

## واژه‌های کلیدی:

رزین اپوکسی،  
گرمانرم،  
چقرمگی،  
مورفولوژی،  
آمیزه

# مروری بر سامانه‌های اپوکسی-گرمانرم: دسته‌بندی جدیدی از مورفولوژی و تاثیر آن بر چقرمگی

شهرزاد مهدی‌زاده فرسنگی، مهرزاد مرتضایی\* و حسن فتاحی  
دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، پژوهشکده مهندسی  
کامپوزیت، گروه مهندسی پلیمر

## چکیده ...

رزین‌های اپوکسی به دلیل دارا بودن استحکام مکانیکی بالا، پایداری حرارتی مناسب و چسبندگی عالی، در صنایع مختلفی همچون هوافضا، خودروسازی و الکترونیک کاربرد گسترده‌ای دارند. با این حال، ماهیت شکننده‌ی آن‌ها محدودیت‌هایی را در برخی از کاربردهای مهندسی ایجاد کرده است. یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود چقرمگی این رزین‌ها، ترکیب آن‌ها با پلیمرهای گرمانرم و مهندسی مورفولوژی در سطح میکرو و نانو است.

این مقاله به بررسی تاثیر مورفولوژی‌های مختلف در آمیزه‌های اپوکسی-گرمانرم بر چقرمگی این سامانه‌ها پرداخته و دسته‌بندی جدیدی از مورفولوژی‌ها را ارائه می‌دهد. همچنین، روش‌های بهینه‌سازی مورفولوژی و چالش‌های موجود در این حوزه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت، مسیرهای پژوهشی آینده برای توسعه‌ی سامانه‌های اپوکسی-گرمانرم با چقرمگی بهینه پیشنهاد شده‌اند.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Mhmorteza@gmail.com

## ۱ مقدمه

رزین‌های اپوکسی به دلیل خواص برجسته‌ای همچون استحکام مکانیکی بالا، چسبندگی عالی و پایداری حرارتی مناسب، به عنوان یکی از پرکاربردترین پلیمرهای گرماسخت در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، صنایع الکترونیک و ... شناخته می‌شوند [۱، ۲]. با این حال، این رزین‌ها به دلیل ماهیت شکننده خود و مقاومت پایین در برابر ضربه و شکست [۳]، در کاربردهایی که به چقرمگی بالا نیاز دارند، با محدودیت‌هایی مواجه هستند. از این رو، اصلاح خواص این مواد با استفاده از افزودنی‌های مختلف [۴-۶]، همواره مورد توجه پژوهشگران و مهندسان بوده است.

یکی از روش‌های کارآمد برای بهبود چقرمگی رزین‌های اپوکسی، افزودن گرمانرم‌ها به این سامانه‌ها است [۷، ۸]. مطابق با بررسی‌ها، با وجود خواص مطلوب گرمانرم‌ها و افزودن آن‌ها به رزین اپوکسی، در برخی موارد خواص به دست آمده کمتر از حد انتظار بوده است که این مشکل ریشه در مورفولوژی سامانه دارد [۹]. گرمانرم‌ها می‌توانند از طریق ایجاد تغییرات مورفولوژی در رزین اپوکسی، با توجه به نوع، مقدار و نحوه توزیع گرمانرم‌ها و شرایط فرایندی سامانه، بهبود قابل توجهی در خواص نهایی، به ویژه چقرمگی، ایجاد کنند [۱۰].

این مقاله با هدف بررسی نقش مهندسی مورفولوژی گرمانرم در بهبود چقرمگی رزین اپوکسی تدوین شده است. در این راستا، مورفولوژی برای افزایش چقرمگی به سه دسته جدید (آلیاژ و آمیزه با مورفولوژی تک فاز یا جدایی فازی تنظیم شده، چندسازه با مورفولوژی سطح مشترک و چندسازه (Composite) با مورفولوژی فاز مشترک) طبقه‌بندی شده و تأثیر نوع مورفولوژی گرمانرم بر چقرمگی مورد مطالعه قرار گرفته است. این بررسی می‌تواند زمینه‌ساز بهبود طراحی مواد چندسازه‌ای و چسب فیلمی با عملکرد بهتر برای کاربردهای گسترده صنعتی باشد.

## ۲ اهمیت چقرمگی در رزین‌های اپوکسی

رزین‌های اپوکسی به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای مانند استحکام مکانیکی بالا، چسبندگی عالی، مقاومت شیمیایی و پایداری ابعادی مطلوب، در صنایع مختلف از جمله هوافضا و خودروسازی کاربرد گسترده‌ای دارند [۱۱]. همچنین، این رزین‌ها به عنوان زمینه در چندسازه‌های سازه‌ای و چسب‌های فیلمی استفاده می‌شوند [۱۱، ۱۲]. برای جبران نقص در چقرمگی اپوکسی‌ها، هر دو روش چقرمه‌کنندگی همگن و ناهمگن اپوکسی‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. به طور کلی، وارد کردن فاز دوم به زمینه اپوکسی، روشی موثر برای بهبود چقرمگی

اپوکسی‌های پخت شده در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

## ۳ نقش گرمانرم‌ها در بهبود چقرمگی

در شکل ۱ نمایشی از سازوکار افزایش استحکام و چقرمگی پلیمرها با توجه به انواع افزودنی‌ها، برای درک بهتر مطلب آمده است. درک این سازوکارها از اهمیت بالایی برخوردار است. تصویر ارائه شده، این دو دسته سازوکار را در ناحیه ترک مواد پلیمری به تصویر می‌کشد. سازوکارهای چقرمگی که به افزایش توانایی مواد در تحمل شکست کمک می‌کنند، شامل موارد زیر است:

لیف‌ها (Filaments) در هنگام شکست که موجب جذب انرژی می‌شود (Pull out)،

پل‌سازی ترک‌ها که باعث توزیع بهتر تنش و مقاومت در برابر شکست می‌شود (Crack Bridging)،

اصطکاک بین پرکننده‌ها که مانع حرکت ترک‌ها می‌شود (Fric-tion Between Fillers)،

ایجاد ترک‌های میکروسکوپی که مرحله‌ای برای توزیع بار و جذب انرژی شکست هستند (Microcracking)،

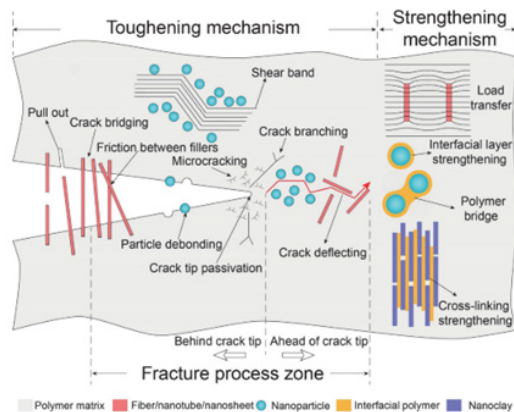
جدا شدن ذراتی که به توزیع بهتر تنش کمک می‌کند (Particle Debonding)،

غیرفعال شدن نوک ترک که از گسترش آن جلوگیری می‌کند (Crack Tip Passivation)،

انشعاب ترک‌ها که مسیرهای گسترش آن را پیچیده‌تر می‌کند (Crack Branching).

سازوکارهای استحکام بخشی به مقاومت مواد کمک می‌کنند و شامل این موارد می‌باشد:

میان اجزاء مختلف برای بهبود قدرت مواد بار را انتقال می‌دهد (Load Transfer)،



شکل ۱) نمودار نمایش سازوکار استحکام بخشی و چقرمگی زمینه پلیمری [۱۴].

آسیب، انتشار و جذب انرژی موضوع بسیار مهمی است [۲۰]. به طور کلی، آسیب یک قطعه، به شدت به مورفولوژی بستگی دارد و مورفولوژی ذرات نیز به نوع اختلاط و در نتیجه نوع پراکندگی و توزیع ذرات در زمینه بستگی دارد [۲۱].

هنگامی که دو یا چند ماده پلیمری با هم مخلوط می‌شوند، به دلیل تفاوت در ماهیت این مواد بسته به عواملی مانند ترکیب درصد، دما و فشار، جدایی فازی رخ داده و تنظیم می‌شود. جدایی فاز نیز منجر به ایجاد مورفولوژی می‌شود [۲۲]. بسته به نوع مواد، شرایط فرایندی (محلولی و مذاب) و عوامل فرایندی (دما، سرعت و فشار) مورفولوژی‌های متفاوتی ایجاد می‌شود. سامانه ایجاد شده از چندسازه تا آلیاژ متناسب با شکل ۲ اتفاق می‌افتد.

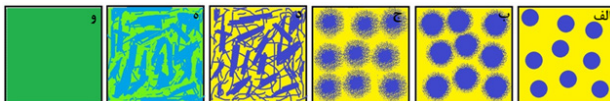
شکل ۲ الف، سامانه چندسازه‌ای زمانی اتفاق خواهد افتاد که، شرایط فرایندی به گونه‌ای باشد که ذرات گرماترم با زمینه اپوکسی اتصال سطح دارند و نفوذی رخ نداده است (دمای محیط و زمان کم). شکل ۲ ب و ج، سامانه چندسازه‌ای با فاز میانی کم زمانی اتفاق خواهد افتاد که شرایط فرایندی به گونه‌ای اعمال شده است که فقط مقدار کمی از اپوکسی در ذرات گرماترم نفوذ کرده است (دمای محیط و زمان زیاد یا دمای نزدیک به  $T_g$  یا بالاتر و زمان متوسط). شکل ۲ د، سامانه مخلوط امتزاج‌ناپذیر زمانی است که اپوکسی کاملاً در بخش بی‌نظم گرماترم نیمه‌بلوری نفوذ کرده است، اما در بین بلورها نفوذ نکرده است. شکل ۲ ه، سامانه مخلوط امتزاج‌پذیر زمانی است که علاوه بر نفوذ اپوکسی در بخش بی‌نظم پلی‌آمید، اپوکسی در بین بلورها نیز کاملاً نفوذ کرده است. شکل ۲ و سامانه آلیاژی زمانی است که اختلاط محلولی بوده است و یا اختلاط مکانیکی با دمای بالای ذوب صورت گرفته است.

در این پژوهش، سه نوع مورفولوژی مورد بررسی قرار خواهد گرفت:

الف) مورفولوژی سطح مشترک در چندسازه،

ب) مورفولوژی فاز مشترک در چندسازه،

ج) مورفولوژی تک‌فاز یا جدایی فازی تنظیم شده در آلیاژ و آمیزه. با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد تأثیر زمان و دما، می‌توان با تنظیم این دو متغیر در دو شرایط فرایندی اصلی، یعنی:



شکل ۲) سامانه چندسازه‌ای با اتصال سطحی، (ب) سامانه چندسازه‌ای با فاز میانی، (ج) سامانه چندسازه‌ای با فاز میانی عمیق، (د) سامانه مخلوط امتزاج‌ناپذیر، (ه) سامانه مخلوط امتزاج‌پذیر که از فاز غنی از اپوکسی و غنی از پلی‌آمید تشکیل شده است. (و) سامانه آلیاژی.

تقویت لایه‌های مرزی بین اجزاء که باعث جلوگیری از شکست می‌شود (Interfacial Layer Strengthening)،

پل‌های پلیمری که می‌توانند بارهای بیشتری را تحمل کنند (Polymer Bridge)،

پیوندهای عرضی که به سخت‌تر شدن و بهبود مقاومت مواد کمک می‌کنند (Cross-Linking Strengthening).

همچنین در این شکل ناحیه فرآیند شکست (Fracture Process Zone) به دو بخش "قبل" و "بعد" از نوک ترک تقسیم می‌شود و نشان‌دهنده رفتار ترک در منطقه‌ای است که فرآیند شکست در آن اتفاق می‌افتد. در مجموع، درک این سازوکارها به پژوهشگران و مهندسان کمک می‌کند تا با استفاده از ترکیبات مختلف، خواص مکانیکی مواد پلیمری را بهینه‌سازی کنند و توانایی آن‌ها را در برابر شکست افزایش دهند.

بسته به وضعیت مکانیکی نوک ترک، چقرمگی شکست چندسازه‌های اپوکسی اصلاح شده توسط چقرمه‌کننده‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. پلیمرهای لاستیکی [۱۵، ۱۶] یا گرماترم [۱۷، ۱۸] افزوده شده به زمینه اپوکسی، با سازوکارهای اتلاف انرژی در جلوی نوک ترک و پشت نوک ترک (با توجه به نوع مورفولوژی)، سبب افزایش چقرمگی شکست چندسازه می‌شوند. با این حال، گرماترم‌ها علاوه بر تنوع وسیع‌تری از سازوکارهای چقرمگی، مانند: (۱) پین کردن ترک (Crack Pinning)، (۲) پل زدن بین ذرات (Particle Bridging)، (۳) رشد حباب پلاستیک (Plastic Void Growth)، (۴) انحراف مسیر ترک (Crack Path Deflection) [۱]، (۵) تسلیم ذرات (Particle Yielding)، (۶) ایجاد ریزترک (Microcracking) [۱۹] و (۷) تغییر شکل پلاستیک و ... چقرمگی شکست اپوکسی‌ها را بدون تأثیر قابل توجهی بر سایر خواص مکانیکی، افزایش می‌دهند. بنابراین، اصلاح خواص رزین اپوکسی با استفاده از افزودنی‌های مختلف، به ویژه گرماترم‌ها، به‌عنوان راهکاری مؤثر مطرح شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن گرماترم‌ها به زمینه اپوکسی می‌تواند به طور قابل توجهی چقرمگی و مقاومت به ضربه این مواد را افزایش دهد. نوع، مقدار و نحوه توزیع گرماترم‌ها در زمینه اپوکسی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر خواص نهایی محسوب می‌شوند.

#### ۴. انواع سامانه‌های مورفولوژی

مورفولوژی می‌تواند بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی مانند استحکام، چقرمگی، انعطاف‌پذیری، سفتی، مقاومت در برابر خوردگی، رفتار در دماهای بالا/پایین و مقاومت در برابر سایش تأثیر بگذارد. در سازوکارهای چقرمگی چندسازه‌ها، شروع

همچنین در مطالعات اخیر، ماتیس و همکارانش [۲۶] روشی را برای تنظیم مورفولوژی نهایی سامانه گرماسخت/گرمانرم پیشنهاد کرده‌اند. این روش مبتنی بر ترکیب رویکردهای مختلف با توجه به میل ترکیبی است که با عوامل حلالیت ( $\chi$ )، گرانیوی سامانه‌ها، سینتیک پخت اپوکسی و تعیین نقطه ژل مشخص می‌شود.

در این مورد، جدایی فاز به صورت تنظیم شده و با استفاده از فرآیندهای حلالی یا مذاب انجام می‌شود. این نوع مورفولوژی می‌تواند به بهبود چقرمگی کمک کند. مطالعات نشان داده‌اند که جدایی فاز به صورت اسپینودال یا هسته‌گذاری و رشد می‌تواند به افزایش چقرمگی منجر شود.

لازم به ذکر است که علاوه بر تاثیر نوع مورفولوژی ایجاد شده در این سامانه، ماهیت مورفولوژی نیز بر خواص و چقرمگی تأثیرگذار است. با توجه به نوع گرمانرم، رزین و تمایل این دو به یکدیگر (بر اساس عوامل حلالیت)، پس از ایجاد جدایی فاز در سامانه، دو فاز غنی از رزین و غنی از گرمانرم تشکیل می‌شود. میزان رزین در فاز غنی از گرمانرم و میزان گرمانرم در فاز غنی از رزین و همچنین برهم‌کنش این دو در فازهای ایجاد شده، بر خواص نهایی بسیار مؤثر است.

با توجه به این موضوع، در پژوهش بروکر و همکارانش، برای تشخیص میزان اپوکسی در فاز پلی‌آمید، تصاویر AFM با استفاده از تجزیه و تحلیل در نرم افزار Global Lab Image ۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این نرم افزار درصد مساحت تصویر متعلق به هر فاز را با توجه به رنگ آن محاسبه می‌کند و کسر مساحت فاز برابر با کسر حجمی آن فاز در نظر گرفته می‌شود [۱۸].

زمانی که سامانه‌ی آلیاژ و آمیزه با مورفولوژی تک‌فاز یا جدایی فاز تنظیم شده وجود دارد، با توجه به نوع سامانه و ایجاد بلورها در مقیاس نانومتری، ترک رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد. انتظار می‌رود در این پژوهش، با بررسی مورفولوژی گرمانرم، بتوان به خواص مکانیکی مطلوب، به‌ویژه چقرمگی مورد نظر دست یافت و دلیل افزایش چقرمگی را با توجه به سازوکارهای چقرمگی متفاوت، تحلیل و بررسی نمود.

ب) چندسازه با مورفولوژی سطح مشترک: چندسازه با مورفولوژی سطح مشترک زمانی ایجاد می‌شود که گرمانرم در شکل‌های مختلفی مانند ذرات استوانه‌ای، کروی و ... به اپوکسی اضافه می‌شود و در سطح مشترک این ذرات با رزین با توجه به ساختار آن پیوندهای مختلف فیزیکی، هیدروژنی و اشتراکی برقرار می‌شود. ایجاد این پیوندها به نوع مواد، دما و زمان پخت بستگی دارد. گرمانرم پلی‌آمید به صورت الیاف [۲۷، ۲۸]، نانوالیاف [۲۹] و ذرات پودری [۳۰، ۳۱] در اندازه ریز به رزین اپوکسی افزوده می‌شود. این ذرات سبب افزایش چقرمگی

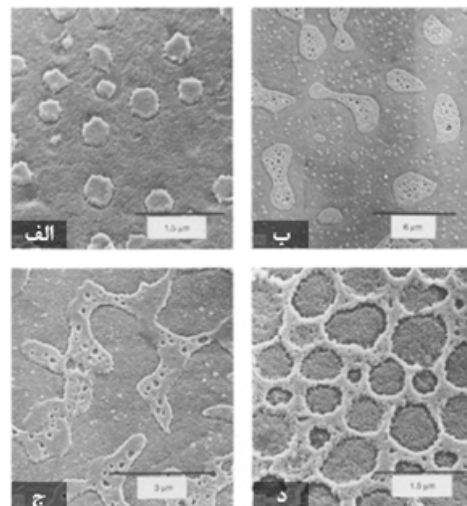
(۱) شرایط فرایندی اختلاط،

(۲) شرایط فرایندی پخت،

به مورفولوژی مورد نظر دست یافت.

در ادامه، به تشریح این سه نوع مورفولوژی پرداخته شده است: الف) مورفولوژی تک‌فاز یا جدایی فاز تنظیم شده در آلیاژ و آمیزه: آلیاژ و آمیزه با مورفولوژی تک‌فاز یا جدایی فاز تنظیم شده زمانی ایجاد می‌شود که فرایند به صورت حلالی انجام شده باشد یا فرایند مذاب در دمایی بالاتر از دمای ذوب مواد پلیمری صورت گرفته باشد. انحلال و جدایی فازها با سه متغیر درجه حرارت، فشار و غلظت تنظیم می‌شوند. جدایی فاز به دو صورت جدایی فاز اسپینودال (Spinodal Decomposition) و هسته‌گذاری و رشد رخ می‌دهد. جدایی فاز در حالت اسپینودال به صورت به هم پیوسته (Co-continuous) است، در حالی که در حالت هسته‌گذاری و رشد به صورت قطره-زمینه ظاهر می‌شود که حالت دوم بیشتر به افزایش چقرمگی کمک می‌کند.

ایجاد و تنظیم مورفولوژی‌های متفاوت در سامانه‌های گرماسخت/گرمانرم [۹، ۲۳، ۲۴] در مقالات متعدد نشان داده شده است (شکل ۳). به عنوان مثال، در سامانه اپوکسی/پلی‌آمید دو فاز غنی از رزین اپوکسی و غنی از پلی‌آمید [۱۸] یا حتی سه فاز شامل پلی‌آمید بلوری، فاز اپوکسی/پلی‌آمید شبکه‌ای و فاز اپوکسی با پیوند عرضی [۲۵] وجود دارد و این چند فاز بودن سبب افزایش چقرمگی شده است.

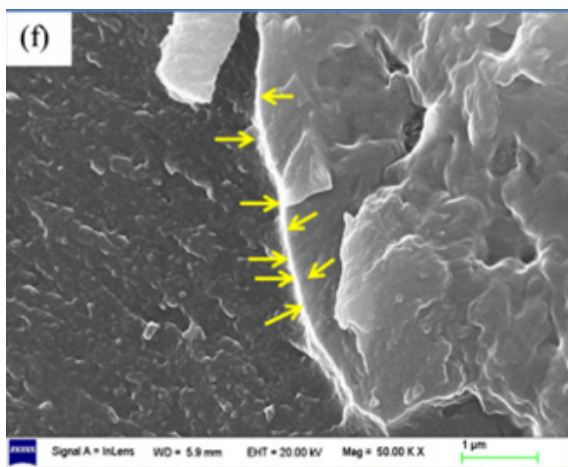


شکل ۳) ریزساختارهای سامانه تک جزئی اپوکسی: (الف) ریزساختار ذرات فاز دوم ذرات غنی از گرمانرم در ماتریس غنی از اپوکسی پیوسته. (ب) ریزساختارهای ذرات معلق و پیوسته. (ج) ریزساختار پیوسته که در آن هر دو فاز غنی از گرمانرم و غنی از اپوکسی ماهیت پیوسته دارند. (د) فاز دوم ریزساختار معکوس، فاز ذرات غنی از اپوکسی در فاز پیوسته زمینه غنی از گرمانرم [۲۴].

زمینه به ذره برخورد کند، برگردد و به ذره دیگری برخورد کند تا انرژی اش تلف شود. (۳) ترک از زمینه به ذره برخورد کند و ذره را دور بزند و برگردد یا انرژی اش تلف شود. (۴) ترک از زمینه به ذره برخورد کند و وارد ذره شود. (۵) ترک از زمینه به ذره برخورد کند و به ریزترک‌ها تبدیل شود. (۶) ترک به ذره برخورد کند و سبب تغییر شکل ذره شود. (۷) ترک به ذره برخورد کند و ذره را هل دهد و انرژی اش تلف شود و ...

چندسازه با مورفولوژی فاز مشترک: مورفولوژی فاز مشترک زمانی ایجاد می‌شود که دو ماده، با توجه به ساختار و شرایط فرایندی، در هم نفوذ کنند. هنگامی که یک گرماترم و رزین در کنار هم قرار می‌گیرند، به دلیل غلظت و وزن مولکولی متفاوتی که دارند، گرماترم به دلیل غلظت بیشتر تمایل به نفوذ در رزین دارد و رزین نیز به دلیل وزن مولکولی کم، تمایل به نفوذ در حجم آزاد زنجیره‌های گرماترم دارد. با توجه به ماهیت مواد، دما و زمان فرایند و پخت، میزان نفوذ، اندازه و ایجاد پیوندهای فیزیکی، هیدروژنی و اشتراکی در فاز مشترک و ارتباط آن با خواص نهایی تعیین می‌شود.

در هنگام نفوذ رزین به گرماترم، این گرماترم متورم می‌شود. نمودار تورم یک پلیمر در مقابل حلال یا پلیمر دیگر از دو بخش سینتیکی و ترمودینامیکی تشکیل شده است. بخش سینتیکی شامل سرعت نفوذ نفوذکننده‌ها به درون پلیمر است و توسط شیب بخش خطی نمودار تورم تا ۵۰ درصد از حالت تعادل مشخص می‌شود. بخش ترمودینامیکی نیز شامل بخش خطی نمودار تورم در حالت تعادل است و توسط شاخصی ترمودینامیکی به نام شاخص حلالیت پلیمر-حلال یا پلیمر-پلیمر ( $\chi$ ) شناخته می‌شود. این موارد کاملاً به ساختار رزین و



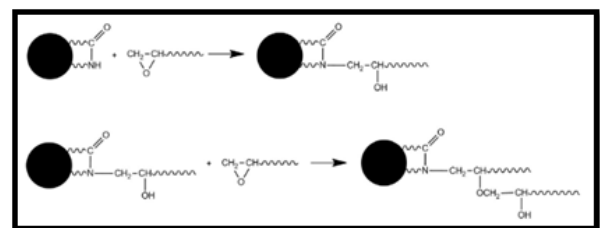
شکل ۵) در این تصویر پیکان‌ها به سطح مشترک PA و زمینه EP/PES اشاره می‌کنند [۳۰].

اپوکسی می‌شوند. در پژوهش لیو و بیلرگی، زمانی که ذرات کروی در اندازه حدود ۲۰ میکرومتر و مقدار ۱۰ الی ۲۰ phr به صورت اختلاط مکانیکی به رزین اپوکسی افزوده می‌شود [۳۰، ۳۱] و چندسازه اپوکسی و پلی‌آمید را تشکیل می‌دهد، چقرمگی افزایش می‌یابد. مشاهده شده است هرچه پیوند بین سطح دو ماده بیشتر باشد، چقرمگی افزایش می‌یابد. در پژوهش لیو [۳۰]، پیوند شیمیایی و واکنش‌های احتمالی بین پلی‌آمید و زمینه اپوکسی که در سطح دایره‌ای ریزذرات پلی‌آمید وجود دارد، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. واکنش‌های باز کردن حلقه بین گروه‌های اپوکسی و گروه‌های آمید پلی‌آمید رخ داده‌است که منجر به گیر انداختن ریزذرات پلی‌آمید در شبکه اپوکسی شده است.

بنابراین، در هنگام پساپخت چندسازه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (نزدیک به پیک گرما ذوب در منحنی DSC ترکیب پلی‌آمید و زمینه اپوکسی)، می‌توان پیوند سطحی قوی بین پلی‌آمید و زمینه اپوکسی ایجاد کرد. همچنین با بررسی تصویر شکست با آزمون SEM مشاهده شده‌است (شکل ۵) که هیچ فاصله‌ای بین ذرات پلی‌آمید با اپوکسی وجود ندارد و این ذرات به هم چسبیده‌اند که با توجه به شرایط فرایندی به دو دلیل پیوند هیدروژنی و اشتراکی میان اپوکسی و پلی‌آمید بوده است. همین موضوع دلیل مفید بودن ذرات پلی‌آمید برای افزایش چقرمگی است.

در این حالت از مورفولوژی، گرماترم‌ها به شکل ذرات مختلف به اپوکسی اضافه می‌شوند و پیوندهای فیزیکی و شیمیایی بین آن‌ها و رزین ایجاد می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که هرچه پیوند بین سطح دو ماده بیشتر باشد، چقرمگی به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند [۳۰].

زمانی که سامانه چندسازه‌ای با اتصال سطحی وجود دارد، با توجه به برهمکنش‌هایی که میان زمینه اپوکسی و ذرات گرماترم است ترک می‌تواند حالت‌های مختلفی داشته باشد. (۱) ترک از زمینه به ذره برخورد کند و برگردد و انرژی اش تلف شود. (۲) ترک از



شکل ۴) واکنش‌های سطحی احتمالی بین ریزذرات پلی‌آمید و زمینه اپوکسی [۳۰]

گرمانرم بستگی دارد. هرچه تمایل این دو ماده به هم بیشتر باشد، میزان نفوذ نیز بیشتر خواهد بود.

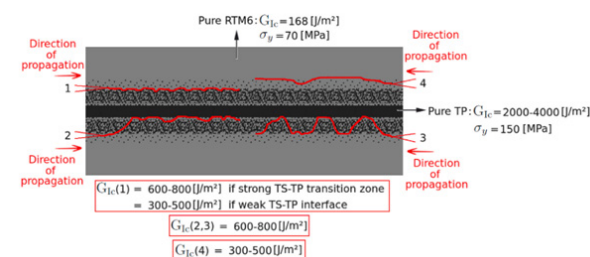
در پژوهش ولپه و همکارانش [۳۲] ترکیب (Assembling) مخلوط گرمانرم‌ها با گرماسخت‌ها از طریق نفوذ میانی تنظیم شده با پلی‌اترایمید (PEI) و اپوکسی RTM6 بررسی شده است. منشاء اصلی مقاومت در برابر ترک، با تجزیه و تحلیل مسیر ترک در رابطه با مورفولوژی و شکست در فاز میانی مشخص شده است. ترک در داخل یک گرادیان مورفولوژیکی شامل غلظت نسبتاً کم PEI به دام افتاده است. آن‌چه در شکل ۶ ارائه شده است تمام مسیر ترک موجود در ناحیه بین انتشار را نشان می‌دهد.

شکل ۶ حالت مختلف انتشار ترک بسته به این‌که فاز میانی رفتار چقرمه یا شکننده‌ای از خود نشان می‌دهد [۳۲].

در پژوهش ولپه [۳۲] و همکارانش در شکل ۶ توزیع چقرمگی شکست (GIC) و تنش تسلیم ( $\sigma_y$ ) فاز میانی دو ماده RTM6 و PEI، نشان داده شده است. در این ناحیه، سه بخش متمایز قابل شناسایی است: ناحیه غنی از RTM6، ناحیه انتقال هم‌پیوسته و ناحیه غنی از PEI. بررسی نمودار نشان می‌دهد ترک زمانی که در ناحیه غنی از گرمانرم (PEI) منتشر می‌شود، در معرض دو مانع عمده قرار می‌گیرد: چقرمگی شکست بالا در ناحیه غنی از PEI و تنش تسلیم کمتر در ناحیه انتقالی.

چقرمگی شکست بالا در ناحیه غنی از PEI: این ویژگی مانع از عبور ترک از PEI خالص می‌شود، زیرا انرژی مورد نیاز برای انتشار ترک در این ناحیه به شدت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نزدیک شدن ترک به این مرز باعث ایجاد تغییر جهت در مسیر رشد آن می‌شود، که مؤلفه‌ای از نوع شکست حالت II را معرفی می‌کند. این مسئله به افزایش مقاومت در برابر انتشار ترک کمک کرده و پیشروی ترک را کاهش می‌دهد.

تنش تسلیم کمتر در ناحیه انتقالی: فاز میانی دو ماده RTM6 و PEI دارای یک تنش تسلیم حداقل است که می‌تواند به‌عنوان نقطه‌ای برای به دام افتادن ترک عمل کند. این ناحیه دارای یک ساختار هم‌پیوسته است که در آن تغییرات تدریجی در ترکیب،

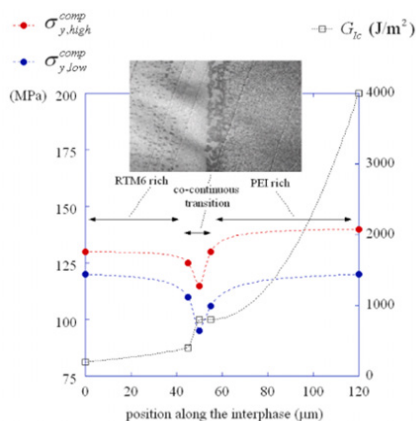


شکل ۶ نمودار تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی.

باعث توزیع متفاوتی از خواص مکانیکی می‌شود. از سوی دیگر، ترک نمی‌تواند از ناحیه انتقالی به سمت ناحیه غنی از RTM6 نیز عبور کند، زیرا در این ناحیه استحکام و تنش تسلیم اطراف بالاتر است. در نتیجه، مسیر رشد ترک محدود شده و به‌جای انتشار مستقیم، ترک درون ناحیه میانی به دام می‌افتد.

این رفتار مکانیکی به طور مستقیم تأثیر ترکیب‌بندی میکروسکوپی و توزیع تنش را نشان می‌دهد و درک عمیق‌تری از چقرمگی شکست در سامانه‌های چندفازی ارائه می‌دهد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این نوع مورفولوژی فاز مشترک [۳۳] می‌تواند سبب به‌دام‌انداختن ترک‌ها و افزایش چقرمگی شود. نتایج تحقیقات مختلف هنگام بررسی انواع مورفولوژی در رزین اپوکسی نشان می‌دهد که مهندسی مورفولوژی گرمانرم‌ها در رزین اپوکسی می‌تواند به‌طور مؤثری چقرمگی آن‌ها را بهبود بخشد. تنظیم دقیق نوع و توزیع گرمانرم‌ها در ماتریس اپوکسی می‌تواند به طراحی مواد جدید با عملکرد بهتر برای کاربردهای صنعتی منجر شود. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی ترکیب‌های اپوکسی و گرمانرم و همچنین توسعه مواد چندسازه‌ای با خواص بهبودیافته مورد استفاده قرار گیرد.

زمانی که سامانه چندسازه‌ای با فاز میانی وجود دارد، با توجه به برهمکنش‌هایی که میان زمینه اپوکسی و ذرات پلی‌آمید است ترک می‌تواند حالت‌های مختلفی داشته باشد. (۱) ترک از زمینه به فاز میانی برخورد کند و وارد فاز میانی شود، در فاز میانی دور بزند تا انرژی اش تلف شود. (۲) ترک از زمینه به فاز میانی برخورد کند و وارد فاز میانی شود، به قسمت پلی‌آمید برخورد



شکل ۷ تحلیل نیمه‌کمی گرادیان مورفولوژیکی فاز میانی در چندسازه

RTM6-PEI: نقش نرخ آزادسازی انرژی بحرانی و تنش تسلیم در

سازوکار به‌دام‌اندازی ترک و افزایش چقرمگی فاز میانی [۳۳].

چقرمگی موثر هستند. این سازوکارها نشان‌دهنده عملکرد بهتر مواد تحت بارگذاری‌های مختلف هستند. نتایج نشان داد که تغییرات در مورفولوژی تأثیر مستقیم بر خواص مکانیکی و فیزیکی آمیزه‌های اپوکسی و گرمانرم دارد. ایجاد فازهای جداگانه یا همگن در مواد منجر به تغییر در رفتار شکست و چقرمگی شده است. همچنین یافته‌ها حاکی از پایداری مکانیکی بالای این ترکیبات در شرایط مختلف بارگذاری و محیطی است که می‌تواند آن‌ها را به انتخاب مناسبی برای کاربردهای صنعتی تبدیل کند. این یافته‌ها مبنای علمی جدیدی را برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی و توسعه مواد چندسازه‌ای با خواص بهبودیافته مهیا می‌سازد و امید می‌رود که به کاربردهای وسیع‌تری در صنایع مختلف منجر شود.

سازوکارهای مؤثر در بهبود چقرمگی رزین‌های اپوکسی با افزودن گرمانرم‌ها به شرح زیر است:

گرمانرم‌ها به عنوان پل‌هایی عمل می‌کنند که بین فازهای اپوکسی و گرمانرم اتصال ایجاد می‌کنند. این پل‌ها موجب کاهش بار و بهبود توزیع تنش در نقاط ضعف مواد می‌شوند، که به نوبه خود چقرمگی را افزایش می‌دهد. هرچه پیوند میان گرمانرم و رزین اپوکسی محکم‌تر باشد، پل‌زنی ترک بیشتر است.

ترکیب اپوکسی-گرمانرم می‌تواند سرعت تشکیل و گسترش ترک‌ها را کاهش دهد. گرمانرم‌ها با تغییر مسیر ترک و کاهش انرژی مورد نیاز برای شکست به ویژه در سطح مشترک قوی ایجاد شده گرمانرم و رزین در چندسازه با مورفولوژی سطح مشترک و در فاز میانی ایجاد شده مابین گرمانرم و رزین در چندسازه با مورفولوژی فاز مشترک، پایداری و افزایش مسیر ترک را در حین بارگذاری فراهم می‌کنند.

مهندسی مورفولوژی گرمانرم‌ها منجر به ایجاد ساختارهای میکروسکوپی خاصی می‌شود که می‌تواند به بهبود تعاملات میان مولکولی در مواد کمک کند. این تغییر در ساختار میکروسکوپی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی کلی منجر شود. سبب افزایش سازوکارهای جلوگیری از رشد ترک و کاهش انرژی ترک شود. گرمانرم‌ها می‌توانند به جذب و پخش انرژی ضربه‌ای کمک کنند که این امر منجر به افزایش چقرمگی و کاهش تجمع تنش در نواحی آسیب‌پذیر خواهد شد. وجود فازهای گرمانرم موجب توزیع یکنواخت بار در سطح ماده می‌شود. این توزیع بهتر بار می‌تواند به کاهش نقاط ضعف مکانیکی و افزایش طول عمر خدماتی مواد کمک کند.

این سازوکارها به‌طور مشترک اثرات مثبتی بر خواص مکانیکی و چقرمگی ترکیب‌های اپوکسی-گرمانرم دارند و می‌تواند به بهینه‌سازی و توسعه مواد چندسازه‌ای با عملکرد بهتر منجر شوند.

کند و برگردد. ۳) ترک از زمینه به فاز میانی برخورد کند و وارد فاز میانی شود، به قسمت پلی‌آمید برخورد کند و وارد شود. ۴) ترک از زمینه به فاز میانی برخورد کند و وارد فاز میانی شود، به ریزترک‌ها تبدیل شود. ۵) ترک از زمینه به فاز میانی برخورد کند و وارد فاز میانی شود، به پلی‌آمید برخورد کند و سبب تغییر شکل آن شود و ...

## ۵ بررسی دامنه کاربرد و سازوکار اثربخش

این مقاله چندین قابلیت منحصر به فرد را در بر می‌گیرد که آن را از سایر پژوهش‌ها متمایز می‌کند. مقاله به بررسی همزمان تأثیر گرمانرم‌ها و مهندسی مورفولوژی بر چقرمگی رزین‌های اپوکسی به صورت تجربی می‌پردازد و این دو زمینه را به طور نوآورانه‌ای ترکیب می‌کند. این تلفیق انواع مورفولوژی می‌تواند به درک بهتری از رفتار مواد و تأثیر آن بر خواص، کمک کند. همچنین با استفاده از روش‌های پیشرفته، به تحلیل تأثیر تغییرات در مورفولوژی گرمانرم‌ها بر خواص نهایی اپوکسی می‌پردازد. این تحلیل عمیق به شناسایی روابط پیچیده بین ساختار و عملکرد کمک می‌کند. به بررسی و شناسایی سازوکارهای مختلف چقرمگی ناشی از افزودن گرمانرم‌ها می‌پردازد. تفکیک و ارزیابی این سازوکارها به عمق درک ما از چگونگی عملکرد اپوکسی‌های تقویت شده می‌انجامد. قابلیت‌های بهبود یافته که از این تحقیق حاصل می‌شود، می‌تواند به طور مستقیم در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و الکترونیک اعمال شود. بررسی اثرات عملی و کاربردی این مواد در زمینه‌های صنعتی مختلف، مقاله را به منبعی ارزشمند تبدیل می‌کند. تحقیق حاضر به بررسی کاربرد گرمانرم‌های خاص و روش‌های مهندسی مورفولوژی در راستای بهبود خواص اپوکسی می‌پردازد. این نوآوری‌ها می‌تواند به طراحی و توسعه مواد چندسازه‌ای جدید با عملکرد بهتر منجر شود. و به‌عنوان مبنای علمی برای پژوهش‌های بعدی در زمینه بهینه‌سازی ترکیبات اپوکسی و گرمانرم و همچنین توسعه مواد چندسازه‌ای با عملکرد بهینه‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

یافته‌ها و نتایج نشان‌دهنده افزایش چقرمگی رزین‌های اپوکسی با افزودن گرمانرم‌ها است. این بهبود به ویژه در نمونه‌هایی با مورفولوژی بهینه و توزیع مناسب گرمانرم‌ها مشاهده شده است. نوع و خواص گرمانرم مورد استفاده تأثیر مستقیم بر خواص نهایی آمیزه‌ها دارد. گرمانرم‌های با انعطاف‌پذیری بالا و استحکام مکانیکی مناسب، بهبود بیشتری در چقرمگی ترکیبات ایجاد کرده‌اند. بررسی‌ها حاکی از آن است که سازوکارهای مختلفی همچون پل‌زدن بین فازها و پین‌کردن ترک‌ها در افزایش

آمیزه اپوکسی و گرمانرم به وضوح دامنه کاربرد گسترده‌ای دارد. استفاده از آمیزه‌های اپوکسی-گرمانرم به دلیل خواص مکانیکی برتر و وزن سبک می‌تواند به توسعه اجزای داخلی هواپیماها و فضاپیماها کمک کند. در تولید قطعات خودرو، این ترکیبات می‌توانند به افزایش ایمنی و پایداری در برابر ضربه‌ها و آسیب‌ها کمک کنند و در نتیجه عملکرد کلی خودرو را بهبود بخشند. به‌کارگیری این آمیزه‌ها در تولید مواد عایق و پوشش‌های محافظ الکترونیکی می‌تواند به افزایش عملکرد و دوام دستگاه‌های الکترونیکی کمک کند. آمیزه‌های اپوکسی-گرمانرم می‌توانند در تولید چندسازه‌های ساختاری مورد استفاده قرار گیرند، به‌ویژه در شرایطی که مزایای سبکی و دوام مهم است. این دامنه کاربرد گسترده نشان می‌دهد که پژوهش در مورد آمیزه‌های اپوکسی و گرمانرم می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر فناوری‌های مختلف و بهینه‌سازی عملکرد مواد در صنایع گوناگون داشته باشد.

افق‌های آینده توسعه و تحقیق در زمینه تحقیقات بیشتر در مهندسی مورفولوژی و نیاز به توسعه روش‌های جدید برای بهینه‌سازی ساختار میکروسکوپی و ماکروسکوپی آمیزه‌های اپوکسی و گرمانرم است که می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و عملکرد این مواد منجر شود. تلاش برای ایجاد آمیزه‌های اپوکسی-گرمانرم با هدف توسعه ترکیبات پایدارتر، ویژگی‌های محیطی و بیولوژیکی بهتر و پایدارتر در مقابل تخریب و اکسایش می‌تواند در جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی مفید باشد.

بررسی قابلیت استفاده از این آمیزه‌ها در حوزه‌های جدیدی مانند نانوفناوری، مواد هوشمند و حسگرها، انتظار می‌رود که افق‌های جدیدی را برای کاربردهای تخصصی ایجاد کند. نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد عملکرد بلندمدت این آمیزه‌ها تحت شرایط محیطی مختلف و بارگذاری‌های دینامیکی وجود دارد تا رفتار آن‌ها در شرایط واقعی بهتر مورد بررسی قرار گیرد. توسعه روش‌های تولید نوین در مقیاس صنعتی، که منجر به بهینه‌سازی فرآیندهای تولید مانند کاهش هزینه‌ها و زمان تولید شود، می‌تواند افق‌های جدیدی را در رقابت‌پذیری این مواد ایجاد کند. شناسایی و توسعه محصولات جدید بر اساس این آمیزه‌ها در حوزه‌های مختلف صنعتی، به‌ویژه در فناوری‌های نوظهور،

می‌تواند به افزایش کاربردهای عملی و گسترش آن‌ها در صنعت منجر شود. این افق‌ها نمایانگر توان بالای تحقیق و توسعه در زمینه آمیزه‌های اپوکسی و گرمانرم است و می‌تواند به نوآوری‌های چشمگیری در صنایع مختلف منجر شود.

## ۶ نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به بررسی تأثیر مهندسی مورفولوژی گرمانرم‌ها بر چقرمگی رزین‌های اپوکسی پرداخته است. با توجه به خواص برجسته رزین‌های اپوکسی، از جمله استحکام مکانیکی بالا و چسبندگی عالی، این مواد در صنایع مختلف به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، چقرمگی پایین آن‌ها در برابر ضربه و شکست، محدودیت‌هایی را در کاربردهای صنعتی ایجاد می‌کند.

افزودن گرمانرم‌ها به ماتریس اپوکسی به عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود چقرمگی این مواد شناخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نوع و نحوه توزیع گرمانرم‌ها در ماتریس اپوکسی تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی نهایی دارد. به‌ویژه، شناسایی سه نوع مورفولوژی اصلی (آلیاژ و آمیزه با مورفولوژی تک‌فاز، چندسازه با مورفولوژی سطح مشترک و چندسازه با مورفولوژی فاز مشترک) از طریق افزودن گرمانرم‌ها می‌تواند به طور مؤثری سازوکارهای چقرمگی را تحت تأثیر قرار دهند و به افزایش مقاومت در برابر شکست کمک کنند. یافته‌ها نشان می‌دهد که تنظیم دقیق مورفولوژی می‌تواند به بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی رزین‌های اپوکسی منجر شود و زمینه‌ساز طراحی مواد جدید با عملکرد بهتر برای کاربردهای صنعتی باشد.

در نهایت، این تحقیق می‌تواند به عنوان مبنایی علمی برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی ترکیب‌های اپوکسی و گرمانرم و همچنین توسعه مواد چندسازه‌ای با خواص بهبود یافته مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اهمیت چقرمگی در کاربردهای صنعتی، نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود عملکرد مواد در شرایط واقعی کمک کند و به توسعه فناوری‌های نوین در این زمینه منجر شود.



## مراجع

1. Zamanian M., Mortezaei M., Salehnia B., & Jam, J. E. Fracture Toughness of Epoxy Polymer Modified with Nanosilica Particles: Particle Size Effect. *Engineering Fracture Mechanics*, 97, 193-206. **2013**.
2. Akherati Sany, S. R., Mortezaei, M., & Amiri Amraei, I. Improving Fracture Toughness of Epoxy Nanocomposites by Silica Nanoparticles. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 30(1), 3-17. **2017**.
3. Kobayashi, T., Ogawa, K., Maeda, R., Wang, P., Kubozono, T., Yoshihara, D., & Omiya, M. Quantitative Evaluation of Crack Arrest Mechanisms in Epoxy/Silica Nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 261, 111028. **2025**
۴. ابریشمی، سوزان، مقصود. مروری بر شبکه‌های پلی‌یورتان اپوکسی و نانوکامپوزیت آن‌ها. پژوهش و توسعه فناوری پلیمر ایران، ۶. ۲۰۲۱.
5. Ma, H., Geng, P., Xu, T., Bandaru, A. K., Aravand, A., & Falzon, B. G. Analytical Fracture Toughness Model for Multi-phase Epoxy Matrices Modified by Thermoplastic and Carbon Nanotube/thermoplastic. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 177, 107948. **2024**.
6. Yang, S., Li, R., Zhu, H., Qin, Y., & Huang, C. Review of The State-of-the-Art Techniques for Enhancing the Toughness of Thermosetting Epoxy Asphalt. *Construction and Building Materials*, 449, 137660. **2024**.
7. Tangthana-umrung, K., Mahmood, H., Zhang, X., & Gresil, M. Enhancing Interlaminar Fracture Toughness of Woven Carbon Fibre/Epoxy Composites with Engineering Thermoplastic and Carbon-Based Nanomaterials. *Composite Structures*, 282, 115073. **2022**.
8. Yao, J., Shi, P., Gao, Y., & Niu, Y. Evolution of Phase Structure and Fracture Toughness Induced by Carbon Nanotubes in Thermoplastic-Toughened Epoxy Nanocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 44(1-2), 45-55. **2025**.
9. Mathis, E., Michon, M. L., Billaud, C., Vergelati, C., Clarke, N., Jestin, J., & Long, D. R. Controlling the Morphology in Epoxy/Thermoplastic Systems. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(3), 2091-2104. **2022**.
10. Ma, H., Aravand, M. A., & Falzon, B. G. Influence on Fracture Toughness Arising From Controlled Morphology of Multiphase Toughened Epoxy Resins in the Presence of Fibre Reinforcement. *Composites Science and Technology*, 217, 109095. **2022**.
11. Petrie, E. M. Epoxy Adhesive Formulations. New York: McGraw-Hill. **2006**.
۱۲. باریکانی هنرکار، رزین‌های اپوکسی، انجمن علوم و مهندسی پلیمر
13. Mi, X., Liang, N., Xu, H., Wu, J., Jiang, Y., Nie, B., & Zhang, D. Toughness and Its Mechanisms in Epoxy Resins. *Progress in Materials Science*, 130, 100977. **2022**.
14. Ren, Y., Zhang, L., Xie, G., Li, Z., Chen, H., Gong, H., & Luo, J. A Review on Tribology of Polymer Composite Coatings. *Friction*, 9, 429-470. **2021**.
15. Garg, A. C., & Mai, Y. W. Failure Mechanisms in Toughened Epoxy Resins—A Review. *Composites Science and Technology*, 31(3), 179-223. **1988**
16. Kargarzadeh, H., Ahmad, I., and Abdullah, I., Mechanical Properties of Epoxy-Rubber Blends, In Handbook of Epoxy Blends, Edited by C. K. Rathi and Y. A. M. Al-Rub, 1–36. Cham: Springer, **2015**.
17. Kausar, A. Performance of Corrosion Protective Epoxy Blend-Based Nanocomposite Coatings: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(6), 658-673. **2020**.
18. Brooker, R. D., Kinloch, A. J., & Taylor, A. C.. The Morphology and Fracture Properties of Thermoplastic-Toughened Epoxy Polymers. *The Journal of Adhesion*, 86(7), 726-741. **2010**
19. Bogetti, T.A. & J.W. Gillespie, Two-Dimensional Cure Simulation of Thick Thermosetting Composites. *Journal of Composite Materials*, 25(3). 239-273. **2016**.
20. Quaresimin, M., Schulte, K., Zappalorto, M., & Chandrasekaran, S.. Toughening Mechanisms in Polymer Nanocomposites: From Experiments to Modelling. *Composites Science and Technology*, 123, 187-204. **2016**.
21. Salunke, A., Sasidharan, S., Cherukattu Gopinathapanicker, J., Kandasubramanian, B., & Anand, A. Cyanate Ester—Epoxy Blends for Structural and Functional Composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(8), 3260-3277. **2021**.
22. Ma, H., Aravand, M. A., & Falzon, B. G. Phase Morphology and Mechanical Properties of Polyetherimide Modified Epoxy Resins: A Comparative Study. *Polymer*, 179, 121640. **2019**.
23. Pena, G., Eceiza, A., Valea, A., Remiro, P., Oyanguren, P., & Mondragon, I. Control of Morphologies and Mechanical Properties of thermoplastic-Modified Epoxy Matrices by Addition of a Second Thermoplastic. *Polymer International*, 52(9), 1444-1453. **2003**.
24. Puglia, D., Al-Maadeed, M. A. S., Kenny, J. M., & Thomas, S. Elastomer/Thermoplastic Modified Epoxy Nanocomposites: The Hybrid Effect of 'Micro' and 'Nano' scale. *Materials Sci-*

- ence and Engineering: R: Reports*, 116, 1-29] **2017**.
25. Wang, Y. Y., & Chen, S. A.. Polymer Compatibility: Nylon-Epoxy Resin Blends. *Polymer Engineering & Science*, 20(12), 823-829] **1980**.
26. Mathis, E., Michon, M. L., Billaud, C., Grau, P., Bocahut, A., Vergelati, C., & Long, D. R. Thermoset Modified with Polyethersulfone: Characterization and Control of the Morphology. *Journal of Polymer Science*, 58(8), 1177-1188] **2020**.
27. Quan, D., Alderliesten, R., Dransfeld, C., Murphy, N., Ivanović, A., & Benedictus, R. Enhancing the Fracture Toughness of Carbon Fibre/Epoxy Composites by Interleaving Hybrid Meltable/Non-Meltable Thermoplastic Veils. *Composite Structures*, 252, 112699] **2020**.
28. Goergen, C., Klingler, A., Grishchuk, S., May, D., Wetzel, B., & Mitschang, P. Novel Approach in B-Staging of an Epoxy Resin for Development of (Recycled Carbon Fibres (rCF)) Non-Woven Prepregs for RTP Processing. *Key Engineering Materials*, 809, 521-526] **2019**.
29. Saghafi, H., Palazzetti, R., Zucchelli, A., & Minak, G. Influence of Electrospun Nanofibers on the Interlaminar Properties of unidirectional Epoxy Resin/Glass Fiber Composite Laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(11), 907-914. **2015**]
30. Liu, D., Li, G., Li, B., Luan, Y., Ling, H., & Yang, X. In-Situ Toughened CFRP Composites by Shear-Calender Orientation and Fiber-Bundle Filtration of PA Microparticles at Prepreg Interlayer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 84, 165-174] **2016**.
31. Beylergil, B., Tanoğlu, M., & Aktaş, E. Effect of Polyamide-6, 6 (PA 66) Nonwoven Veils on the Mechanical Performance of Carbon Fiber/Epoxy Composites. *Composite Structures*, 194, 21-35. **2018**.
32. Voleppe, Q., Ballout, W., Van Velthem, P., Bailly, C., & Pardoën, T. Enhanced Fracture Resistance of Thermoset/Thermoplastic Interfaces Through Crack Trapping in a Morphology Gradient. *Polymer*, 218, 123497. **2021**.
33. Jensen, R. E., Palmese, G. R., & McKnight, S. H. Viscoelastic Properties of Alkoxy Silane-Epoxy Interpenetrating Networks. *International journal of adhesion and adhesives*, 26(1-2), 103-115. **2006**.