

شناسایی مکانیسم‌های تخریب گرمایی کامپوزیت‌های اپوکسی/نانوذرات الاستومری شبکه‌ای شده به وسیله معادلات منحنی جامع

Identification of thermal degradation mechanisms
of epoxy composites / full vulcanized elastomer
nanoparticle by master curve equations

چکیده

در این پژوهش برای بررسی مکانیسم‌های تخریب گرمایی نانو کامپوزیت‌های اپوکسی، مقادیر مختلف (۰/۵، ۱/۵، ۱/۱۰، ۵/۰ درصد وزنی) از نانو ذرات الاستومری به رزین اپوکسی افزوده شد. در ابتدا، به روش گرما وزن سنجی در سرعت‌های گرمادهی $10, 20, 100, 200, 400$ °C/min آنالیز گرما وزن سنجی انجام شد. برای شناسایی مکانیسم‌های تخریب گرمایی نانو کامپوزیت‌های اپوکسی منحنی جامع ترسیم شد. نتایج نشان داد که، رزین اپوکسی در ابتدا از مکانیسم‌های تخریب گرمایی از نوع هسته گذاری و رشد (An)، و هسته گذاری تصادفی (F1) پیروی می‌کند. با افزودن مقدار ۱/۵ درصد وزنی از نانو ذرات الاستومری به رزین اپوکسی، در سرعت گرمادهی 100 °C/min، مکانیسم‌های تخریب گرمایی رزین اپوکسی به مکانیسم هسته گذاری و رشد تغییر می‌کند و از دو مرحله‌ای به تک مرحله‌ای تبدیل می‌شود و همچنین افزایش سرعت گرمادهی باعث تغییر در مکانیسم‌های تخریب گرمایی نانو کامپوزیت‌های اپوکسی شده است.

کلمات کلیدی: نانو ذرات الاستومری، رزین اپوکسی، گرما وزن سنجی، منحنی جامع، مکانیسم‌های تخریب گرمایی

نوع مقاله: پژوهشی

محمدحسین کرمی^۱، محمدرضا کلایی^۲، رامین خواجه‌جویی^۳، امید مرادی^۴، داوود زارعی^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی پلیمر، گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، صندوق پستی: ۶۶۴-۵۸۵۹۱

۲. دانشیار، گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، صندوق پستی: ۶۶۴-۵۸۵۹۱

۳. استاد، گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، صندوق پستی: ۶۶۴-۵۸۵۹۱

۴. دانشیار، گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، صندوق پستی: ۴۷۳-۵۱۵۷۳

۵. دانشیار، گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، صندوق پستی: ۶۶۴-۵۸۵۹۱

ایمیل نویسنده‌گان و عهده‌دار مکاتبات:

mohammad.kalaee@gmail.com

تاریخ دریافت: ۲۰-۱۲-۱۴۰۰

تاریخ پذیرش: ۲۳-۰۷-۱۴۰۱

۱ - مقدمه:

که به عنوان چسب، پوشش و ماده زمینه برای کامپوزیت‌ها به دلیل مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی و مواد شیمیایی استفاده می‌شود. این رزین در صنایع خودروسازی، قطعات الکتریکی و ساختمانی کاربرد فراوانی دارند و لیکن به دلیل مقاومت ضعیف در مقابل رشد ترک، خواص شکننده‌ای دارد و لذا کاربرد آن را محدود می‌کند، بنابراین افزایش چقرمگی رزین‌های اپوکسی در حضور نانوذرات پلیمری، یکی از زمینه‌های مورد توجه پژوهشگران است (۳،۴). پودرهای لاتکس شامل ذرات ریز الاستومری که به صورت کامل پخت شده‌اند را نانوذرات الاستومری یا (ENP) می‌نامند که اندازه ذرات الاستومری به وسیله اندازه ذرات لاتکس (latex) به خوبی کنترل می‌شود و با استفاده از این فرایند اندازه ذراتی کمتر از ۱۰۰ نانومتر با توزیع باریک تولید می‌شوند. شبکه‌ای شدن کامل این نانوذرات منجر به بهبود پراکنش و در نتیجه افزایش خواص کششی آمیزه‌های پلیمری می‌شود (۵). پژوهشگران به وسیله معادلات سینتیک تخریب گرمایی و ترسیم منحنی جامع به شناسایی مکانیسم‌های تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پرداختند (۶-۸). در مطالعه قبلی به بررسی سینتیک پخت و سینتیک تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پرداخته شد (۱۰-۹). در این پژوهش به وسیله معادلات سینتیک تخریب در ابتدا $f(\alpha)$ و $g(\alpha)$ برای تمامی مکانیسم‌های تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی محاسبه می‌شود و در ادامه برای ترسیم منحنی جامع $Z(\alpha)$ محاسبه می‌شود و از این روش اثر درصد‌های متفاوت نانوذرات الاستومری شبکه‌ای شده (۵/۱، ۱۰/۵، ۲۰/۵ درصد وزنی) و سرعت گرمادهی بر منحنی جامع رزین اپوکسی مشخص می‌شود و مکانیسم‌های تخریب گرمایی شناسایی می‌شوند و این پژوهش در جواب به این سؤال که آیا نانوذرات الاستومری شبکه‌ای شده بر مکانیسم‌های تخریب گرمایی رزین اپوکسی تأثیر داشته

مکانیسم‌های تخریب گرمایی برای شناسایی واکنش‌ها و برای درک اینکه چگونه واکنش‌دهنده‌ها به محصولات تبدیل می‌شوند، امری مهم و ضروری است. یک قطعه یا مواد پلیمری قبل از به کارگیری در صنعت محدوده رفتار گرمایی و مکانیسم‌های تخریب گرمایی آن باید بررسی شود تا کاربری آن مشخص باشد و با توجه به پیچیدگی رفتار نانوذرات الاستومری شبکه‌ای شده و رزین اپوکسی، برای بهتر پیش‌بینی کردن رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، می‌بایست از معادلات منحنی جامع و مدل‌سازی سینتیک تخریب گرمایی استفاده کرد. از نقطه نظر عملی، آنالیز سینتیک تخریب گرمایی، همچنین می‌تواند برای شبیه‌سازی سرعت تخریب گرمایی فرایند و واکنش در شرایط مختلف، برای پیش‌بینی طول عمر مواد و یافتن کاربردهای بسیاری برای ایمنی فرایند استفاده شود. هنگامی نانوکامپوزیت‌ها تخریب شوند و فعالیت خود را از دست بدهند، پلیمرها ممکن است عملکرد مکانیکی خود را از دست بدهند و مواد پرانرژی ممکن است کارایی خود را از دست بدهند یا در صورت قرار گرفتن در دمای بالا برای مدت طولانی ممکن است یک خطر بالقوه ایجاد کنند؛ بنابراین، پیش‌بینی میزان تبدیل برای زمان‌های مختلف در یک دمای معین هم‌دمای یا غیر هم‌دمای، و یا برای یک برنامه دمایی متفاوت، برای کاربردهای عملی از اهمیت حیاتی برخوردار است (۴-۱). با توجه به این نکته که شناسایی مکانیسم‌های تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی اطلاعات مفیدی در مورد تخریب گرمایی و مکانیسم‌های آن ارائه می‌دهد، و این نکته که تا کنون روش محاسبه منحنی جامع آن در مقالات متعددی ارائه نشده است و اهمیت این موضوع، در این پژوهش به بررسی آن پرداخته شده است (۳،۲). رزین اپوکسی، یکی از مهم‌ترین پلیمرهای گرماسخت

بعد از حدود ۲۰ دقیقه، مخلوط حاصل در حمام اولتراسونیک قرار داده شد و مجدد ۲۰ دقیقه با هموژنایزر با سرعت چرخشی ۱۰۰۰۰ دور/ دقیقه مخلوط بعد از اضافه کردن سخت کننده به مدت ۲ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور/دقیقه مخلوط شد. از آنجایی که نمونه‌ها می‌بایست عاری از حباب باشند در مرحله اول (قبل از اضافه شدن سخت کننده) از آن خلا به مدت ۱ ساعت و در مرحله دوم ۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد.

۳- اساس نظری مدل‌های سینتیک تخریب

برای محاسبه درجه تخریب (α) از فرمول شماره (۱) استفاده می‌شود. در این فرمول m_t ، جرم در هر زمان و m_0 و m_∞ به ترتیب برابر با جرم اولیه و جرم نهایی در اثر تخریب گرمایی می‌باشد (۱۴، ۱۱).

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty} \quad (1)$$

در جدول ۱، توابع و مکانیسم‌های تخریب گرمایی نشان داده شده است.

است و یا خیر، به محاسبه معادلات سینتیک تخریب گرمایی و شناسایی مکانیسم‌های تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌پردازد.

۲- مواد و تجهیزات:

رزین اپوکسی ML-505 و سخت کننده HA-13 از شرکت مهندسی مکرر بوده که بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول A و سخت کننده پلی آمینی تولید می‌گردد. در ساختار این رزین از نوعی آلیفاتیک اپوکسی استفاده گردیده که ذاتاً موجب افزایش چقرمگی و انعطاف پذیری محصول می‌گردد. در فرایند تولید این نوع رزین اپوکسی از حلال‌ها و رقیق کننده‌های غیر واکنش‌گرا، استفاده نگردیده که موجب می‌شود که ساختار پلیمری محصول پایدار باقی بماند و دچار هیچ گونه تغییرات حجمی و وزنی نگردد. نانوذرات الاستومری فوق شبکه‌ای مورد مصرف از نوع NBR از پژوهشگاه تحقیقاتی SINOPEC Beijing تهیه شد. اندازه سایز نانوذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر با توزیع باریک بوده است.

۲-۱- آزمون‌ها

برای مطالعه فرایند تخریب گرمایی با استفاده از دستگاه گرماوزن‌سنجی (TGA) مدل NETZSCH TG 209F3 ساخت شرکت NETZSCH آلمان، تحت گاز نیتروژن انجام شد. همچنین آزمون‌های گرمایی در سرعت‌های گرمادهی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انجام شد. وزن هر نمونه ۵ میلی‌گرم بود و از دمای محیط تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد گرما داده شد.

۲-۲- روش آماده‌سازی نمونه‌ها

در ابتدا برای به دست آوردن روش بهبود اختلاط، مقدار مشخصی از نانوذرات الاستومری نوع NBR، توسط همزن با سرعت ۲۰۰۰ دور/دقیقه با رزین اپوکسی پیش مخلوط شد و

جدول ۱. مدل‌های سینتیک حالت جامد [۱۱].

مکانیسم سینتیک	$f(\alpha)$	$g(\alpha)$	مدل
A2	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$	معادله آورامی (n=2)
A3	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	$3(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{2/4}$	معادله آورامی (n=3)
A4	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$	$4(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{3/4}$	هسته‌گذاری و رشد (آورامی)
R2	$[1-(1-\alpha)^{1/2}]$	$[2(1-\alpha)^{1/2}]$	استوانه‌ای (Contracting)
R3	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]$	$[3(1-\alpha)^{2/3}]$	کروی (Contracting)
D1	α^2	$1/2\alpha^{-1}$	نفوذ یک‌بعدی
D2	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha) + \alpha$	$[-\ln(1-\alpha)]^{-1}$	نفوذ دو‌بعدی
D3	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$	$[3/2(1-\alpha)^{2/3}][1-(1-\alpha)^{1/3}]^{-1}$	نفوذ سه‌بعدی
F1	$-\ln(1-\alpha)$	$(1-\alpha)$	درجه اول
F2	$(1-\alpha)^2$	$(1-\alpha)^{-1} - 1$	هسته‌گذاری تصادفی
D4	$3/2((1-\alpha)^{-1/3} - 1)$	$1 - (\frac{2\alpha}{3}) - (1-\alpha)^{2/3}$	نفوذ سه‌بعدی
R1	α	1	درجه صفر
F3	$[-1 + (1-\alpha)^{-2}]$	$(1-\alpha)^3$	هسته‌گذاری تصادفی

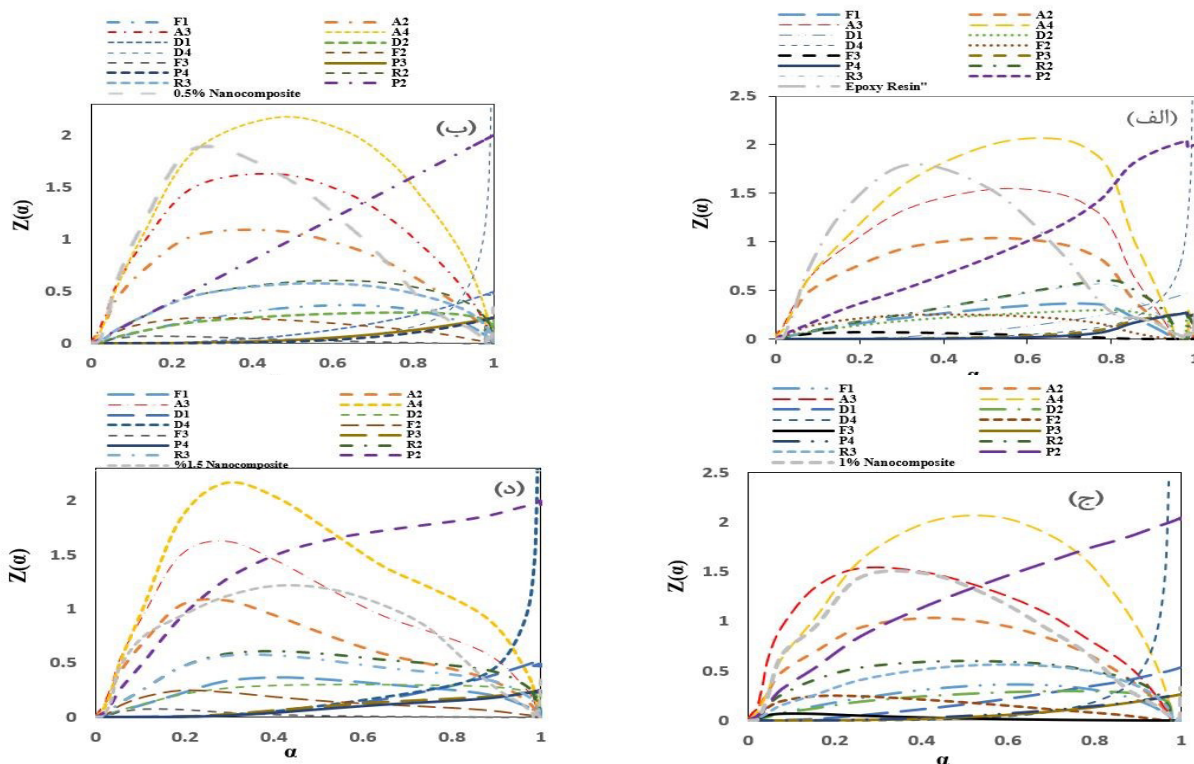
۱، سرعت گرمادهی ثابت $10^\circ\text{C}/\text{min}$ نمونه 0.5 و 1 درصد نانوکامپوزیت رفتار مشابه یکدیگر دارند و از 2 مکانیسم An و $F1$ تبعیت می‌کنند؛ ولی برای نمونه $1/5$ درصد نانوکامپوزیت فقط از یک مکانیسم An تبعیت می‌کنند ($19-14$). (باتوجه به اینکه مکانیسم‌های $A3$ و $A4$ از یک دسته‌بندی فرمولی هستند هر دو مکانیسم را An نام‌گذاری شد و یک مکانیسم در نظر گرفته شد) که این بدان معناست نمونه $1/5$ درصد نانوکامپوزیت، دو مکانیسم متفاوت تخریب گرمایی رزین اپوکسی را به تک مکانیسم تغییر می‌دهد (20).

باتوجه به فرمول ۲، و جدول ۱، $Z(\alpha)$ برای محاسبه مکانیسم‌های تخریب گرمایی و شناسایی نوع مکانیسم نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، محاسبه می‌شوند ($18-12$).

$$Z(\alpha) = f(\alpha) \cdot g(\alpha) = (T_\alpha^2) = \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_\alpha$$

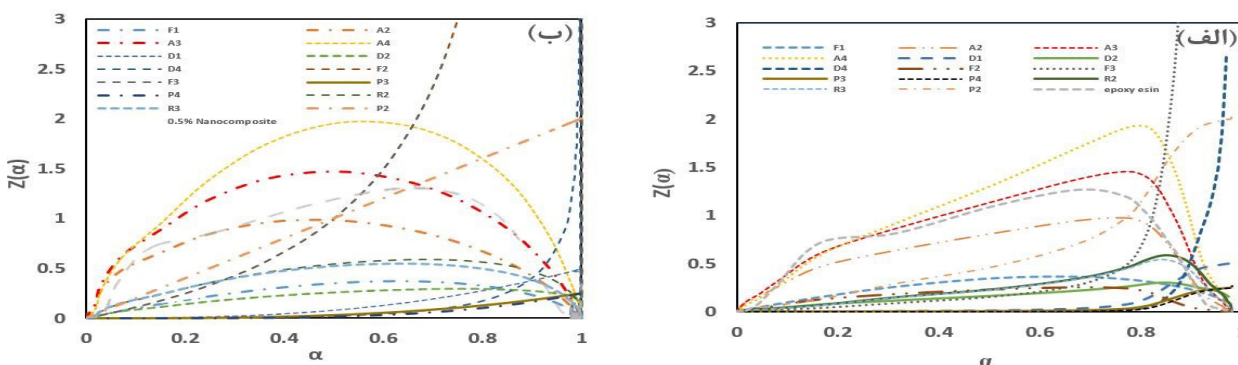
۴- نتایج و بحث

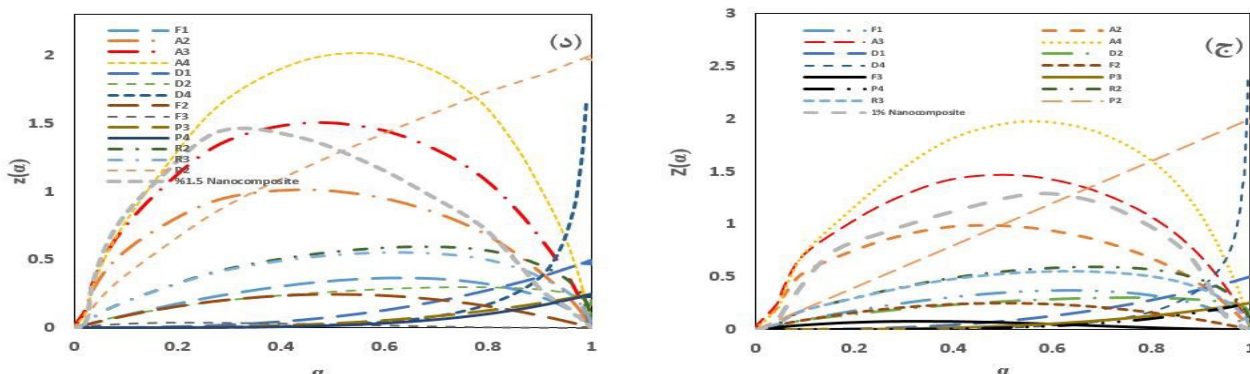
۴-۱. اثر سرعت گرمادهی بر مکانیسم تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی:
در شکل‌های ۲، ۱ و ۳ منحنی جامع رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی نشان داده شده است. در شکل



شکل ۱. منحنی جامع الف). رزین اپوکسی ب). ۵٪ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی ج). ۱ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی د). ۱/۵ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی در سرعت گرمادهی ۱۰°C/min

در شکل ۲، در سرعت گرمادهی ثابت ۱۵°C/min، در ابتدا رزین اپوکسی از مکانیسم تخریب گرمایی تبعیت نمی‌کند و با افزودن مقدار ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات الاستومری به رزین اپوکسی، مکانیسم تخریب گرمایی تغییر می‌کند و از مکانیسم‌های تخریب گرمایی A^۳ و A^۴ تبعیت می‌کند همچنین نمونه ۱ درصد نانوکامپوزیت رفتار مشابه رزین اپوکسی خالص دارد و مکانیسم تخریب گرمایی تغییر نمی‌کند (۲۱-۲۲).

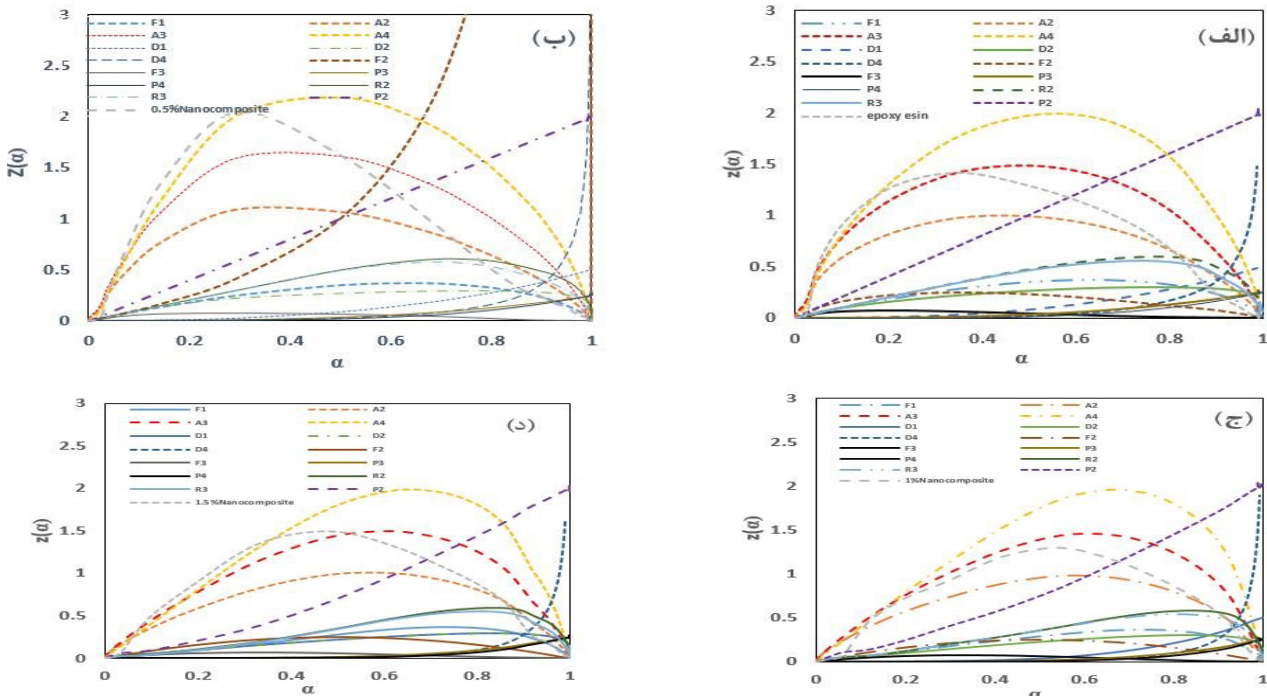




شکل ۲. منحنی جامع الف). رزین اپوکسی ب). ۰/۵ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی ج). ۱ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی د). ۱/۵ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی در سرعت گرمادهی ۱۵°C/min

این بدان معناست که نمونه رزین اپوکسی در ابتدا از مکانیسم تخریب گرمایی A۳ و A۴ تبعیت می‌کند و نمونه ۰/۵ درصد نانوکامپوزیت در درجه پخت ۰/۱ از مکانیسم A۴ تبعیت می‌کند و همچنین نمونه ۱ درصد نانوکامپوزیت در انتهای واکنش تخریب گرمایی از مکانیسم تخریب گرمایی A۲

در شکل ۳، منحنی جامع تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، در سرعت گرمادهی ثابت ۲۰°C/min نشان داده شده است، با افزودن نانوذرات الاستومری به رزین اپوکسی، مکانیسم‌های تخریب گرمایی نمونه‌های ۱،۰/۵ و ۱/۵ درصد نانوکامپوزیت تغییر می‌کند که



شکل ۳. منحنی جامع الف). رزین اپوکسی ب). ۰/۵ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی ج). ۱ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی د). ۱/۵ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی در سرعت گرمادهی ۲۰°C/min

در حضور مقادیر (۰/۵، ۱، ۱/۵) درصد وزنی بررسی شد. آنالیز گرما وزن سنجی در سرعت‌های گرمادهی $10, 20, 150 \text{ c/min}$ انجام شد. با استفاده از معادلات درجه تخریب منحنی‌های جامع برای شناسایی بهتر مکانیسم‌های تخریب گرمایی ترسیم شد. دو پرسش مطرح شد که آیا نانوذرات الاستومری شبکه‌ای شده و سرعت تخریب گرمایی بر رفتار تغییر مکانیسم‌های تخریب گرمایی رزین اپوکسی نقش دارد و یا خیر؟ که مشخص شد، افزایش سرعت گرمادهی باعث تغییر در مکانیسم تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی شده است که این بدان معناست که دو عامل نانوذرات الاستومری و سرعت گرمادهی هر دو بر تغییر رفتار مکانیسم‌های تخریب گرمایی تأثیر داشته‌اند و یا به عبارتی دیگر مکانیسم‌های تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تابع دو عامل، اندازه درصد وزنی نانوذرات الاستومری و سرعت گرمادهی می‌باشند.

تبعیت می‌کند و نمونه ۱/۵ درصد وزنی در ابتدا از مکانیسم تخریب گرمایی تبعیت نمی‌کند و در آخر هم مقداری انحراف دارد و از مکانیسمی تبعیت نمی‌کند (۲۹-۲۳).

۴-۲. اثر نانوذرات الاستومری بر مکانیسم تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی:

در جدول ۲، اثر نانوذرات الاستومری بر رزین اپوکسی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد حضور نانوذرات الاستومری در ماتریس رزین اپوکسی باعث می‌شود مکانیسم تخریب گرمایی رزین اپوکسی تغییر کند و این نوع نانوذرات باعث تغییر مکانیسم تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌شود [۳۴-۳۰].

۵. نتیجه‌گیری:

در این پژوهش مکانیسم‌های تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی به وسیله معادلات منحنی جامع

جدول ۲. اثر سرعت گرمادهی بر مکانیسم‌های تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

سرعت گرمادهی	رزین اپوکسی	۰/۵ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی	۱ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی	۱/۵ درصد نانوکامپوزیت اپوکسی
۱۰	F1 و A4 ، A3 مکانیسم	F1 و A4 ، A3 مکانیسم	F1 و A4 ، A3 مکانیسم	A4 ، A3 مکانیسم
۱۵	بدون مکانیسم	A3 مکانیسم	بدون مکانیسم	A4 مکانیسم
۲۰	A4 ، A3 مکانیسم	A4 مکانیسم	A2 مکانیسم	بدون مکانیسم

- [1] M.H.Karami, M.R. Kalae, "Review of curing kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of iron oxide nanoparticles", Polymerization, 2021. <https://doi.org/10.22063/BASPARSH.2021.2824.1537>.
- [2] M.H.Karami, M.R.Kalae, S.Mazinani, V.G. Martínez, R.M.R.Wellen, A.M. Shanmugaraj, K. Kim, "Isoconversional model approach and cure kinetics of epoxy/NBR nanocomposites", Proceeding of the 14th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST 2020), Tarbiat modares University, Tehran, Iran, 9-12 November, 2020.
- [3] M.H.Karami, M.R.Kalae, "Curing of Epoxy/UFNBRP nano composites using calorimetric meth-

od”, Proceeding of the 11th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2020), Tehran university, Fouman, Iran, 15-17 April, 2020.

[4] M.H.Karami, M.R. Kalae, S. Mazinani, “ Chemorheology of nano acrylonitrile butadiene rubber (n-NBR)/epoxy nanocomposites”, Proceeding of the 1st international conference on rheology (ICOR), Iran polymer and petrochemical institute, Tehran, Iran, 17-18 December ,2019.

[5] M.H.Karami, M.R. Kalae, “Chemorheology of epoxy nanocomposites in the presence of elastomeric nanoparticles”, Proceeding of the national conference on advanced technologies in Energy, Water and environment, Sharif energy research institute, Tehran, Iran, 3 March, 2021.

[6] M.H.Karami , M.R. Kalae, “ Modeling of curing kinetics of epoxy nanocomposites by time sweep method”, Proceeding of the national conference on advanced technologies in energy, Water and environment, Sharif energy research institute, Tehran, Iran, 3 March ,2021.

[7] M.H.Karami, M.R. Kalae, “A Review of the applications of Cross-linked elastomeric nanoparticles”, Iranian rubber magazine, 25, 37-56, 2021.

[8] M.H.Karami, M.R. Kalae, “A review of the curing kinetics of epoxy nanocomposites/nano clay”, Iran polymer technology, research and development, 6, 29-38, 2021.

[9] M.H.Karami, M.R. Kalae, “Review of degradation kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of clay nanoparticles”, Polymerization, 2021, DOI: 10.22063/BASPARESH.2021.2895.1552.

[10] M.H.Karami, M.R. Kalae, “ Investigation of the effect of carbon nanotubes on modeling of curing kinetics of epoxy resin” , Journal of science and engineering elites, 6, 162-175, 2021.

[11] M. H. Karami ,M. R. Kalae ,R. Khajavi, O. Moradi D.Zaarei, “Effect of vulcanized elastomeric nanoparticles on thermal stability and the maximum decomposition temperatures of epoxy resin”, Proceeding of the 17th National Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2021), Ferdowsi University of Mashhad, 9-11 November , 2021.

[12] M. H. Karami ,M. R. Kalae ,R. Khajavi, O. Moradi, D.Zaarei , “Viscosity modeling of epoxy nanocomposites / elastomeric nanoparticles” , Proceeding of the 17th National Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2021), Ferdowsi University of Mashhad, 9-11 November , 2021.

[13]] M. H. Karami ,M. R. Kalae ,R. Khajavi, O. Moradi, D.Zaarei, “Thermal Stability and Thermal Degradation of Epoxy Nanocomposite in The Presence of Full Vulcanized Elastomeric Nano particles”, Advanced materials & Novel Coatings, 10, 2758-2770, 2021.

[14] Karami, M. H., Kalae, M.R., “Study of thermal degradation kinetics of epoxy composite / carbon nanotubes”, Polymerization, 2021 ,DOI: 10.22063/BASPARESH.2021.3017.1591

[15] Karami, M. H., Kalae, M.R., “Study of the effect of graphene oxide nanoplatelets on the thermal degradation kinetics of epoxy nanocomposites”. Nano World, 17(65), 57-66, 2022.

[16] Karami, M. H., Kalae, M.R., Khajavi, R., Moradi, O., Zaarei, D., “Thermal degradation kinetics of epoxy resin modified with elastomeric nanoparticles”. Advanced Composite and Hybrid Materials, 2022, <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00419-0>.

[17] Karami, M., Kalae, M., Khajavi, R., Moradi, O., Zaarei, D. (2022). 'A review study of the effect of carbon nanofibers on the curing kinetics of epoxy resins', Journal of Textile Science and , 2022.

[18] Karami, M. H., Kalae, M.R., “Study of curing kinetics and thermal stability of epoxy nanocomposites in the presence of silica nanoparticles”, Iranian rubber magazine, 26, 37-50, 2022.

[19] Vyazovkin S., Burnham A.K., Favregeon L., Koga N., Moukhina E., Luis A., Maqueda P., and etal, “Ictac Kinetics Committee Recommendations For Analysis Of Multi-step Kinetics”, Thermochim. Acta, 689, 178597, 2020.

[20] Ahmadi Z., “ Epoxy in nanotechnology: A short review”, Progress in Organic Coatings ,132, 445-448, 2019.

[21] J. Wang, X. Zhang, L. Jiang, J. Qiao, Advances in toughened polymer materials by structured rub-

ber particles, *Prog. Polym. Sci.* 98 ,(2019) ,101160.

[22] Qiao,J, Elastomeric nano-particle and its applications in polymer modifications, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Volume 3, Issue 2,(2020), 47-59.

[23] Song, J.-H.,Zhou, F.Wang, X.,Ren, Y.,Zhang, X.-H.,Guo, M.-M., Qiao, J.-L., Preparation and Properties of Cellulose/Full-vulcanized Elastomeric Nanoparticles Composite Films, *Acta Polymerica Sinica*, (2017), 4, 676-682.

[24] Y.Q. Liu, X.H. Zhang, G.S. Wei, J.M. Gao, F. Huang, M.L. Zhang, M.F. Guo,J.L. Qiao, The special effect of ultra-fine rubber particles in plastics toughening, *Chin. J. Polym. Sci.* 20, (2002) ,93-98.

[25] Vyazovkin. S,How much is the accuracy of activation energy affected by ignoring thermal inertia? *Int. J. Chem. Kinet*,52, (2020), 23–28.

[26] Vyazovkin. S, Determining Preexponential Factor in Model-Free Kinetic Methods: How and Why? *Molecules*,26, (2021), 3077.

[27] Vyazovkin. S, Kissinger Method in Kinetics of Materials: Things to Beware and Be Aware of, *Molecules*,25, (2020), 2813.

[28] Sbirrazzuoli. N, Determination of pre-exponential factor and reaction mechanism in a model-free way, *Thermochim. Acta* 691 (2020), 178707.

[29] Sbirrazzuoli. N, Model-free isothermal and nonisothermal predictions using advanced isoconversional methods, *Thermochimica Acta*, Volume 697, 2021, 178855.

[30] Vyazovkin. S, Achilias,D, Francos, Andrey Galukhin,X.F, Sbirrazzuoli,N, ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal polymerization kinetics, *ThermochimActa*, 714, (2022), 179243.

[31] Karami,M. H., Kalae,M.R., Khajavi, R., Moradi, O., Zaarei, D , Effect of vulcanized nitrile butadiene elastomeric nanoparticles on curing kinetics of epoxy resin, *Nanoscale*, 9(1), (2002), 169-181.

[32] Karami,M. H., Kalae,M.R, Investigation of curing kinetics modeling of epoxy nanocomposites in the presence of nano graphene oxide: A review study. *Iranian Chemical Engineering Journal*,(2022), doi: 10.22034/ijche.2022.315883.1154.

[33] Karami, M.H.; Kalae, M.R.; Mazinani, S.; Shakiba, M.; Shafiei Navid, S.; Abdouss, M.; Beig Mohammadi, A.; Zhao, W.; Koosha, M.; Song, Z.; Li, T. Curing Kinetics Modeling of Epoxy Modified by Fully Vulcanized Elastomer Nanoparticles Using Rheometry Method, *Molecules*,27,(2022),2870.

[34]. Karami,M. H., Kalae,M.R., Khajavi, R., Moradi, O., Zaarei, D , Effect of nano diamond on thermal behavior and thermal stability of epoxy resin', *Nano World*, 18(67), (2022), 11-19.

IRM