

## بررسی تحلیلی جدایش بین فازی در نانوکامپوزیت پلیمری تقویت شده با گرافن با استفاده از مدل ناحیه ی چسبناک

سید مقداد حیدرهائی<sup>۱</sup>، محمود شریعتی<sup>۲</sup>، حمیدرضا ایپک چی<sup>۳</sup>

۱-۳ دانشکده ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

در مطالعه ی حاضر، یک مدل تاخیر برشی برای بررسی جدایش بین فازی در نانوکامپوزیت پلیمری تقویت شده توسط گرافن، با مدل ناحیه ی چسبناک ترکیب شده است. رفتار فاز واسط بین ماتریس و تقویت کننده توسط یک قانون تنش - جدایش دو خطی شبیه سازی و پارامترهای مدل ناحیه ی چسبناک به گونه ای انتخاب شده است که منعکس کننده ی رفتار ناحیه ی بین فازی غیر پیوندی باشد. تغییر طول ناحیه های آسیب دیده و جدا شده به ازای مقادیر مختلف تنش های اعمالی، بدست آمده است. نتایج نشان می دهند که پس از اعمال تنش ی تحت عنوان تنش بحرانی دوم، جدایش در حدود ۷۵٪ ناحیه ی بین فازی گرافن و ماتریس رخ داده و بنابراین انتقال تنش در این ناحیه متوقف می شود.

**واژه های کلیدی:** گرافن - نانوکامپوزیت پلیمری - جدایش بین فازی - مدل تاخیر برشی - مدل ناحیه ی چسبناک

### مقدمه

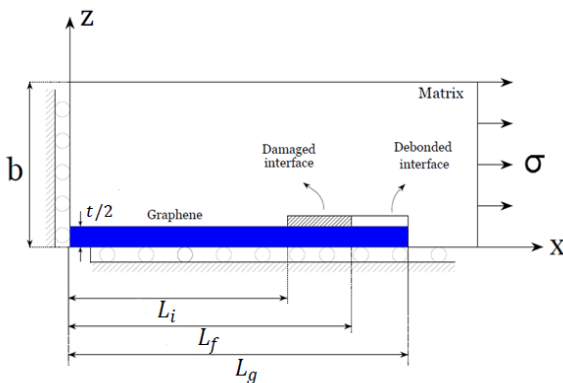
به خاطر خواص خارق العاده ی گرافن [۱] و مزایای این تقویت کننده نسبت به نانولوله های کربنی از جمله قیمت کمتر، توزیع بهتر در ماتریس و بهبود بیشتر خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل [۲]، این ماده در کانون توجه محققین قرار گرفته است. رفیعی و همکارانش ۵۳٪ افزایش در چقرمگی شکست را تنها با افزودن ۱٪ درصد وزنی گرافن به اپوکسی گزارش کرده اند [۲].

مطالعه ی رفتار فاز واسط و پیشروی آسیب در این ناحیه برای درک بهتر رفتار کلی نانوکامپوزیت از اهمیت بسیاری برخوردار است. چن (Chen) و یان (Yan) [۳] با بکارگیری مدل تاخیر برشی به بررسی انتقال تنش در یک نانوکامپوزیت حاوی نانولوله ی کربنی با کمک مدل ناحیه چسبناک پرداختند. صفایی و همکارانش [۴] با استفاده از مدل ناحیه ی چسبناک و به کمک مدل المان محدود به بررسی آسیب در ناحیه ی بین فازی نانوکامپوزیت پرداختند. گوئو (Guo) و ژو (Zhu) [۵] با کمک مدل ناحیه ی چسبناک به بررسی انتقال بار بین یک گرافن و بستر پلیمری پرداختند.

از آنجا که مطالعات اندکی در مورد پدیده ی جدایش و پیشروی آن در ناحیه ی بین فازی نانوکامپوزیت حاوی گرافن صورت گرفته، در مقاله ی حاضر یک مدل تحلیلی با کمک مدل های تاخیر برشی و ناحیه ی چسبناک برای بررسی پدیده ی جدایش گرافن از ماتریس ارائه شده است. نتایج در قالب تغییرات طول ناحیه ی آسیب دیده و جدا شده از فاز واسط در برابر تنش اعمالی مورد بررسی قرار گرفته است.

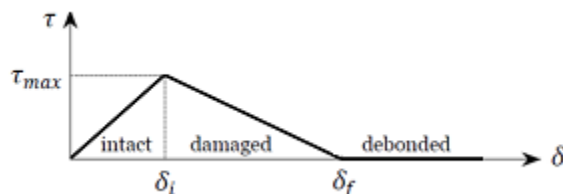
### مدل تاخیر برشی

در شکل ۱ مدل یک چهارم از المان حجمی معرف نانوکامپوزیت شامل ماتریس، گرافن و فاز واسط نشان داده شده است.



شکل ۱- مدل یک چهارم از المان حجمی معرف نانوکامپوزیت

رفتار فاز واسط توسط یک رابطه ی دو خطی همانند شکل ۲ شبیه سازی شده و پارامترهای مربوطه در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲- نمودار تنش - جدایش دوخطی برای شبیه سازی فاز واسط

جدول ۱- پارامترهای مدل ناحیه ی چسبناک

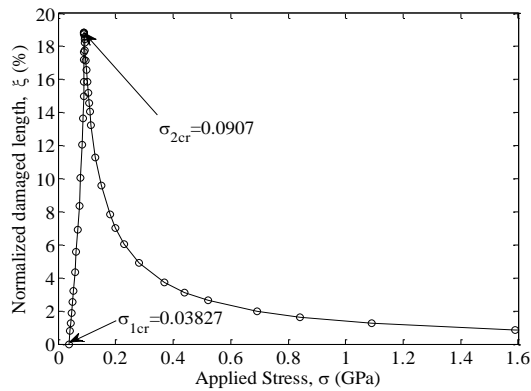
$G_c$ [ $J/m^2$ ]	$\tau_{max}$ [MPa]	$\delta_i$ [nm]	$\delta_f$ [nm]
۰/۰۵	۳۰	۰/۳	۳/۳۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک

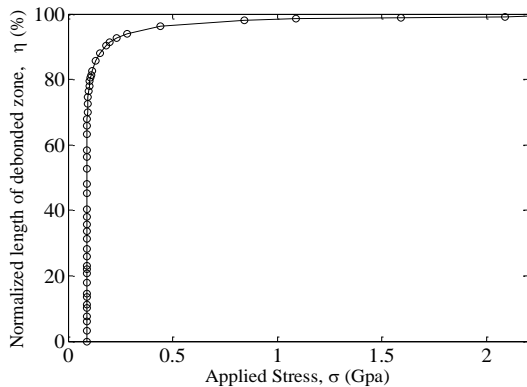
۲- استاد مهندسی مکانیک، ۰۵۱۳۸۸۰۵۱۵۹، mshariati44@um.ac.ir (نویسنده

مخاطب)

۳- دانشیار مهندسی مکانیک



شکل ۳- تغییرات طول ناحیه ی آسیب دیده در فاز واسط در مقابل تنش اعمالی



شکل ۴- تغییرات طول ناحیه ی جدا شده گرافن در مقابل تنش اعمالی

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدل تاخیر برشی-ناحیه ی چسبناک بر ای بررسی پدیده- ی آسیب بین فازی در نانوکامپوزیت گرافن/اپوکسی نشان می دهند که:

- جدایش از لبه ی گرافن ( $x=L_g$ ) شروع می شود و نواحی مرکزی مقاومت بیشتری از خود نشان می دهند.
- با افزایش بسیار اندک تنش اعمالی پس از تنش بحرانی دوم، حدود ۷۵٪ گرافن از ماتریس ج دا می شود، بنا براین گرافن کارآمدی خود به عنوان تقویت کننده را در این ناحیه از دست خواهد داد.

### مراجع منتخب

- [1] Rasool, H.I., et al., 2013. "Measurement of the intrinsic strength of crystalline and polycrystalline graphene". *Nature communications*, 4.
- [2] Rafiee, M.A., et al., 2009. "Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content". *ACS nano*, 3(12), pp. 3884-3890.
- [3] Chen, Z. and W. Yan, 2015. "A shear-lag model with a cohesive fibre-matrix interface for analysis of fibre pull-out". *Mechanics of Materials*, 91, pp. 119-135.
- [4] Safaei, M., et al., 2015. "An interfacial debonding-induced damage model for graphite nanoplatelet polymer composites". *Computational Materials Science*, 96, pp. 191-199.
- [5] Guo, G. and Y. Zhu, 2015. "Cohesive-Shear-Lag Modeling of Interfacial Stress Transfer Between a Monolayer Graphene and a Polymer Substrate". *Journal of Applied Mechanics*, 82(3), pp. 031005.

معادله ی دیفرانسیل حاکم بر المان حجمی که از بررسی معادلات

تبادل در گرافن و ماتریس بدست می آید، به صورت زیر می باشد:

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} + \left[ \frac{1}{E_g} + \frac{t}{E_m(2b-t)} \right] \left( -\frac{2}{t} \tau_i \right) = -\frac{1}{6} \left[ \frac{t}{G^{(g)}} + \frac{(2b-t)}{G^{(m)}} \right] \frac{d^2 \tau_i}{dx^2} \quad (1)$$

که E و G به ترتیب مدول یانگ و مدول برشی و زیر نویس های g و m به ترتیب مربوط به گرافن و ماتریس هستند.

حل معادله ی دیفرانسیل فوق برای سه حالت کلی انجام شده است:

- حالتی که تمام فاز واسط سالم است و بار به گرافن منتقل می شود.
- حالتی که بخشی از فاز واسط سالم و بخشی آسیب دیده است.
- حالتی که فاز واسط شامل سه قسمت سالم، آسیب دیده و جدا شده می باشد.

شرایط مرزی برای جابجایی لغزشی بین گرافن و ماتریس عبارتند از:

$$\delta(x=0) = 0 \quad (2)$$

$$\delta(x=L_i) = \delta_i \quad (3)$$

$$\delta(x=L_f) = \delta_f \quad (4)$$

جابجایی لغزشی بین گرافن و ماتریس ( $\delta$ ) برای سه حالت فوق عبارتست از:

$$\delta_1(x) = \frac{2b\sigma}{E_m(2b-t)(1+K_0A)\alpha \cosh(\alpha L_g)} \sinh(\alpha x) \quad (5)$$

$$\delta_2(x) = \delta_i \frac{\sinh(\alpha x)}{\sinh(\alpha L_i)} \quad (6)$$

$$\delta_3(x) = C_1 \sin \beta(x-L_i) + C_2 \cos \beta(x-L_i) + \delta_f \quad (7)$$

که  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای تاخیر برشی هستند و  $L_i$  و  $L_f$  به ترتیب طول نقاطی هستند که آسیب و جدایش در آنها شروع می شود.

دیفرانسیل ۹۰۸ شروع آسیب و جدایش را به ازای تنش های مختلف نتیجه می دهد.

$$\frac{2b\sigma}{E_m(2b-t)} + \beta(K_1A-1) [C_1 \cos \beta(L_g-L_i) - C_2 \sin \beta(L_g-L_i)] = 0 \quad (9)$$

$$\left( \frac{1+K_0A}{1-K_1A} \right) \left( \frac{\alpha}{\beta} \right) \delta_i \coth(\alpha L_i) \sin \beta(L_f-L_i) + (\delta_i - \delta_f) \cos \beta(L_f-L_i) = 0$$

به خاطر درک بهتر آسیب در فاز واسط دو پارامتر بدون بعد زیر را تعریف

می کنیم:

$$\xi = \frac{\Delta_{\text{dam}}}{L_g} = \frac{L_f-L_i}{L_g}, \eta = \frac{\Delta_{\text{de}}}{L_g} = \frac{L_g-L_f}{L_g} \quad (10)$$

### ارایه نتایج و بحث

شکل ۳ نشان می دهد که پیش از شروع جدایش، طول ناحیه ی آسیب دیده با افزایش تنش افزایش می یابد، اما پس از شروع جدایش، طول ناحیه ی آسیب دیده کاهش چشمگیری خواهد داشت. علت این موضوع این است که بخش عمده ی ناحیه ی آسیب دیده با اعمال تنش بحرانی دوم جدا خواهد شد.

شکل ۴ نشان می دهد که با افزایش بسیار اندک تنش اعمالی به

نانوکامپوزیت پس از تنش بحرانی دوم  $\sigma_{2cr}$  (تنش متناظر با شروع جدایش)، حدود ۷۵٪ گرافن از ماتریس جدا خواهد شد.