

## اثر توزیع ناهمگن ذرات تقویت کننده بر رفتار مکانیکی کامپوزیت های سبک پایه فلزی تقویت شده با ذرات آمورف

جیران نفر دستگردی<sup>1\*</sup>، محمدسجاد گودرزی<sup>2</sup>

1- عضو هیئت علمی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی هوافضا - j.nafardastgerdi@aut.ac.ir  
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی هوافضا - m.s.goodarzi@aut.ac.ir

\*نویسنده مخاطب

### چکیده

در این مقاله یک روش شبیه سازی با استفاده از مدل ناحیه چسبنده (CZM) مبتنی بر روش المان محدود برای بررسی شروع و گسترش آسیب در کامپوزیت سبک پایه منیزیم تقویت شده با ذرات آمورف  $Ni_{60}Nb_{40}$  ارائه شده است. شبیه سازی براساس میکروساختار واقعی با در نظر گرفتن ذرات با اندازه، شکل و موقعیت مکانی واقعی و همچنین اثر تجمع محلی ذرات تقویت کننده (Clustering) صورت پذیرفته و رفتار ماده کامپوزیتی تحت بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه سازی دقیق جدایش ذرات تقویت کننده از فاز زمینه از روابط مبتنی بر مدل ناحیه چسبنده و المانهای سطح مشترک (Cohesive) استفاده شده است. بدین ترتیب امکان بررسی دقیق اثر میکرو ساختار واقعی و اثر تجمع محلی ذرات تقویت کننده بر روی تغییر شکل پلاستیک، شروع و گسترش آسیب بوجود آمده است. برای این منظور تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ماده کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین برای تعیین خواص ناحیه سطح مشترک بین فاز ماده زمینه و ذرات تقویت کننده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و یک روش جدید مشخصه یابی معکوس استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که در مناطقی از ریزساختار که دارای تجمع محلی ذرات بوده، تغییر شکل محلی محدودیت شدیدتری دارد و امکان جدایش ذرات تقویت کننده از ماده زمینه، شروع و گسترش آسیب در این مناطق بیشتر است.

**واژه های کلیدی:** کامپوزیت پایه فلزی- مدل ناحیه چسبنده- میکروسکوپ نیروی اتمی- میکروساختار واقعی

### 1- مقدمه

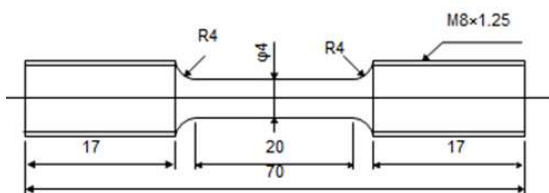
استفاده روز افزون از کامپوزیت های سبک پایه فلزی در صنایع مختلف از جمله هوافضا و صنعت حمل و نقل نشانگر مزیت های قابل توجه این مواد نسبت به سایر مواد است.

منیزیم همواره بعنوان یک فلز سبک وزن در هوافضا و صنایع خودروسازی استفاده شده است و در سال های اخیر، این صنایع سرمایه گذاری ویژه ای برای پژوهش و توسعه مواد سبک وزن بر پایه ی منیزیم انجام داده اند. منیزیم همچنین دارای ویژگی های قابل توجهی مانند ظرفیت میرایی عالی، قابلیت ریخته گری، قابلیت ماشین کاری و پردازش دمای پایین است که آن را برای طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی مناسب

می کند. با این حال، مدول الاستیک نسبتاً کم، مقاومت کم و پایداری ضعیف در دمای های بالا، دامنه کاربردهای منیزیم را محدود می کند. مطالعات و بررسی های نشان داده است که بسیاری از این محدودیت ها می توانند از طریق ترکیب عناصر آلیاژی و یا تقویت کننده ها بهبود یابند.

دستگردی و همکاران [1] با استفاده از شبیه سازی المان محدود برای مطالعه ی دقیق الگوی تغییر شکل و مکانیسم آسیب در این کامپوزیت ها یک روش شبیه سازی جدید که می تواند شامل ناهمگنی ریز ساختاری ذرات تقویت شده ی کامپوزیت باشد، با فرض چسبندگی ایده آل بین اجزای فاز زمینه و ذرات تقویت کننده ارائه دادند. آنان یک پارامتر کمی به عنوان درجه خوشه بندی برای در نظر گرفتن اثر خوشه بندی (تجمع محلی) ذرات تعریف کردند. نتایج نشان داد که میزان رشد آسیب کامپوزیت با درجه خوشه بندی بالاتر به طور قابل توجهی بالاتر از کامپوزیتی با درجه خوشه بندی پایین تر است. مشخص شد که برای منطقه ای با درجه خوشه بندی بالاتر و اندازه خوشه های بزرگتر، تنش فون مایسس در همان شرایط بارگیری، بالاتر است و سرعت رشد جریان پلاستیک به طور قابل توجهی بالاتر از منطقه ای دیگر با درجه خوشه بندی پایین تر است. علاوه بر این، با استفاده از توصیف حرکت ناهمگنی ها در مواد دو فاز، اثر خوشه بندی ذرات بر رفتار تسلیم ذرات تقویت شده کامپوزیت و تنش جریان در این کامپوزیت ها توجه گردید و همچنین دریافتند که تنش های ماکروسکوپی که منجر به تسلیم اولیه در ماتریس می شوند، هنگامی که به خوشه هایی با اندازه بزرگتر و درجه خوشه بندی بالاتر نزدیک می شوند، کاهش می یابد. علاوه مشخص گردید که مناطقی که خوشه ها در مجاورت یکدیگر قرار دارند مکان های بالقوه ای برای گسیختگی و جدایش ذرات از ماده زمینه هستند زیرا که تنش هیدرواستاتیک مقادیر بالاتری دارد و جریان پلاستیک در آنجا محدود است. در تحقیقی دیگر توسط دستگردی و همکاران [2] آزمایشات خستگی (در سیکل های تعداد بالا) بر روی کلاس جدید کامپوزیت ماتریس منیزیم تقویت شده با ذرات آلیاژ آمورف انجام شده است و در آن مشخص شده که تفاوت ریزساختار دلیل ایجاد و گسترش ترک های مختلف است و این شرایط بر عمر خستگی تأثیر می گذارد. کامپوزیت ها با توزیع ذرات یکنواخت تر مقاومت به خستگی بالاتری دارند. برای کامپوزیتی که ذرات تقویت کننده به طور یکنواخت توزیع نشده اند، امکان شروع ترک از محل تجمع محلی ذرات و سپس ادغام با ترک ها مجاور بیشتر است. در مقابل، برای کامپوزیتی با درجه خوشه بندی کمتر و توزیع نسبتاً یکنواخت تر

طبق استاندارد ASTM E8 چنانچه که در شکل ۱ قابل مشاهده است تولید گردید.



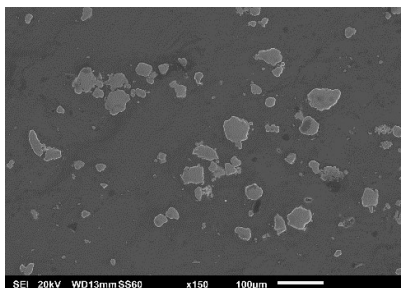
شکل ۱- نمونه قطعه آماده به همراه مشخصات برای تست کشش

برای شبیه سازی عددی در مراحل بعدی باید خواص مکانیکی ذرات آمورف تولید شده اندازه گیری شوند. بنابراین، یک نمونه کامپوزیت به خوبی پالایش و صیقلی شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) اسکن شد تا تصاویری از توپوگرافی سطح بدست آید و خواص مکانیکی ذرات Ni<sub>60</sub>Nb<sub>40</sub> تعبیه شده در ماتریس اندازه گیری شود. خواص استخراج شده در جدول ۱ برای فاز زمینه و فاز تقویت کننده ارائه شده است. همچنین داده های حاصل از اسکن AFM اطلاعاتی درباره خواص مکانیکی در فصل مشترک ماده زمینه و ذرات تقویت کننده ارائه می دهد.

جدول ۱- خواص مکانیکی محاسبه شده برای کامپوزیت

	$\nu$	E(GPa)
Pure Mg	0.35	42.2 ± 0.9
Ni <sub>60</sub> Nb <sub>40</sub>	0.3	150 ± 7

برای شبیه سازی یک میکروساختار واقعی حاصل از تصویربرداری SEM، تصویری از سطح قطعه چنانچه در شکل ۲ نشان داده شده است مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲- نمونه تصاویر SEM عکس برداری شده از کامپوزیت مورد آزمایش

### ۳- مدل شبیه سازی ناحیه چسبنده (CZM)

المان های CZM یا سطح مشترک از روابط و قانون متشکله CZM پیروی می کنند که این روابط به توضیح نرم شوندگی غیر خطی در طی فرآیندهای آسیب و یا در طی رفتار جدایش با استفاده از روش تجمیع آسیب و یا توسعه یافتگی نوک ترک می پردازد. با استفاده از المان های سطح مشترک در یک کد المان محدود و یا نرم افزار های تجاری متداول المان محدود می توان تنش ها را به جابه جایی ها متناظر مرتبط کرد [7].

مدل ناحیه چسبنده یک مدل کلی است که می توان با استفاده از آن با ناحیه غیر خطی ایجاد شده در نوک ترک به دلیل اثر پلاستیسیته و یا ترک های ریز موجود در مواد مقابله کرد. علاوه بر این مهم ترین مزیت این روش مدلسازی پیش بینی مناسب رفتار مکانیکی و تخریب مواد و سازه های بدون ترک اولیه است. جدایش در سطح مشترک را می توان با روش های

ذرات، ترک های خستگی کمتری ایجاد شده و ادغام ترک ها با یکدیگر و ایجاد یک ترک بزرگتر به راحتی رخ نمی دهد. تفاوت ریزساختار دلیل ایجاد و گسترش ترک های مختلف است و این شرایط بر عمر خستگی تأثیر می گذارد. مشاهده رشد ترک نشان داد که شروع ترک خستگی ترجیحاً در ناحیه بین ماتریس و ذرات رخ می دهد. علاوه بر این، مشاهده شده است که رشد ترک در ذرات تقویت شده کامپوزیت بسیار محلی است، که عمدتاً متأثر از توزیع ریزساختار ذرات در مجاورت نوک ترک است. سرعت رشد ترک شروع شده از منطقه خوشه ای با تجمع محلی ذرات به طور قابل توجهی بالاتر از سرعت رشد ترک شروع شده از ماتریس و یا از مرز مشترک ذرات با توزیع پراکنده است. شبیه سازی های مبتنی بر روش المان محدود اغلب برای المان حجمی نماینده مورد استفاده قرار می گیرند. می توان فرض کرد که با تولید تعداد بسیار زیادی از المان های حجمی نماینده، ریز ساختار کامپوزیت ها را شبیه سازی کرد. با این حال، شبیه سازی کامپوزیت های پیچیده و ناهمگن که دارای ذرات پراکنده تصادفی هستند، یکی از چالش های اساسی در استفاده از این روش ها است [4], [3]. بنابراین دستیابی به یک روش شبیه سازی که دارای دقت بسیار بالایی در پیش بینی رفتار کامپوزیت ها باشد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به دلیل وجود ریز ساختار پیچیده در کامپوزیت ها به ویژه کامپوزیت های تقویت شده با ذرات با توجه به شکل بسیار نامنظم و توزیع غیر یکنواخت فازها، تولید شبکه محاسباتی و مدلسازی رفتار الاستیک-پلاستیک و مکانیزم های محلی آسیب از اساسی ترین چالش های مکانیک محاسباتی است [6], [5].

در این پژوهش به بررسی اثر ذرات تقویت کننده و توزیع آن ها بر رفتار مکانیکی و شروع و پیشروی آسیب در کامپوزیت پایه فلزی سبک Mg/Ni<sub>60</sub>Nb<sub>40</sub> با در نظر گرفتن عدم وجود فرض ایده آل چسبندگی بین ذرات تقویت کننده و فاز زمینه و اثر وجود مناطق خوشه ای با تجمع محلی ذرات تقویت کننده پرداخته شده است. به دلیل آنکه ذرات تقویت کننده و توزیع آن ها نقش قابل توجهی بر روی بهبود خواص مکانیکی مانند تنش تسلیم، شکل پذیری و همچنین شروع آسیب می گذارند، برای درک ماهیت رفتار واقعی آن ها از روش تصویر برداری SEM برای ایجاد میکروساختار واقعی و همچنین شبیه سازی رفتار آن ها با استفاده از مدل ناحیه چسبنده در نرم افزار های تجاری المان محدود استفاده شده است.

### ۲- مواد، روش آماده سازی نمونه و آزمایشات تجربی

در این تحقیق برای درست کردن ذرات تقویت کننده که دارای ترکیب اتمی Ni<sub>60</sub>Nb<sub>40</sub> می باشد در ابتدا برای تهیه پودر این ترکیب این دو فلز به صورت مکانیکی با هم ترکیب شدند. در مرحله بعد این ترکیب پودری به مدت ۸۷ ساعت در دمای اتاق با استفاده از یک دستگاه آسیاب گلوله ای با نرخ تبدیل ۳ و ۱ به سرعت دورانی 200 rpm آسیاب شد. برای ساخت کامپوزیت پایه منیزمی از پودر منیزیم با درصد خلوص ۹۹.۶٪ به همراه پودر ذرات تقویت کننده با دو در صد حجمی ۵ درصد استفاده شد به طوری که در ابتدا پودر منیزیم با پودر Ni<sub>60</sub>Nb<sub>40</sub> با رعایت درصد حجمی به مدت ۱ ساعت با یکدیگر به خوبی مخلوط شدند و بعد به مدت ۱ دقیقه در فشار ۴۵۰ مگاپاسکال با یکدیگر آمیخته شدند. در مرحله بعدی با استفاده از روش اکستروژن گرم میله هایی به قطر ۱۶ میلی متر در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد و فشار 600 psi اکستروژد شدند. برای انجام تست کشش قطاعی

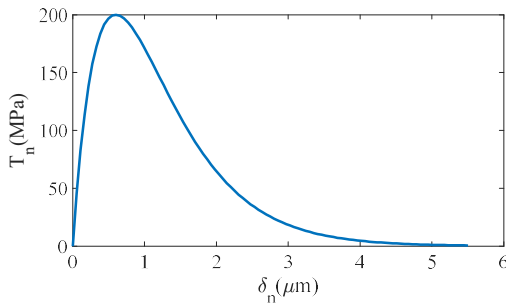
مشترک با فرض بر صفر بودن مقدار جدایش برشی ۳- محاسبه جدایش برشی با در نظر گرفتن  $\delta_t = \frac{\sqrt{2}}{2} \bar{\delta}_t$  که در روابط ۴ و ۶ ذکر شده نیاز است. با استفاده از داده‌های بدست آمده از AFM و استخراج خواص مکانیکی در سطح مشترک ماده زمینه و ذرات آمورف و با استفاده از رابطه:

$$S_{ut} = \beta H \quad (7)$$

که در آن H مقدار سختی،  $\beta$  یک ضریب ثابت و  $S_{ut}$  مقدار تنش نهایی است. مقدار تنش نهایی در سطح مشترک ۲۰۰ مگاپاسکال محاسبه گردید.

برای محاسبه سایر خواص مورد نیاز برای شبیه سازی یک المان حجمی نماینده از تصویر SEM گرفته شده از قطعه انتخاب شد و با استفاده از تئوری انرژی حداکثر در پیچیدگی برشی و با استفاده از رابطه ۸، نمودار تنش-جدایش مانند شکل ۳ برای کامپوزیت مورد بررسی رسم گردید.

$$\bar{\delta}_n = 0.495 \bar{\delta}_t \quad (8)$$



شکل ۳- نمودار تنش - جدایش بر اساس معادلات

المان چسبنده نمایی ( $\delta_t=0$ )

برای صحت‌سنجی نمودار و نتایج بدست آمده یک تصویر از میکرو ساختار واقعی مقطع عرضی شکسته شده مانند شکل ۴ انتخاب گردیده است. مقدار جدایش ذره از فاز زمینه اندازه گیری شد سپس با استفاده از یک روش سعی و خطای معکوس روابط برای  $\bar{\delta}_n$  های مختلف محاسبه گردید و مقادیر آن‌ها با مقادیر بدست آمده از شبیه سازی برای انتخاب درست ترین رفتار مقایسه گردید. نتیجتاً مقدار  $\bar{\delta}_n = 0.5 \mu m$  انتخاب گردید.



شکل ۴- تصویر میکرو ساختار انتخاب شده و جدایش اندازه گیری شده [1]

#### ۴- مدل‌سازی اجزاء محدود

در این پژوهش به منظور شبیه سازی و مطالعه دقیق رفتار ماده کامپوزیتی در سطح ریزساختار، دو المان حجمی نماینده با رعایت اصل

سنتی مکانیک شکست از جمله روش بسته شدن مجازی ترک شبیه سازی کرد. همچنین می‌توان از روش CZM که مستقیماً مکانیزم آسیب و شکست را با اتخاذ روابط نرم شوندگی بین تنش و جدایش در نظر می‌گیرد مدل و شبیه سازی کرد.

این روش مدل‌سازی می‌تواند شروع آسیب، گسترش و انتشار ترک را در شرایط مختلف و بار در نظر گرفتن اثر همزمان مودهای مختلف خرابی و شکست شبیه سازی کند.

رفتار المان های CZM را می‌توان با دو قانون نرم‌شوندگی دوخطی و نمایی مدل و شبیه سازی کرد. در این پژوهش از مدل نمایی که توسط Xu and Needleman ارائه شده استفاده شده است [7]. قانون نمایی نرم شوندگی پیشنهاد شده در فرمول (۱) از انرژی پتانسیل سطحی استفاده می‌کند چنانچه:

$$\varphi(\delta) = e\sigma_{max}\bar{\delta}\left[1 - (1 + \Delta_n)e^{-\Delta_n}e^{-\Delta_t^2}\right] \quad (1)$$

$$\Delta_n = \frac{\delta_n}{\bar{\delta}_n}, \quad \Delta_t = \frac{\delta_t}{\bar{\delta}_t} \quad (2)$$

در این معادله  $\varphi(\delta)$  انرژی پتانسیل سطح، e برابر با 2.7182818 و  $\sigma_{max}$  ماکسیمم تنش نرمال در سطح مشترک،  $\delta_n$  جدایش نرمال،  $\delta_t$  جدایش برشی،  $\bar{\delta}_n$  مقدار جدایش نرمال در طول سطح مشترک در زمانی که تنش نرمال با فرض  $\delta_t = 0$  محاسبه شود و  $\bar{\delta}_t$  جدایش برشی در طول سطح مشترک با فرض محاسبه جدایش برشی با در نظر گرفتن  $\delta_t = \frac{\sqrt{2}}{2} \bar{\delta}_t$  است [8].

با استفاده از روابط محاسبه تنش نرمال و برشی و فرضیات مدل ارائه شده با جایگذاری در رابطه (۱)، روابط زیر استخراج می‌گردد.

$$T_n = e\sigma_{max}\Delta_n e^{-\Delta_n} e^{-\Delta_t^2} \quad (3)$$

$$T_t = 2e\sigma_{max}\frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t}\Delta_t(1 + \Delta_n)e^{-\Delta_n}e^{-\Delta_t^2} \quad (4)$$

سپس کار تنش نرمال به صورت زیر استخراج می‌شود.

$$\varphi_n = e\sigma_{max}\bar{\delta}_n \quad (5)$$

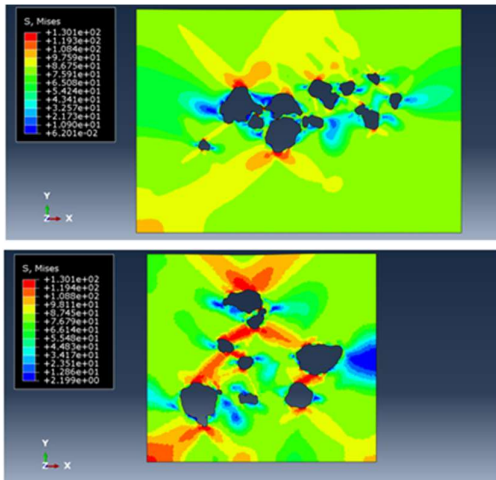
و به طور مشابه برای تنش برشی داریم:

$$\varphi_t = \sqrt{2}e\tau_{max}\bar{\delta}_t \quad (6)$$

با توجه به روابط ذکر شده و داده‌های تجربی حاصل از اندازه گیری خواص مکانیکی در فصل مشترک ماده زمینه و ذرات تقویت کننده توسط AFM و تست کشش انجام شده بر روی نمونه کامپوزیتی و تصاویر بدست آمده از نمونه شکسته شده در مرحله بعدی به استخراج خواص مورد نیاز برای شبیه سازی با استفاده از المان های CZM در نرم افزار ABAQUS پرداخته شده است.

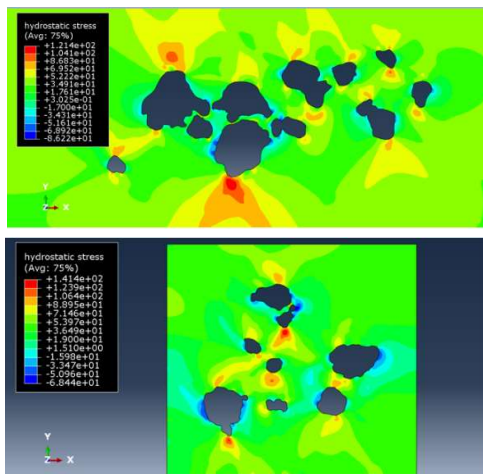
در این پژوهش به منظور شبیه سازی اجزا محدود بر اساس مدل تجربی ارائه شده توسط Xu and Needleman به سه خاصیت مکانیکی به شرح: ۱- تنش نرمال در سطح مشترک ۲- جدایش نرمال در طول سطح

با تمرکز محلی ذرات تقویت کننده کمتر از ناحیه بدون تجمع محلی ذرات است و در برخی از مناطق خوشه ای مقادیر تنش فون میس کمتر از تنش تسلیم ماتریس است. در حالیکه چنین شرایطی در منطقه ۲ که میزان تجمع محلی ذرات کمتر است دیده نمی شود. توزیع تنش فون میس در منطقه ۱ نشان می دهد که جریان پلاستیک ماده زمینه داخل خوشه ها با تجمع محلی ذرات محدود است و تجمع ذرات تقویت کننده تأثیر قابل توجهی بر پلاستیسیته محلی دارد. این محدودیت در تغییر شکل داخل خوشه ها منجر به جدایش ذرات تقویت کننده از ماده زمینه و شروع خرابی است.



شکل ۷- توزیع تنش فون میس در دو منطقه انتخابی

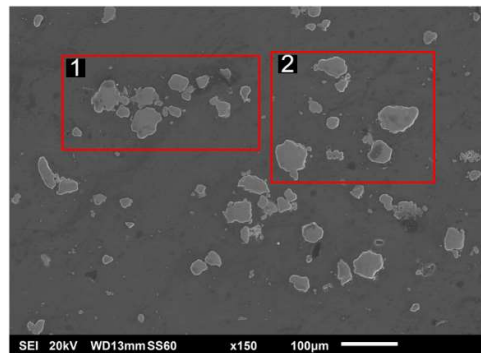
شکل ۸ توزیع تنش هیدرواستاتیک در مناطق ۱ و ۲ را نشان میدهد. نواحی که بیشترین و کمترین مقدار تنش هیدرواستاتیک در آن ها ایجاد شده است، دارای احتمال بالاتری برای شروع جدایش ذرات از فاز زمینه هستند. بطور کلی، مقدار تنش هیدرواستاتیک می تواند بعنوان یک پارامتر تشخیص مکان های مستعد برای شروع جدایش ذرات از فاز زمینه مورد استفاده قرار بگیرد.



شکل ۸- توزیع کرنش پلاستیک معادل در دو منطقه انتخابی

همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در مناطقی که ذرات تقویت کننده به یکدیگر نزدیک هستند، به دلیل وجود اثر محدودیت در

شبه سازی میکرو ساختار واقعی از تصاویر SEM که در شکل ۵ نمایش داده شده است، مدل سازی گردیده است. در منطقه ۱، ذرات تقویت کننده به صورت محلی تجمع نموده و در منطقه ۲ میزان تجمع محلی ذرات کمتر است.

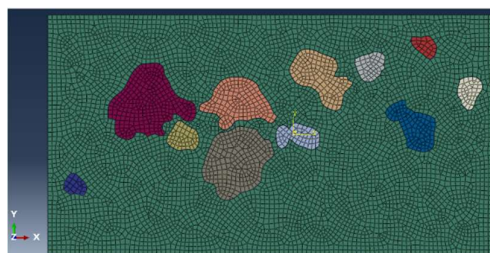


شکل ۵- قسمت های انتخاب شده از تصویر SEM برای مدل سازی

المان های حجمی نماینده ایجاد شده با رعایت تمام جزئیات میکرو ساختاری مانند ابعاد با اندازه واقعی، شکل و موقعیت مکانی مدل سازی شده اند.

در کامپوزیت ها رفتار فاز زمینه الاستیک-پلاستیک می باشد و رفتار ذرات آمورف تقویت کننده کاملاً الاستیک می باشد. بنابراین در کامپوزیت مورد تحقیق رفتار ماتریس منیزیم و ذرات تویت کننده آمورف به ترتیب الاستیک-پلاستیک و کاملاً الاستیک در نظر گرفته شده است.

المان حجمی نماینده مدل سازی شده از یک میکروساختار واقعی به همراه یک شبکه بندی متداول در نرم افزار آباکوس در شکل ۶ نمایش داده شده است. در این تحقیق برای مدل سازی دقیق میکرو ساختار و دقت قابل قبول در مناطق سطح مشترک از یک شبکه بندی آزاد (Free) که حاوی المان های مستطیلی و مثلثی به صورت همزمان است در حالت کرنش صفحه ای استفاده شده است. شرایط مرزی متقارن به دو صفحه کناری (سمت چپ و پایین) اعمال گردیده و به صفحه سمت راست یک جابه جایی یکسان در راستای طولی به تمام نقاط داده شده است.



شکل ۶- مدل سازی انجام شده از میکرو ساختار به همراه المان بندی برای منطقه ۱

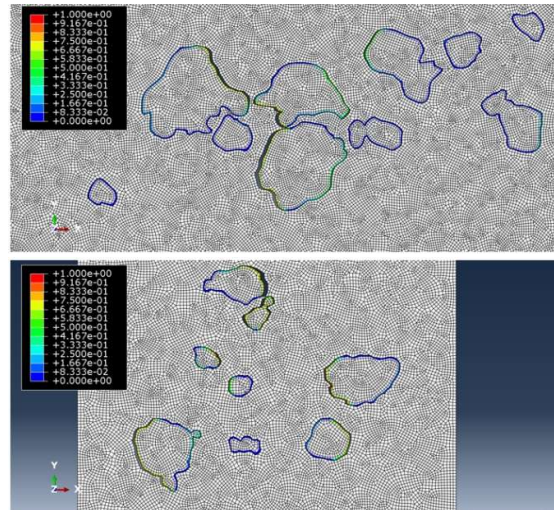
#### ۵- بحث و بررسی پیرامون نتایج

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل عکس های تصویر برداری شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی شروع آسیب، رشد و گسترش جدایش بسیار وابسته به نحوه توزیع ذرات و ریزساختارها است. توزیع تنش فون میس میزان سهولت تغییر شکل پلاستیک را بیان می کند. در شکل ۷ برای منطقه ۱، مشاهده می شود که مقادیر تنش فون میس در داخل منطقه خوشه ای

۷- مراجع

- [1] J. Nafar Dastgerdi, B. Anbarlooie, A. Miettinen, H. Hosseini-Toudeshky, and H. Remes, "Effects of particle clustering on the plastic deformation and damage initiation of particulate reinforced composite utilizing X-ray CT data and finite element modeling," *Compos. Part B Eng.*, vol. 153, no. June, pp. 57–69, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.07.027.
- [2] J. Nafar Dastgerdi, G. Marquis, S. Sankaranarayanan, and M. Gupta, "Fatigue crack growth behavior of amorphous particulate reinforced composites," *Compos. Struct.*, vol. 153, pp. 782–790, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.06.071.
- [3] M. Shakoor, M. Bernacki, and P.-O. Bouchard, "Ductile fracture of a metal matrix composite studied using 3D numerical modeling of void nucleation and coalescence," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 189, pp. 110–132, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.10.027.
- [4] A. Eckschlager, W. Han, and H. . Böhm, "A unit cell model for brittle fracture of particles embedded in a ductile matrix," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 25, no. 1–2, pp. 85–91, Sep. 2002, doi: 10.1016/S0927-0256(02)00252-5.
- [5] L. L. Mishnaevsky, "Automatic voxel-based generation of 3D microstructural FE models and its application to the damage analysis of composites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 407, no. 1–2, pp. 11–23, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.msea.2005.06.047.
- [6] Y. Wang, Z. Liu, N. Liu, L. Hu, Y. Wei, and J. Ou, "A new geometric modelling approach for 3D braided tubular composites base on Free Form Deformation," *Compos. Struct.*, vol. 136, pp. 75–85, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.09.036.
- [7] C. Balzani and W. Wagner, "An interface element for the simulation of delamination in unidirectional fiber-reinforced composite laminates," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 75, no. 9, pp. 2597–2615, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.engfracmech.2007.03.013.
- [8] X.-P. Xu and A. Needleman, "Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 42, no. 9, pp. 1397–1434, Sep. 1994, doi: 10.1016/0022-5096(94)90003-5.

تغییر شکل، تمرکز تنش بالاتر و همچنین تنش هیدرواستاتیکی بالاتر شروع و گسترش جدایش ذرات تقویت کننده از فاز زمینه در همین مناطق مشاهده می گردد. این نمودار با استفاده از شبیه سازی آسیب توسط رویکرد ناحیه چسبنده، جدایش ذرات تقویت کننده از فاز زمینه را نشان می دهد.



شکل ۹- بررسی معیار آسیب در سطح مشترک ذرات آمورف و فاز زمینه در دو منطقه انتخابی

۶- نتیجه گیری

برای گسترش استفاده از کامپوزیت‌های سبک پایه منیزیمی تقویت شده با ذرات آمورف، درک و بررسی رابطه بین ریزساختار با تغییر شکل و شروع گسترش آسیب یک امر مهم و ضروری است. در این پژوهش به معرفی و بررسی یک روش شبیه سازی میکروساختار با استفاده از مدل ناحیه چسبنده مبتنی بر المان محدود به منظور بررسی اثر تجمع ذرات آمورف بر روی تغییر شکل، شروع و گسترش آسیب پرداخته شده است. خواص مدل ناحیه چسبنده بر مبنای یک روش جدید مشخصه یابی معکوس بدست آمده است که تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. با توجه به نتایج بدست آمده در سطح مشترک ذرات تقویت کننده و فاز زمینه در مناطقی با تجمع خوشه ای ذرات تقویت کننده مقدار تنش هیدرواستاتیک کمینه و بیشینه مقدار است. همچنین با استفاده از تصویر برداری SEM و شبیه سازی مناطق با درجات مختلفی از تجمع ذرات تقویت کننده با نرم افزار المان محدود، استنباط می شود که تغییر شکل ماده زمینه به صورت محلی در مناطقی که تراکم ذرات آمورف وجود دارد محدود شده است که منجر به بالا رفتن احتمال جدایش ذرات از ماده زمینه در این نواحی می گردد. بنابراین در ساخت کامپوزیت ها رعایت مواردی در فرایند ساخت که منجر به توزیع نسبتا یکنواخت ذرات تقویت کننده در فاز زمینه می گردد بسیار حائز اهمیت است. اگرچه امکان توزیع کاملا یکنواخت ذرات تقویت کننده در ماده زمینه وجود ندارد اما می توان روش های ساخت را به نحوی تغییر داد که درجه خوشه ای شدن ذرات به صورت محلی کاهش یافته و نواحی بیشتر با درجه خوشه ای شدن کمتری در میکروساختار ماده ایجاد گردد.