

Polymerization  
Quarterly, 2022  
Volume 12, Number 3  
Pages 68-77  
ISSN: 2252-0449

# Study of Thermal Degradation Kinetics of Epoxy/Carbon Nanotubes Composites

Mohammad Hossein Karami<sup>1,2</sup> and Mohammad Reza Kalaei<sup>1,2\*</sup>

1. Department of Polymer Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, P.O. Box 19585-466, Tehran, Iran
2. Nano Research Center, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 25 October July 2021, Accepted: 13 December 2021

## Abstract

Epoxy resins usually have a brittle structure due to the cross-linked structure and poor resistance to crack growth. Therefore, increasing the toughness of epoxy resins in the presence of polymer nanoparticles is one of the fields of interest for the researchers. Studying the degradation of epoxy nanocomposites and modeling the degradation kinetics have become widely used as an essential tool for engineers to predict the thermal stability of materials before using in industry, which leads to reduction in costs and an increase in product quality. Surface modification of carbon nanotubes and dispersion of nanoparticles are two important factors in the thermal stability of epoxy nanocomposites in the presence of carbon nanotubes. Hybrid epoxy nanocomposite in the presence of multi-walled carbon nanotubes and clay nanoparticles showed that the simultaneous presence of these nanoparticles can act as a preventive agent against thermal degradation and increase the activation energy of the degradation reaction. In this article, the effect of carbon nanotubes on morphology, rheological and mechanical properties, thermal gravimetric analysis, thermal stability of epoxy resin, and modeling of degradation kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of carbon nanotubes are reviewed.

## Key Words

carbon nanotube,  
epoxy resin,  
degradation kinetics,  
modeling,  
thermal gravimetric analysis  
(TGA)

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: mr\_kalaei@azad.ac.ir

# مطالعه سینتیک تخریب گرمایی کامپوزیت‌های اپوکسی-نانولوله‌های کربنی

محمدحسین کرمی<sup>۱</sup>، محمدرضا کلایی<sup>۲\*</sup>

۱- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر،

صندوق پستی ۴۶۶-۱۹۵۸۵

۲- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، مرکز تحقیقات فناوری نانو

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۲

رزین‌های اپوکسی به‌علت ساختار شبکه‌ای و مقاومت ضعیف در برابر رشد ترک، معمولاً دارای ساختار شکننده‌ای هستند. بنابراین، افزایش چقرمگی رزین‌های اپوکسی با وجود نانوذرات پلیمری، از زمینه‌های مورد توجه پژوهشگران است. مطالعه تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و مدل‌سازی سینتیک تخریب به‌طور گسترده به ابزار اساسی برای مهندسان تبدیل شده است. با این کار می‌توان پایداری گرمایی مواد را پیش از به‌کارگیری در صنعت پیش‌بینی کرد که به کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت محصول منجر می‌شود. اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی و پراکنش نانوذرات دو عامل مهم در پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی است. نمونه هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوذرات رس نشان داد، وجود هم‌زمان نانولوله‌های کربنی و نانوذرات رس می‌تواند به‌عنوان عامل بازدارنده تخریب گرمایی عمل کند و انرژی فعال‌سازی واکنش تخریب را نسبت به نمونه دیگر افزایش دهد. در این مقاله، اثر نانولوله‌های کربنی بر شکل‌شناسی، خواص رئولوژیکی و مکانیکی، تجزیه گرموزن‌سنجی، پایداری گرمایی، رزین اپوکسی و مدل‌سازی سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در مجاورت نانولوله‌های کربنی مرور می‌شود.

بسیار ش  
فصلنامه علمی  
سال دوازدهم، شماره ۳،  
صفحه ۶۸-۷۷، ۱۴۰۱  
ISSN: 2252-0449

## چکیده



محمدحسین کرمی



محمدرضا کلایی

## واژگان کلیدی

نانولوله کربنی،  
رزین اپوکسی،  
سینتیک تخریب،  
مدل‌سازی،  
تجزیه گرموزن‌سنجی (TGA)

## مقدمه

رزین اپوکسی از مهم‌ترین پلیمرهای گرماسخت است که به دلیل مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی و مواد شیمیایی به عنوان چسب، پوشش و ماتریس در کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. همچنین در صنایع خودروسازی، قطعات الکتریکی و ساختمانی کاربرد فراوانی دارند [۱]. رزین‌های اپوکسی به علت اتصالات عرضی زیاد و مقاومت ضعیف در برابر رشد ترک، معمولاً دارای ساختار شکننده‌ای هستند. بنابراین، افزایش چقرمگی رزین‌های اپوکسی در مجاورت نانوذرات پلیمری از زمینه‌های مورد توجه پژوهشگران است. مطالعه تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی بسیار مهم است، زیرا می‌تواند طول عمر و محدوده دمایی را مشخص کند [۲]. مدل‌سازی سینتیک تخریب به‌طور گسترده به ابزار اساسی برای مهندسان تبدیل شده است که دوام گرمایی مواد را پیش از به‌کارگیری در صنعت پیش‌بینی می‌کند. همچنین، باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود و کیفیت محصول طراحی شده را افزایش می‌دهد [۳].

فولرن، نوعی مولکول کربن است که به شکل کره توخالی و سایر اشکال موجود است. فولرن‌های استوانه‌ای را نانولوله‌های کربنی می‌گویند که با توجه به تعداد حلقه‌های گرافن به دو نوع تک‌دیواره و چنددیواره تقسیم می‌شوند. نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره قطری نزدیک به ۱ nm دارند. طول آن‌ها می‌تواند چند برابر قطر باشد. همچنین، نانولوله‌های کربنی چنددیواره با ساختار بلوری بی‌نقص به شکل استوانه‌ای مستقیم هستند [۴]. نانولوله‌های کربنی در باتری‌های پرشدنی، قطعات خودرو، بدنه قایق‌ها و صافی‌ها استفاده می‌شوند [۵]. پراکنش نانولوله‌های کربنی با فراصوت‌دهی روش مناسبی نیست و روش غلتک‌زنی کوچک مناسب‌تر است. زیرا با توجه به ساختار، نانولوله‌های کربنی تخریب می‌شوند و طول مؤثر آن‌ها کاهش می‌یابد. نانولوله‌های کربنی چنددیواره به علت کم‌بودن مساحت سطح ویژه پراکنش مناسبی در رزین اپوکسی دارند. ولی، نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره به علت مساحت سطح ویژه زیاد پراکنش نامناسب دارند [۶].

از کاربردهای آزمون گرماوزن‌سنجی (TGA) بررسی سینتیک تخریب گرمایی پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. تغییرات وزن نمونه در اثر واکنش‌های تخریب اندازه‌گیری و مقدار درصد کاهش وزن ( $\alpha$ ) نمونه به درصد تبدیل ارتباط داده می‌شود. از آنجا که واکنش تخریب در این آزمون به زمان وابسته است، بنابراین با سینتیک واکنش مواجه می‌شویم. در نهایت با حل معادلات سینتیک تخریب، پارامترهای انرژی فعال‌سازی ( $E_a$ )، درجه واکنش ( $n$ ) به دست می‌آید [۴-۱]. سینتیک تخریب مواد پلیمری به سه روش،

مکمل، بی‌مدل و برازش مدل تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش برازش مدل، مدل‌های متفاوت بر داده‌های حاصل از تجزیه گرمایی برازش می‌شوند. مدلی که بیشترین مجموع مربعات خطا ( $R^2$ ) را داشته باشد، به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود. در این روش، انرژی فعال‌سازی و درجه واکنش به دست می‌آید. در روش بی‌مدل، فقط انرژی فعال‌سازی از شیب نمودار به دست می‌آید. در روش مکمل از ترکیب دو روش دیگر استفاده شده است و مدل‌های دقیق‌تری به دست می‌آیند [۸-۵]. پژوهش‌های بسیاری درباره سینتیک تخریب رزین اپوکسی و نانوذرات پلیمری انجام شده است. در این پژوهش‌ها درجه تخریب، سرعت واکنش تخریب به کمک معادلات سینتیک تخریب بررسی و تعیین می‌شوند. همچنین، دماهای اولیه و بیشینه تخریب و درصد زغال باقی‌مانده با تجزیه گرماوزن‌سنجی تعیین می‌شوند [۷،۸]. در ادامه، اثر نانولوله‌های کربنی بر شکل‌شناسی و خواص رئولوژیکی، مکانیکی و تجزیه گرماوزن‌سنجی، پایداری گرمایی، رزین اپوکسی و مدل‌سازی سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در مجاورت نانولوله‌های کربنی بررسی می‌شوند.

## مبانی نظری سینتیک حالت جامد

سرعت واکنش تخریب گرمایی برحسب درجه تخریب به صورت زیر است:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) \cdot f(\alpha) \quad (1)$$

که در آن،  $k$  ثابت سرعت واکنش تخریب و وابسته به دما و  $f(\alpha)$  تابع مدل سینتیکی است. ثابت سرعت در معادله (۱) به شکل معادله آرنیوس نوشته می‌شود:

$$k(T) = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2)$$

که  $A$  ضریب پیش‌نمایی و  $E_a$  انرژی فعال‌سازی بوده که به طور کلی تابع درجه تخریب هستند. انرژی فعال‌سازی به کمک روش هم‌تبدیلی با استفاده از شکل لگاریتمی معادله سینتیکی (۱) به دست می‌آید. در شرایط ناهم‌دما، دما با سرعت گرمایش  $B = dT/dt$  تغییر می‌کند و معادله سرعت واکنش تخریب به شکل زیر نوشته می‌شود [۹،۱۱]:

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln[Af(\alpha)] - \left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

مدل واکنش انتگرالی  $g(\alpha)$  به شکل معادله زیر ارائه می شود:

$$\varphi(Ea) = \sum_{i=1}^s \sum_{i \neq j}^s \frac{J(Ea, T_i(t_\alpha))}{J(Ea, T_j(t_\alpha))} \quad (5)$$

که در آن،  $s$  برابر با تعداد آزمون های انجام شده در شرایط ناهمدماست. در معادله (۵)،  $J$  برابر است با:

$$J(Ea, T_i(t_\alpha)) = \int_{t_{\alpha-\Delta\alpha}}^{t_\alpha} \exp\left[\frac{-Ea}{RT_i(t)}\right] dt \quad (6)$$

مدل های تجربی بسیاری برای توصیف مدل سازی سینتیک تخریب رزین های گرماسخت بررسی شده اند که مهم ترین آن ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در این معادلات،  $\alpha$  درجه تخریب،  $K_1$  و  $K_2$  ثابت های سرعت واکنش تخریب و پارامترهای  $m$  و  $n$  نماهای این واکنش هستند. همچنین  $T_m$ ، دمای بیشینه تخریب،  $R$  ثابت جهانی گازها  $t$  زمان تخریب بوده و  $\theta$  در معادله (۷) برابر با اختلاف دمای بیشینه تخریب و دمای تخریب است [۱۹-۱۳].

همچنین با توجه به معادلات (۱) و (۴)، توابع  $f(\alpha)$  و  $g(\alpha)$  برای مدل سازی سینتیک تخریب با توجه به مدل و سازوکار ارائه شده در جدول ۲، گزارش شده است.

### بررسی اثر نانولوله های کربنی بر درصد کاهش وزن رزین اپوکسی

Kim و همکاران [۱۷]، درصد کاهش وزن نانوکامپوزیت های اپوکسی دارای نانولوله های کربنی چنددیواره و نانولوله های کربنی اصلاح شده

$$g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{B} \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) dT \approx \frac{A}{B} \int_0^T \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) dT \quad (4)$$

پیش تر گفته شد، برای مطالعه سینتیک تخریب گرمایی از روش های برازش مدل، بی مدل و روش مکمل استفاده می شود. در روش برازش مدل، مدل های متفاوتی بر داده های حاصل از تجزیه گرمایی برازش داده می شوند. مدلی که بهترین برازش را داشته باشد، انتخاب می شود و مقدار انرژی فعال سازی و ضریب بسامد به دست می آید. در روش های بی مدل فقط انرژی فعال سازی گزارش می شود. در روش مکمل، مقدار انرژی فعال سازی از روش بی مدل به دست می آید و با روش برازش مدل مقایسه می شود. به عنوان مثال، مدل های دیفرانسیلی Freeman و Coats-Redfern از روش های برازش مدل بوده و روش های Ozawa، Vyazovkin و Kissinger جزء روش های بی مدل هستند و روش مکمل مقایسه روش Vyazovkin با Coats-Redfern است [۱۲، ۳، ۲].

با استفاده از روش هم تبدیلی، می توان انرژی فعال سازی را به شکل تابعی از میزان پیشرفت تخریب نشان داد. روش Vyazovkin، روشی بسیار دقیق و پیشرفته براساس روش هم تبدیلی است. در این روش، مدل ارائه شده مستقل از سرعت گرمادهی است و با حذف جمله های ثابت در هر سرعت گرمادهی، تابع  $\varphi(Ea)$  برای هر درصد از پیشرفت واکنش به دست می آید:

جدول ۱- مدل های سینتیک تخریب [۱۹-۱۳].

| معادله   | نام مدل          | نوع مدل |
|--|------------------|---------|
| $K_1(1-\alpha)^2 + K_2\alpha(1-\alpha)^2$ (۷)                      | Simon-Gillham    | بامدل   |
| $\ln \frac{B}{T_m^2} = C' + \left(\frac{-Ea}{RT_m}\right)$ (۸)     | Kissinger        | بی مدل  |
| $\ln B = C'' + \left(\frac{-Ea}{RT}\right)$ (۹)                    | Ozawa            | بی مدل  |
| $\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot (1-\alpha)^n$ (۱۰)                   | مرتبه $\ln$      | بامدل   |
| $\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m \cdot (1-\alpha)^n$ (۱۱)           | Sestak-Berggren  | بامدل   |
| $\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m) \cdot (1-\alpha)^n$ (۱۲) | Kamal            | بامدل   |
| $\ln[\ln(1-\alpha)^{-1}] = \frac{Et}{RT_{Max}^2} \theta$ (۱۳)      | Horowitz-Metzger | بامدل   |

| سازوکار سینتیک | $f(\alpha)$                        | $g(\alpha)$  | مدل                       |
|----------------|------------------------------------|--|---------------------------|
| A2             | $[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$           | $2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$               | معادله Avrami (n=۲)       |
| A3             | $[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$           | $3(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{2/4}$               | معادله Avrami (n=۳)       |
| A4             | $[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$           | $4(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{3/4}$               | هسته‌گذاری و رشد (Avrami) |
| R2             | $[1 - (1-\alpha)^{1/2}]$           | $[2(1-\alpha)^{1/2}]$                              | استوان‌های (انقباضی)      |
| R3             | $[1 - (1-\alpha)^{1/3}]$           | $[3(1-\alpha)^{2/3}]$                              | کروی (انقباضی)            |
| D1             | $\alpha^2$                         | $1/2\alpha^{-1}$                                   | 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             | $\alpha$                           | ۱  | درجه صفر                  |
| F3             | $[-1 + (1-\alpha)^{-2}]$           | $(1-\alpha)^3$                                     | هسته‌گذاری تصادفی         |

Li و همکاران [۲۰]، مقایسه رفتار تخریب گرمایی نمونه رزین اپوکسی-پلی‌اتر سولفون-نانولوله‌های کربنی چنددیواره-الیاف کربن را در مقایسه با نمونه رزین اپوکسی-پلی‌اتر سولفون-الیاف کربن را در محیط نیتروژن و از دمای محیط تا  $800^\circ\text{C}$  بررسی کردند. نتایج نشان داد، افزودن نانولوله‌های کربنی به نمونه رزین اپوکسی-پلی‌اتر سولفون-الیاف کربن، پایداری گرمایی را افزایش نمی‌دهد. همچنین، زغال باقی‌مانده در هر دو نمونه برابر ۶۵٪ بوده و سازوکار تخریب گرمایی هر دو نمونه به‌طور تک‌مرحله‌ای است. Xue و همکاران [۲۱]، تجزیه گرموزن‌سنجی نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی در مجاورت نانولوله‌های کربنی چنددیواره و هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی در مجاورت نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوذرات رس در محیط نیتروژن و از دمای  $50^\circ\text{C}$  تا  $800^\circ\text{C}$  را بررسی کردند. نتایج نشان داد، دمای اولیه تخریب ( $T_s$ ) هر دو نمونه مشابه است و همچنین با افزودن نانوذرات رس به رزین اپوکسی-نانولوله‌های کربنی چنددیواره، درصد زغال باقی‌مانده نمونه هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی افزایش یافته است. این بدان معناست، این نمونه پایداری گرمایی بیشتری دارد و وجود نانوذرات رس می‌تواند به‌عنوان یک عامل بازدارنده تخریب گرمایی عمل کند. Puglia و همکاران [۲۲]، به مطالعه تجزیه گرموزن‌سنجی

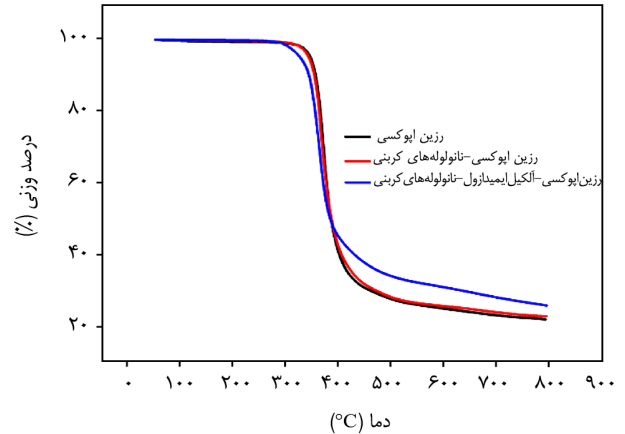
با گروه سیلان را در محیط نیتروژن از دمای محیط تا  $800^\circ\text{C}$  بررسی کردند. نتایج نشان داد، پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده با گروه سیلان افزایش یافته است. همچنین، زغال باقی‌مانده از نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده نسبت به نمونه دیگر افزایش داشته که به‌علت گروه سیلانی موجود در نانولوله‌های کربنی است. وجود این گروه، باعث افزایش درجه شبکه‌ای شدن می‌شود و عامل بازدارنده تخریب گرمایی است. Špitalský و همکاران [۱۸]، پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و اصلاح‌شده با گروه آمینی را در محیط نیتروژن از دمای محیط تا  $800^\circ\text{C}$  بررسی کردند. نتایج تجزیه گرموزن‌سنجی نشان داد، نمونه نانوکامپوزیت اصلاح‌شده تفاوتی با نمونه دیگر ندارد و هر دو نمونه پایداری گرمایی یکسانی دارند. Ventura و همکاران [۱۹]، به بررسی تجزیه گرموزن‌سنجی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح‌شده با گروه کربوکسیل و رزین اپوکسی-نانولوله‌های کربنی چنددیواره در محیط نیتروژن و در دمای  $40^\circ\text{C}$  تا  $800^\circ\text{C}$  پرداختند. نتایج نشان داد، اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی با گروه کربوکسیل باعث افزایش پایداری گرمایی نمی‌شود و دو نمونه رفتار تخریب گرمایی مشابهی دارند.

جدول ۳- دمای بیشینه تخریب و درصد زغال باقی مانده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  نمونه رزین اپوکسی-کربوکسیل آکریلونیتریل بوتادیان و نمونه اپوکسی-کربوکسیل آکریلونیتریل بوتادیان با درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح شده با گروه کربوکسیل [۲۶].

| مقدار زغال باقی مانده (%) | دمای بیشینه تخریب ( $^{\circ}\text{C}$ ) | مقدار نانولوله‌های کربنی اصلاح شده (%wt) |
|---------------------------|--|--|
| ۳/۲                       | ۳۹۷                                      | ۰  |
| ۳/۹                       | ۳۹۵                                      | ۰/۵                                      |
| ۵/۳                       | ۳۹۵                                      | ۱  |
| ۸/۲                       | ۳۹۳                                      | ۲  |

کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، وجود هم‌زمان نانولوله‌های کربنی و نانوذرات رس می‌تواند باعث افزایش نقاط شبکه‌ای شدن شود و به شکل عامل بازدارنده در برابر تخریب گرمایی عمل کند که باعث افزایش پایداری گرمایی می‌شود. Cividanes و همکاران [۲۵]، دمای بیشینه تخریب رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح شده با گروه آمینی را مقایسه کردند. نتایج نشان داد، آن‌ها رفتار تخریب گرمایی مشابهی دارند. Wang و همکاران [۲۶] به بررسی دمای بیشینه تخریب و درصد زغال باقی مانده نمونه رزین اپوکسی-کربوکسیل آکریلونیتریل بوتادیان (CTBN) و نمونه اپوکسی-کربوکسیل آکریلونیتریل بوتادیان-نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح شده با گروه کربوکسیل پرداختند (جدول ۳). نتایج نشان داد، هر دو نمونه بیشینه دمای تخریب یکسانی دارند و نانوکامپوزیت اصلاح شده با افزایش غلظت درصد زغال باقی مانده را افزایش می‌دهد. هر دو نمونه دارای سازوکار تخریب یک مرحله‌ای هستند و برهم‌کنش قوی میان رزین اپوکسی و نانولوله‌های کربنی اصلاح شده وجود دارد.

Kudus و همکاران [۲۷] میانگین درصد زغال باقی مانده و دمای  $10\%$  کاهش وزن ( $T_{10}$ ) نمونه‌های رزین اپوکسی خالص و ۱، ۳ و  $5\%$  وزنی نانولوله‌های کربنی-آلومینا را بررسی کردند (جدول ۴). نتایج نشان داد، با افزایش  $1\%$  وزنی نانولوله‌های کربنی-آلومینا به رزین اپوکسی، دمای  $10\%$  کاهش وزن تغییر نمی‌کند. همچنین با افزایش به مقدار ۳ و  $5\%$  وزنی، دمای  $10\%$  کاهش وزن افزایش می‌یابد. مقدار میانگین زغال باقی مانده رزین اپوکسی در دمای



شکل ۱- نمودار تخریب گرمایی گرمایی نمونه‌های رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و حاوی نانولوله‌های کربنی چنددیواره و عامل پراکنش یونی آلکیل ایمیدازول [۲۳].

نانوکامپوزیت اپوکسی دارای ۵ و  $10\%$  وزنی نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و رزین اپوکسی خالص پرداختند. نتایج نشان داد، وجود نانولوله‌های کربنی باعث کاهش پایداری گرمایی می‌شود و رزین اپوکسی خالص پایداری گرمایی بیشتری در مقایسه با نانوکامپوزیت اپوکسی دارد. شکل ۱، نتایج بررسی Zheng و همکاران [۲۳] درباره تخریب گرمایی رزین اپوکسی را برای نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و عامل پراکنش یونی آلکیل ایمیدازول در محیط نیتروژن، از دمای محیط تا  $800^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، دمای اولیه تخریب رزین اپوکسی (دمای  $5\%$  کاهش وزن) بیش از نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره است. این بدان معناست، نانولوله‌های کربنی چنددیواره باعث کاهش پایداری گرمایی رزین اپوکسی شده است. همچنین با افزودن عامل پراکنش یونی به نانوکامپوزیت اپوکسی و با توجه به پراکنش بهتر نانولوله‌های کربنی در ماتریس رزین اپوکسی و عدم تحرک مولکولی، پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی نسبت به سایر نمونه‌ها در دمای  $385^{\circ}\text{C}$  افزایش می‌یابد. درصد زغال باقی مانده نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و عامل پراکنش نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بوده که به علت وجود فسفر در ترکیب عامل پراکنش یونی است.

Aradhana و همکاران [۲۴]، تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نمونه هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوذرات رس را در محیط نیتروژن در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  تا  $800^{\circ}\text{C}$  بررسی

جدول ۴- میانگین درصد زغال باقی مانده و دمای ۱۰٪ کاهش وزن ( $T_{10}$ ) نمونه‌های رزین اپوکسی خالص و ۱، ۳ و ۵٪ وزنی نانولوله‌های کربنی-آلومینا [۲۷].

| نمونه                                  | $T_{10}$ (°C) | مقدار زغال باقی مانده در دمای ۸۰۰ °C (%) |
|--|---------------|--|
| رزین اپوکسی                            | ۲۰۹/۶۶        | ۸/۱۹                                     |
| اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-آلومینا (۱٪) | ۲۰۹/۱۰        | ۹/۶۵                                     |
| اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-آلومینا (۳٪) | ۲۳۰           | ۱۱/۱۳                                    |
| اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-آلومینا (۵٪) | ۲۳۹/۴۳        | ۱۲/۵۹                                    |

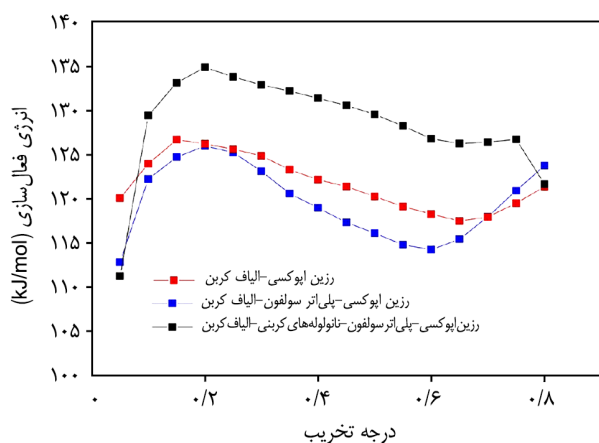
باعث منع تبادل انرژی با سامانه می‌شود [۲۹].

### اثر نانولوله‌های کربنی بر انرژی فعال‌سازی واکنش تخریب رزین اپوکسی

Ventura و همکاران [۱۹] سینتیک تخریب رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح‌شده با گروه کربوکسیل را بررسی کردند. نتایج نشان داد، با افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده به رزین اپوکسی خالص، انرژی فعال‌سازی افزایش می‌یابد. این بدان معناست که پایداری گرمایی بیشتر می‌شود. Li و همکاران [۲۰] انرژی فعال‌سازی و تغییرات درجه تخریب، نمونه‌های رزین اپوکسی-الیاف کربن و رزین اپوکسی-پلی‌اتر سولفون-الیاف کربن و رزین اپوکسی-پلی‌اتر سولفون-نانولوله‌های کربنی چنددیواره-الیاف کربن (شکل ۲) را بررسی کردند. نتایج نشان داد، نمونه حاوی نانولوله‌های کربنی،

۸۰۰ °C برابر با ۸/۱۹٪ است. افزودن هم‌زمان ۱، ۳ و ۵٪ وزنی نانولوله‌های کربنی-آلومینا به رزین اپوکسی (هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی) باعث افزایش مقدار میانگین زغال باقی مانده می‌شود که به ترتیب برابر با مقدار ۹/۶۵، ۱۱/۱۳ و ۱۲/۵۹٪ است. وجود نانولوله‌های کربنی-آلومینا در ماتریس رزین اپوکسی باعث افزایش پایداری گرمایی شده و باعث تأخیر در شکستن زنجیرها بر اثر تخریب گرمایی می‌شود که به دلیل ایجاد مسیر پریچ و خم تشکیل شده است.

Wang و همکاران [۲۸]، درصد کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی دارای ۱ و ۳٪ وزنی نانولوله‌های کربنی و نانولوله‌های کربنی غنی از اکسیژن و غنی در لبه (rich in edges) را بررسی کردند. نتایج نشان داد، کاهش وزن در نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی در دمای کمتر از ۱۰۰ °C مشاهده نمی‌شود. در حالی که کاهش وزن آهسته و جزئی در ۲۰۰ °C مشاهده شد و دمای ۳۰۰ °C آغاز درصد کاهش وزن نمونه‌ها ( $T_5$ ) است. در دمای ۳۰۰ °C تا ۴۷۵ °C نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی دارای ۱ و ۳٪ وزنی نانولوله‌های کربنی غنی در لبه، پایداری گرمایی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داد. علی و همکاران [۲۹]، مشتق وزن‌سنجی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارای ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵٪ وزنی نانولوله‌های کربنی و سخت‌کننده دی‌آمینودی‌فنیل‌متان (DDM) را بررسی کردند. نتایج نشان داد، تخریب گرمایی در محیط نیتروژن در محدوده دمایی ۳۸۵ °C تا ۴۵۰ °C اتفاق می‌افتد و با تغییر درصد وزنی نانوذرات پلیمری به رزین اپوکسی، دمای بیشینه تخریب گرمایی ( $T_m$ ) تغییر چشمگیری ندارد. با تغییر هم‌ارز شیمیایی سخت‌کننده و رزین اپوکسی، چگالی پلیمر شدن واکنش کاهش می‌یابد که به کاهش DTG منجر می‌شود. همچنین، وجود نانوذرات به‌عنوان عامل پخت دیگر عمل می‌کند و ممکن است بر سرعت پخت نانوکامپوزیت‌ها اثر بگذارد. به دلیل برهم‌کنش مناسب رزین اپوکسی و نانولوله‌های کربنی است که



شکل ۲- نمودار انرژی فعال‌سازی و تغییرات درجه تخریب نمونه‌های رزین اپوکسی-الیاف کربن (CF/Epoxy)، رزین اپوکسی-پلی‌اتر سولفون-الیاف کربن (Epoxy/PES/CF) و رزین اپوکسی-پلی‌اتر سولفون-نانولوله‌های کربنی چنددیواره-الیاف کربن (Epoxy/PES/CF/MWCNT) [۲۰].

جدول ۵- بررسی مدل‌های ارائه شده برای سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی.

| مرجع    | مدل ارائه شده   | اجزای سازنده نانوکامپوزیت اپوکسی                                 |
|---------|-----------------|--|
| ۱۹      | Kissinger       | نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح شده با گروه کربوکسیل          |
| ۲۰      | Ozawa           | پلی‌اتر سولفون-نانولوله‌های کربنی چنددیواره-الیاف کربن           |
| ۲۴ و ۲۱ | Kissinger-Ozawa | نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوذرات رس (هیبرید نانوکامپوزیت) |
| ۲۳      | Sestak-Berggren | نانولوله‌های کربنی چنددیواره و عامل پراکنش یونی آلکیل ایمیدازول  |

### نتیجه گیری

بررسی اثر نانولوله‌های کربنی بر پایداری گرمایی نانولوله‌های کربنی نشان داد، اصلاح سطح با گروه سیلانی و افزودن عامل پراکنش آلکیل ایمیدازول به رزین اپوکسی، باعث افزایش پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌شود. بررسی سینتیک تخریب رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح شده با گروه کربوکسیل نشان داد، با افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح شده به رزین اپوکسی خالص، انرژی فعال سازی افزایش می‌یابد. این بدان معناست که پایداری گرمایی افزایش می‌یابد. همچنین، وجود هم‌زمان نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوذرات رس در ماتریس رزین اپوکسی با توجه به پراکنش مناسب نانوذرات رس و نانولوله‌های کربنی و ساختار هیبریدی و شبکه‌ای باعث افزایش انرژی فعال سازی واکنش تخریب می‌شود. بررسی مدل سازی سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در مجاورت نانولوله‌های کربنی اصلاح شده و نشده نشان داد، مدل‌های Kissinger و Ozawa بیشترین استفاده را در سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارند. همچنین با توجه به کم بودن مقالات پژوهشی در حوزه مدل سازی سینتیک تخریب گرمایی، پژوهش و مطالعه بیشتری درباره ارائه بهترین مدل برای مدل سازی سینتیک تخریب گرمایی و تحلیل و بررسی داده‌های آزمایشگاهی با مدل ارائه شده لازم است. در این مقاله مشخص شد، وجود نانولوله‌های کربنی باعث کاهش درصد زغال باقی مانده می‌شود و به عنوان عامل بازدارنده، تخریب گرمایی رزین اپوکسی را کاهش می‌دهد. همچنین، عواملی چون درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در ماتریس رزین اپوکسی، سرعت گرمایش، نوع سخت کننده و محیط تخریب گرمایی (اکسیژن یا نیتروژن)، وجود هم‌زمان دو نوع نانوذره در رزین اپوکسی (هیبرید نانوکامپوزیت) بر بررسی اثر تخریب گرمایی نانولوله‌های کربنی-رزین اپوکسی مؤثر است.

انرژی فعال سازی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. این افزایش، به دلیل وجود نانولوله‌های کربنی است که الیاف کربن را پوشش داده و پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد.

Xue و همکاران [۲۱]، در پژوهش دیگری انرژی فعال سازی نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوذرات رس را بررسی کردند. نتایج نشان داد، نمونه حاوی نانوذرات رس نسبت به نمونه دیگر، انرژی فعال سازی را افزایش می‌دهد. این افزایش به علت پراکنش مناسب نانوذرات رس و نانولوله‌های کربنی و ساختار هیبریدی و شبکه‌ای نانوکامپوزیت اپوکسی است. Aradhana و همکاران [۲۴]، به مطالعه انرژی فعال سازی نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوذرات رس پرداختند. نتایج نشان داد، وجود هم‌زمان دو نوع نانوذره پلیمری می‌تواند به عنوان عامل بازدارنده در برابر تخریب گرمایی عمل کند و انرژی فعال سازی واکنش تخریب را در مقایسه با سایر نمونه‌ها افزایش می‌دهد.

### بررسی مدل‌های ارائه شده برای سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی

در جدول ۵، مدل‌های ارائه شده برای سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد، برای بررسی سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی اصلاح شده و نشده از مدل‌های گوناگونی استفاده می‌شود. مدل‌های Kissinger و Ozawa، بیشترین استفاده را برای سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی دارند [۴۳-۳۰]. همچنین، برای مدل سازی سینتیک تخریب نمونه نانولوله‌های کربنی چنددیواره و عامل پراکنش یونی آلکیل ایمیدازول از مدل Sestak-Berggren استفاده می‌شود [۲۳].



نانولوله‌های کربنی شده و باعث افزایش مقاومت گرمایی می‌شود.

در بیشتر موارد، اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی باعث تأخیر در سرعت تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با

## مراجع

- Ahmadi Z., Epoxy in Nanotechnology: A Short Review, *Prog. Org. Coat.*, **132**, 445-448, 2019.
- Zabihi O., Khayyam H., Fox B.L., and Naebe M., Enhanced Thermal Stability And Lifetime of Epoxy Nanocomposites Using Covalently Functionalized Clay: Experimental and Modelling, *New J. Chem.*, **39**, 2269-2278, 2015.
- Dzuhri S., Uhana N.Y., and Khairulazfar M., Thermal Stability and Decomposition Study of Epoxy/Clay Nanocomposites, *Sains Malays*, **44**, 441-448, 2015.
- Singh S., Srivastava V.K., and Prakash R.R., Characterisation of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites, *Mater. Sci. Technol.*, **29**, 1130-1134, 2013.
- Chen H.O., Jacobs B., Wua W.G., Rudiger B., and Schadel B., Effect of Dispersion Method on Tribological Properties of Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites, *Polym. Test.*, **26**, 351-360, 2007.
- Ton-That M.T., Ngo T.-D., Ding P., Fang G., Cole K.C., and Hoa S.V., Epoxy Nanocomposites: Analysis and Kinetics of Cure, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 1132-1141, 2004.
- Tezel G.B., Sarmah A., Desai S.A., Vashiṣṭh M., and Green J., Kinetics of Carbon Nanotube-loaded Epoxy Curing: Rheometry, Differential Scanning Calorimetry, and Radio Frequency Heating, *Carbon*, **175**, 1-10, 2021.
- Ngo T.-D., That T., Hoa M.T., and Cole K.C., Curing Kinetics and Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites Based on Different Organoclays, *Polym. Eng. Sci.*, **47**, 649-661, 2007.
- Jin F.L., Li X., and Park S.J., Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review, *J. Ind. Eng. Chem.*, **29**, 1-11, 2015.
- Schlagenhau F.L., Kuo Y.Y., Bahk Y.K., Nüesch F., and Wang J., Decomposition and Particle Release of a Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposite at Elevated Temperatures, *J. Nanoparticle Res.*, **17**, 440, 2015.
- Zhou Y.X., Wu P.X., Cheng Z.Y., Ingram J., and Jeelani S., Improvement in Electrical, Thermal and Mechanical Properties of Epoxy by Filling Carbon Nanotube, *Express Polym. Lett.*, **2**, 40-48, 2008.
- Kim J.A., Seong D.G., Kang T.J., and Youn J.R., Effects of Surface Modification on Rheological and Mechanical Properties of CNT/Epoxy Composites, *Carbon*, **44**, 1898-1905, 2006.
- Málek J., A Computer Program for Kinetic Analysis of Non-isothermal Thermoanalytical Data, *Thermochim. Acta*, **138**, 337-346, 1989.
- Málek J., The Kinetic Analysis of Non-isothermal Data, *Thermochim. Acta*, **200**, 257-269, 1992.
- Reso D., Cascaval C.N., Muṣṭata F., and Ciobanu C., Cure Kinetics, Epoxy Resins Studied by Nonisothermal DSC Data, *Thermochim. Acta*, **383**, 119-127, 2002.
- Vyazovkin S., Burnham A.K., Favergeon L., Koga N., Moukhina E., Luis A., Pérez-Maqueda L.A., and Sbirrazzuoli N., ICTAC Kinetics Committee Recommendations for Analysis of Multi-step Kinetics, *Thermochim. Acta*, **689**, 178597, 2020.
- Ma P.C., Kim J.K., and Tang B.Z., Effects of Silane Functionalization on the Properties of Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposites, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 2965-2972, 2007.
- Špitalský Z., Matějka L., Šlouf M., Konyushenko E.N., Kovářová J., Zemek J., and Kotek J., Modification of Carbon Nanotubes and Its Effect on Properties of Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposites, *Polym. Compos.*, **30**, 1378-1387, 2009.
- Ventura I.A., Rahaman A., and Lubineau G., The Thermal Properties of a Carbon Nanotube-Enriched Epoxy: Thermal Conductivity, Curing, and Degradation Kinetics, *J. Appl. Polym. Sci.*, **130**, 2722-2733, 2013.
- Li C., Kang N.J., Labrandero S.D., Wan J., González C., and Wang D.Y., Synergistic Effect of Carbon Nanotube and Polyethersulfone on Flame Retardancy of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**, 1040-1047, 2014.
- Xue Y., Shen M., Zeng S., Zhang W., Hao L., Yang L., and Song P., A Novel Strategy for Enhancing the Flame Resistance, Dynamic Mechanical and the Thermal Degradation Properties of Epoxy Nanocomposites, *Mater. Res. Express*, **6**, 125003, 2019.
- Puglia D., Valentini L., and Kenny J.M., Analysis of the Cure Reaction of Carbon Nanotubes/Epoxy Resin Composites Through Thermal Analysis and Raman Spectroscopy, *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 452-458, 2003.
- Zheng X., Li D., Feng C., and Chen X., Thermal Properties and Non-isothermal Curing Kinetics of Carbon Nanotubes/Ionic Liquid/Epoxy Resin Systems., *Thermochim. Acta*, **618**, 18-25, 2015.
- Aradhana R., Mohanty S., and Nayak S.K., High Performance

- Epoxy Nanocomposite Adhesive: Effect of Nanofillers on Adhesive Strength, Curing and Degradation Kinetics, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **84**, 238-249, 2018.
25. Cividanes L.S., Simonetti E.A., Campos T.M., Bettoni T.S., Brunelli D.D., and Thim G.P., Anomalous Behavior of Thermal Stability of Amino-carbon Nanotube-Epoxy Nanocomposite, *J. Compos. Mater.*, **49**, 3067-3073, 2015.
26. Wang Y.T., Wang C.S., Yin H.Y., Wang L.L., Xie H.F., and Cheng R.S., Carboxyl-Terminated Butadiene-Acrylonitrile-Toughened Epoxy/Carboxyl-Modified Carbon Nanotube Nanocomposites: Thermal and Mechanical Properties, *Express Polym. Lett.*, **6**, 719-728, 2012.
27. Starink M.J., The Determination of Activation Energy from Linear Heating Rate Experiments: A Comparison of the Accuracy of Isoconversion Methods, *Thermochim. Acta*, **404**, 163-176, 2003.
28. Karami M.H., Kalae M.R., Mazinani S., Martínez V.G., Wellen R.M.R., Shanmugaraj A.M. et al., 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, 9-12 November, 9-10, 2020.
29. Karami M.H. and Kalae M.R., Curing of Epoxy/UFNBRP Nano Composites Using Calorimetric Method, *Proceeding of the 11th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2020)*, Tehran University, 15-17 April, 15-17, 2020.
30. Karami M.H., Kalae M.R., and Mazinani S., Chemorheology of Nano Acrylonitrile Butadiene Rubber (n-NBR)/Epoxy Nanocomposites, *Proceeding of the 1st International Conference on Rheology (ICOR 2019)*, Iran Polymer and Petrochemical Institute, 17-18 December, 104-105, 2019.
31. Karami M.H. and Kalae M.R., 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, 3 March, 234-241, 2019.
32. Karami M.H. and Kalae M.R., 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, 3 March, 209-216, 2020.
33. Karami M.H. and Kalae M.R., A Review of the Applications of Cross-Linked Elastomeric Nanoparticles, *Iran Rubb. Mag. (Persian)*, **25**, 37-56, 2020.
34. Karami M.H. and Kalae M.R., A Review of the Curing Kinetics of Epoxy Nanocomposites/Nanoclay, *Iran Polym. Technol. Res. Develop. (Persian)*, **6**, 29-38, 2021.
35. Karami M.H. and Kalae M.R., Review of Degradation Kinetics of Epoxy Nanocomposites in the Presence of Clay Nanoparticles, *Polymerization (Persian)*, **11**, 65-76, 2021.
36. Karami M.H. and Kalae M.R., Review of Curing Kinetics of Epoxy Nanocomposites in the Presence of Iron Oxide Nanoparticles, *Polymerization (Persian)*, **11**, 34-43, 2021.
37. Karami M.H. and Kalae M.R., Investigation of the Effect of Carbon Nanotubes on Modeling of Curing Kinetics of Epoxy Resin, *J. Sci. Eng. Elites (Persian)*, **6**, 162-175, 2021.
38. Wang Q., Su S.H., and Wang D.Y., Carbon Nanotube/Epoxy Composites for Improved Fire Safety, *ACS Appl. Nano Mater.*, **3**, 4253-4264, 2020.
39. Ali F., Ishfaq N., Said A., Nawaz Z., Ali Z., Ali N., Afzal A., and Muhammad Bilal M., Fabrication, Characterization, Morphological and Thermal Investigations of Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced Epoxy Nanocomposites, *Prog. Org. Coat*, **150**, 105962, 2021.
40. Abdul Kudus M.H., Zakaria M.R., Omar M.F., Hafiz Othman M.B., Md. Akil H., Nabiałek M., Jež B., and Al Bakri Abdullah M.M., Nonisothermal Kinetic Degradation of Hybrid CNT/Alumina Epoxy Nanocomposites, *Metals*, **11**, 657, 2021.
41. Karami M.H., Kalae M.R., Khajavi R., Moradi O., and Zaarei D., 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.
42. Karami M.H., Kalae M.R., Khajavi R., Moradi O., and Zaarei D., 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.
43. Karami M.H., Kalae M.R., Khajavi R., Moradi O., and Zaarei D., Thermal Stability and Thermal Degradation of Epoxy Nanocomposite in the Presence of Full Vulcanized Elastomeric Nanoparticles, *Adv. Mater. Novel Coat. (Persian)*, **10**, 2758-2770, 2021.