY, 1998, https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2966-5_6.

[2] A. Mohammadi, and M. Alipour, "Effect of Silicon Carbide (SiC) Nanoparticles Amount on Mechanical Properties and Wear Behavior of A380 Aluminum Alloy Nanocomposite

Produced by Powder Metallurgy Method," *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 41, No. 4, pp. 91-102, 2023, <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2251600.1401.41.4.6.4>, doi: 10.47176/JAME.41.4.1007, [In Persian].

[3] M. Gao, E. Guo, Z. Chen, H. Kang, and T. Wang, "Revealing the Role of Micropore Defects in Tensile Deformation of a B4Cp/Al Composite using an Actual Three-dimensional Model," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 22, pp. 3146-3155, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.12.145.

[4] A. El Moumen, T. Kanit, and A. Imad, "Numerical Evaluation of the Representative Volume Element for Random Composites," *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 86, pp. 104181, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104181>.

[5] R. Riedel, "Nanoscaled Inorganic Materials by Molecular Design," *Chemical Society Reviews*, Vol. 41, No. 15, pp. 5029-5031, 2012, <https://doi.org/10.1039/C2CS90050E>.

[6] W. Wang, and N. S. Murthy, "Characterization of Nanotube-reinforced Polymer Composites," *Carbon Nanotubes: Polymer Nanocomposites*, Edited by Siva Yellampalli, Published by InTech, pp. 155-172, 2011, ISBN: 9533074981, 9789533074986. DOI: 10.5772/20267.

[7] D. Garbiec, M. Jurczyk, N. Levintant-Zayonts, and T. Mościcki, "Properties of Al–Al₂O₃ Composites Synthesized by Spark Plasma Sintering Method," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 933-939, 2015, doi: 10.1016/j.acme.2015.02.004.

[8] W. Z. Li, S. Y. Liu, Q. Y. Zhang, and X. Zhu, "Untrasonic-assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites," in *Materials Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 990-993, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2010, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.990>.

[9] X. Gao, X. Zhang, M. Qian, and L. Geng, "Effect of Reinforcement Shape on Fracture Behaviour of SiC/Al composites with network architecture," *Composite Structures*, vol. 215, pp. 411-420, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.02.067.

[10] Y. S. Suh, S. P. Joshi, and K. Ramesh, "An enhanced continuum model for size-dependent strengthening and Failure of Particle-reinforced Composites," *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 19, pp. 5848-5861, 2009, doi: 10.1016/j.actamat.2009.08.010.

[11] H. K. Issa, A. Taherizadeh, A. Maleki, and A. Ghaei, "Development of an Aluminum/Amorphous Nano-SiO₂ Composite using Powder Metallurgy and Hot Extrusion Processes," *Ceramics International*, Vol. 43, No. 17, pp. 14582-14592, 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.06.057.

[12] J. Zhou, L. Qi, and A. M. Gokhale, "Generation of Three-dimensional Microstructure Model for Discontinuously Reinforced Composite by Modified Random Sequential Absorption Method," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 138, No. 2, pp. 021001 (8 pages), Paper No. MATS-15-1104, 2016, <https://doi.org/10.1115/1.4032152>.

- [13] A. Knowles, X. Jiang, M. Galano, and F. Audebert, "Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Al Alloy Based Composites with SiC Nanoparticles," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 615, pp. S401-S405, 2014, doi: 10.1016/j.jallcom.2014.01.134.
- [14] K. Padmavathi, R. Ramakrishnan, L. Karthikeyan, S. Tamizhselvan, and S. C. Babu, "Comparison of the Mechanical Properties of Micro/Nano SiC/TiO₂ Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 72, pp. 1996-2001, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.07.315.
- [15] L. Gao, C. Liu, J. Liu, and T. Yang, "Effect of Subsurface Damage on Tensile Behavior and Fracture Mechanism of SiCp/Al Composites: Experimental Analysis and RVE Modeling," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 147, pp. 107162, 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107162.
- [16] B. Çetin, M. KAŞIKÇI, and A. H. Uslu, "Design of a Specific MATLAB Code for Processing of Standard Tensile Test Data for Sheet Metal Forming Simulations," *Hittite Journal of Science and Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 151-157, 2015, doi: 10.17350/HJSE19030000019.

فهرست نمادهای انگلیسی

A	ثابت معادله ووس
B	ثابت معادله ووس
C_{ij}	ماتریس سفتی
E_{11}	مدول الاستیک در راستای X
E_{22}	مدول الاستیک در راستای Y
E_{33}	مدول الاستیک
G_{12}	مدول برشی در صفحه XY
G_{32}	مدول برشی در صفحه ZY
G_{31}	مدول برشی در صفحه ZX
K	ثابت معادلات ساختاری
n	ثابت معادلات ساختاری
S_{ij}	ماتریس عکس سفتی
σ_0	تنش اولیه
σ	تنش سیلان
ν_{21}	ضریب پواسون در صفحه XY
ν_{31}	ضریب پواسون در صفحه ZX
ν_{32}	ضریب پواسون در صفحه ZY
ϵ_0	کرنش اولیه
ϵ	کرنش

Study of the Effect of Silicon Carbide Reinforcement Characteristics on the Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposite

Farnam Raoufmehr

M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
raoufmehrfarnam@gmail.com

*Corresponding author: **Mohammad Reza Dashtbayazi**

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
dashtbayazi@uk.ac.ir

Abstract

In this study, the mechanical properties of an aluminum 6061-based nanocomposite reinforced with Silicon Carbide (SiC) nanoparticles were investigated. The factors examined included the size, geometry, and volume fraction of the nanoparticles. Using the Random Sequential Adsorption (RSA) algorithm, a Representative Volume Element (RVE) of the nanocomposite with randomly distributed spherical and elliptical particles was simulated. The results showed that increasing the volume fraction of nanoparticles leads to improved mechanical properties, including elastic modulus, shear modulus, yield strength, and ultimate tensile strength. In samples reinforced with spherical nanoparticles at a 10% volume fraction, mechanical properties decreased with increasing particle size. Furthermore, the mechanical properties of nanocomposites reinforced with elliptical particles were lower compared to those reinforced with spherical particles.

Keywords: Metal matrix nanocomposite, Representative Volume Element, Mechanical properties, Finite element method