



Ductile Fracture Analysis of Notched Epoxy Nanocomposites Reinforced with Graphene Oxide Nanoparticles Using the Equivalent Material Concept

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gharehbash M.¹,
Ghasemi-Ghalebahman A.^{1*}

How to cite this article

Gharehbash M, Ghasemi-Ghalebahman A, Ductile Fracture Analysis of Notched Epoxy Nanocomposites Reinforced With Graphene Oxide Nanoparticles Using The Equivalent Material Concept. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(04):215-223.

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

ghasemi@semnan.ac.ir

Article History

Received: March 24, 2024

Accepted: July 27, 2024

ePublished: August 2, 2024

ABSTRACT

In this research, the load-bearing capacities of epoxy-based nanocomposite specimens containing rounded-tip V-shaped notches made of epoxy resin LR 630 and nanographene oxide were studied both experimentally and theoretically under pure opening mode conditions. In order to fabricate the studied specimens, first, the tensile properties and fracture toughness of pure epoxy resin and nanocomposite materials were determined by uniaxial monotonic tension and three-point bending tests. Rectangular plates containing a central rhombic hole with four blunt V-shaped corners with a notch angle of 60° and radii of 1, 2, and 4 mm were utilized as the samples for fracture tests. Then, the samples were subjected to uniaxial tensile loading, and their load-carrying capacities (LCC) were measured. For theoretical predictions, due to the ductile behavior of the studied specimens, a combination of the equivalent material concept (EMC) with the well-known brittle fracture criterion, maximum tangential stress (MTS), was employed. Then, experimental and theoretical results were compared. The results of the experiment showed that by adding nanoparticles to the epoxy resin, its strength improved by about 8%, and it was found that the maximum discrepancy between the theoretical and experimental results was related to the groove with a radius of 4 mm, approximately 9.2%. Finally, it was observed that the new criterion (EMC-MTS) could predict the experimental results well without performing any time-consuming and complex elastic-plastic analysis.

Keywords Polymer Based Nanocomposite - Ductile Fracture - Equivalent Material Concept - V-Shaped Notch - Graphene Oxide

CITATION LINKS

1- A critical review: the modification, properties, and applications of epoxy resins, 2- Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites, 3- Advanced elastomer nano-composites based on CNT-hybrid filler systems, 4- The rise of graphene, 5- In situ polymerization of graphene oxide and cyanate ester-epoxy with enhanced mechanical and thermal properties, 6- Preparation of graphitic oxide, 7- Mechanical and thermal properties of epoxy resin nanocomposites reinforced with graphene oxide, 8- Mechanical and thermal properties of graphene oxide filled epoxy nanocomposites, 9- Improving the mechanical and thermal properties of chemically modified graphene oxide/polypropylene nanocomposite, 10- Experimental investigation on the compression behaviors of epoxy with carbon nanotube under high strain rates, 11- Effect of graphene nanosheets (GNS) and graphite nanoplatelets (GNP) on the mechanical properties of epoxy nanocomposites, 12- On the use of the Theory of Critical Distances to predict static failures in ductile metallic materials containing different geometrical features, 13- On the use of the equivalent material concept to predict tensile load-bearing capacity of ductile steel bolts containing V-shaped threads, 14- Evaluation of the equivalent material concept in mixed mode I/III fracture estimation of V-notched Al7075-T6 plates, 15- Mixed mode I/II fracture prediction of blunt V-notched nanocomposite specimens with nonlinear behavior by means of the Equivalent Material Concept, 16- Estimation of tensile load-bearing capacity of ductile metallic materials weakened by a V-notch: The equivalent material concept, 17- On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, 18- Failure criteria for linear elastic materials with U-notches, 19- Fracture study in notched ductile polymeric plates subjected to mixed mode I/II loading: Application of equivalent material concept.

تحلیل شکست نرم نانوکامپوزیت های شیاردار اپوکسی تقویت شده با نانوذرات گرافن اکسید با استفاده از مفهوم ماده معادل

مهدی قره باش^۱، احمد قاسمی قلعه بهمن*

^۱ گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، ایران

چکیده

در این مقاله، ظرفیت باربری نمونه های نانوکامپوزیت زمینه پلیمری دارای شیار v شکل نوک گرد ساخته شده از رزین اپوکسی LR 630 و نانوغرافن اکسید، به هر دو روش تجربی و تئوری در شرایط مود بازشوندگی خالص، مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا خواص مکانیکی رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت، توسط آزمون کشش و خمش سه نقطه، به منظور ساخت نمونه های مورد مطالعه، تعیین شد. از صفحات مستطیلی شامل یک سوراخ لوزی شکل در مرکز با چهار گوشه شیاردار با زاویه ی شیار ۶۰ درجه و شعاع های ۲.۱ و ۴ میلی متر در نوک آن، به عنوان نمونه برای آزمون شکست، استفاده شد. سپس نمونه ها تحت بارگذاری کششی تک محوره قرار گرفتند و ظرفیت باربری آن ها اندازه گیری شدند. سپس برای پیش بینی های تئوری به دلیل رفتار نرم نمونه های مورد بررسی، از ترکیب روش مفهوم ماده معادل (EMC) با یک معیار شکست ترد شناخته شده به نام معیار بیشترین تنش محیطی (MTS)، استفاده شد و بعد از آن نتایج تجربی و تئوری باهم مقایسه شدند. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که با افزودن نانوذره به رزین اپوکسی، استحکام آن حدود ۸٪ بهبود پیدا می کند. همچنین مشاهده شد که بیشترین اختلاف نتایج تئوری و تجربی مربوط به ظرفیت باربری، مربوط به شیار با شعاع ۴ میلی متر و حدود ۹۲٪ می باشد. در نهایت مشاهده شد، معیار ترکیبی جدید به خوبی می تواند، بدون نیاز به تحلیل های زمان بر و پیچیده الاستوپلاستیک، نتایج تجربی به دست آمده برای نمونه های نانو کامپوزیتی را پیش بینی کند.

کلیدواژه ها: نانوکامپوزیت زمینه پلیمری-شکست نرم- مفهوم ماده معادل- شیار وی شکل- گرافن اکسید

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶

*نویسنده مسئول: ghasemi@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

دستیابی به مواد پیشرفته با خواص بهبود یافته، همواره مورد توجه محققان بوده است. رزین اپوکسی از پرکاربردترین پلیمرهای گرماسخت محسوب می شود و در زنجیره خود دارای بیش از یک گروه عاملی اکسیران یا اپوکسید می باشد. این حلقه قادر است که در طی واکنش پخت، باز شود و ایجاد اتصالات عرضی نماید. از جمله این کاربردها، می توان به مواردی مانند جمع شدگی کم حین واکنش پخت، اشاره کرد که امکان ساخت قطعاتی با ابعاد دقیق را فراهم می آورد. از دیگر خواص آن می توان به خاصیت الکتریکی، مقاومت حرارتی عالی و چسبندگی عالی به بسیاری از مواد مانند فلزات، چوب، بتن، سرامیک و بسیاری از پلاستیک ها، اشاره کرد^[۱]. رزین اپوکسی دارای استحکام پایین تر و تردی بیشتری نسبت به فلزات بوده که به عنوان یک محدودیت برای

آن به حساب می آید^[۲]. به جهت رفع این محدودیت، می توان رزین اپوکسی را به کمک پرکننده هایی به شکل الیاف (پیوسته یا کوتاه) و یا نانوذرات، تقویت کرده و به صورت کامپوزیت و یا نانوکامپوزیت استفاده نمود^[۳].

گرافن، نانوذره ای با ساختار صفحه ای از جنس اتم های کربن در یک پیکربندی شش ضلعی است که در آن اتم های کربن با هیبرید sp^2 ، به هم متصل شده اند. صفحات گرافن با کنار هم قرار گرفتن اتم های کربن تشکیل می شوند^[۴]. پخش گرافن در حلال های آبی و غیر آبی ضعیف بوده و چون صفحات گرافن از نظر شیمیایی بی اثرند، برهم کنشی با ماتریس پلیمری ایجاد نمی کنند. به همین دلیل گرافن اکسید که یک ماده متشکل از گروه های فعال اکسیژنی مانند هیدروکسیل است به عنوان یک نانوذره دوبعدی ایده آل، توجه بسیاری را به خود جلب کرده و می تواند، به عنوان گزینه ای مناسب برای تقویت رزین های اپوکسی مورد استفاده قرار گیرد^[۵،۶]. گرافن اکسید از اکسید کردن پولکی های گرافیت، به کمک یک اکسند قوی مانند پتاسیم پرمنگنات، در یک محیط اسیدی مانند اسید سولفوریک به دست می آید^[۶].

در سال های اخیر، مطالعات بسیاری روی تاثیر گرافن اکسید بر رفتار مکانیکی پلیمرها، انجام شده است^[۷-۹].

شکرپه و همکاران^[۱۰]، رفتار وابسته به نرخ کرنش پلیمرهای تقویت شده با نانولوله کربنی چند لایه را مورد بررسی قرار دادند. آن ها یک معادله ساختاری برای پیش بینی رفتار وابسته به نرخ کرنش پلیمرهای تقویت شده با نانولوله کربنی، پیشنهاد داده اند. علاوه بر این شکرپه و همکاران^[۱۱]، به بررسی اثر دو نوع گرافن با قطر و ضخامت متفاوت، بر خواص کششی اپوکسی پرداختند. ایشان چندین نمونه با درصد های وزنی مختلف را تحت آزمایش قرار دادند و مشاهده نمودند که گرافن با ضخامت کمتر، اثر بیشتری بر بهبود خواص مکانیکی دارد و در بررسی آنان بهبود ۱۵/۷ درصدی برای استحکام کششی گزارش شد.

ساسمل و تیلور^[۱۲]، پژوهشی را با عنوان پیش بینی ظرفیت باربری برای یک مدل از فولاد کم کربن نورد سرد شده با نام تجاری En3b شیاردار را با استفاده از نظریه فاصله بحرانی (TCD)، در شرایط مود ا بارگذاری، انجام دادند. ایشان حداکثر باری که نمونه های شیاردار می توانند تحمل کنند را با انجام تحلیل های الاستوپلاستیک و الاستیک خطی تعیین کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین اختلاف این تحلیل ها با نتایج تجربی حدود ۱۵ درصد بوده است که این مقدار اختلاف نشان دهنده دقت مناسب تئوری فاصله بحرانی می باشد.

ترابی^[۱۳]، مفهوم ماده معادل را در دو نوع پیچ با شیار v شکل ساخته شده از فولاد را تحت بارگذاری مود I شکست، مورد مطالعه قرار داد. در این بررسی، ظرفیت باربری نمونه های مورد آزمایش به وسیله معیار تنش میانگین (Mean Stress) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش، موفقیت استفاده از روش

به منحنی تنش- کرنش حاصل از آزمون کشش، در جدول ۱، نشان داده شده است.

۲-۲- ساخت نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن اکسید

ابتدا باتوجه به درصد جرمی مورد نیاز، به مقدار مشخصی از رزین اپوکسی، گرافن اکسید اضافه شده و مخلوط حاصل با همزن مکانیکی به مدت ۲۰ دقیقه در دور ۲۵۰۰ rpm همزده می‌شود. در ادامه به منظور توزیع بهتر و جلوگیری از کلوخه شدن گرافن اکسید در رزین، مخلوط به مدت ۴۵ دقیقه با استفاده از پروب ۱۴ میلی متری دستگاه همزنایزر آلتراسونیک با توان ۷۰ w و فرکانس ۱۲ کیلوهرتز سونیکیت (Sonicate) می‌شود. در این مرحله به دلیل انتقال انرژی زیاد به مخلوط، دما به شدت بالا خواهد رفت. برای جلوگیری از این افزایش دما، لازم است، ظرف مخلوط در حمامی از یخ نگهداری شود تا دمای آن حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شود. همچنین برای اعمال انرژی سونیکیشن به کل مخلوط، مخلوط هر ۱۰ دقیقه به وسیله ی یک قاشق کوچک همزده می‌شود. در حین پراکنده کردن صفحات گرافن اکسید در محلول توسط دستگاه آلتراسونیک، به علت کاهش بیشتر صفحات گرافن اکسید، رنگ محلول از قهوه‌ای به مشکی میل می‌کند. همچنین در صورت توزیع مناسب گرافن اکسید در اپوکسی، کریستال مایع بر روی سطح رزین قابل مشاهده است. به عبارت دیگر، تشکیل کریستال مایع در داخل محلول، نشان از باز شدن نانوصفحات از یکدیگر بوده و انباشتگی میان این صفحات بسیار کم اتفاق افتاده است. پس از عملیات توزیع نانوذرات گرافن در بستر، سخت کننده با نسبت ۳۰ به ۱۰۰ به مخلوط اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه به خوبی همزده می‌شود. قبل از قالب ریزی، لازم است که هیچ گونه حبابی در مخلوط وجود نداشته باشد، برای این منظور، ابتدا به وسیله مشعل به مخلوط حرارت داده می‌شود تا حباب‌های موجود به سطح مخلوط آمده، سپس مخلوط درون آن خلاء گذاشته می‌شود تا حباب‌های گیر افتاده ناشی از هم زدن از آن خارج شوند. در نهایت مخلوط درون قالب‌های سیلیکونی چرب شده با اسپری سیلیکون، ریخته شده و مطابق پیشنهاد سازنده به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط خشک می‌شود. سپس نمونه های مورد نیاز، برای جلوگیری از تولید تنش پسماند اطراف نوک شیار، با استفاده از دستگاه برش سی‌ان‌سی واترجت (CNC waterjet) دوبعدی، به شکل مطلوب بریده می‌شوند.

جدول ۱) خواص مکانیکی نمونه‌های نانوکاپوزیتی

ماده	کشیدگی کلی %	مدول الاستیک (GPA)	استحکام نهایی (MPA)	تنش تسلیم (MPa)
نانوکامپوزیت	۱۲	۳/۲	۴۷	۲۳/۴

مفهوم ماده معادل در پیش‌بینی بار شکست نمونه‌های مورد آزمایش در دو رژیم پلاستیک کوچک و بزرگ اطراف ناحیه پلاستیک، و مطابقت خوب بین نتایج تجربی و تئوری را نشان می‌دهد. صبوری و همکاران^[14]، به مطالعه رفتار شکست نمونه های آلومینیوم دارای شیار با کد 7075-T6، پرداختند. آن‌ها ابتدا به صورت تجربی به تعیین چقرمگی شکست چندین نمونه با زاویه‌های مختلف ترک و شعاع‌های مختلف شیار در شرایط مود ترکیبی I و III شکست، پرداختند و سپس با استفاده از روش مفهوم ماده معادل، چقرمگی شکست نمونه‌ها را محاسبه کردند. در مطالعه ایشان مشخص شد، روش ترکیبی مفهوم ماده معادل و معیار تنش میانگین قادر است مقادیر تجربی چقرمگی شکست در شرایط کرنش صفحه ای را به خوبی پیش‌بینی کند. ترابی و همکاران^[15]، شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی دارای شیار V شکل را تحت شرایط بارگذاری مود ترکیبی I و II، با استفاده از مفهوم ماده معادل مورد مطالعه قرار دادند. ایشان ابتدا مقدار بهینه نرخ کرنش، درصد مناسب سخت کننده و مقدار مناسب نانوذره را تعیین کردند و سپس به صورت تجربی، مقادیر ظرفیت باربری نمونه‌های نانوکامپوزیتی را تعیین کردند و در نهایت با ترکیب مفهوم ماده معادل با دو معیار ترد شناخته شده بیشترین تنش محیطی (maximum tangential stress) و تنش میانگین (Mean Stress)، نتایج تجربی را پیش‌بینی کردند. ایشان مشاهده کردند، روش ترکیبی ارائه شده نتایج تجربی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. با توجه به مطالعات پیشین انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت بیشتر مطالعات انجام شده در مورد شکست ترد مواد فلزی و آلیاژهای آن‌ها بوده است و بیشتر آن‌ها به توسعه تئوری‌های موجود برای شکست ترد پرداخته اند. همچنین به علت پیچیدگی و زمان‌بر بودن تحلیل‌های الاستوپلاستیک، در خصوص شکست نرم مواد مخصوصاً روی مواد پلیمری و نانوکامپوزیتی مطالعات محدودی انجام شده است. بنابراین این پژوهش به شکست نرم مواد پلیمری تقویت شده با نانوذرات گرافن اکسید که تاکنون مطالعات اندکی با روش مفهوم ماده معادل روی آن انجام شده است، می‌پردازد.

۲- مواد، ساخت نمونه ها و آزمایش‌ها

۲-۱- مواد اولیه

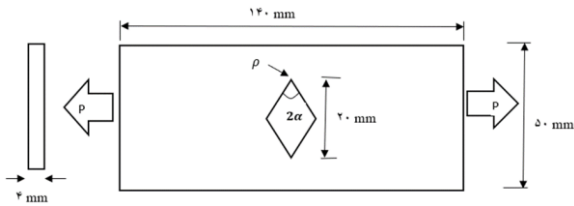
به دلیل مقدار قابل توجهی نرمی در رفتار کششی و همچنین گرانروی پایین، رزین اپوکسی LR 630 با کاربردهای فراوان در زمینه‌ی ساخت قطعات و ساختارهای مهندسی، به عنوان زمینه و H 630 به عنوان هاردنر (Hardener) برای رزین اپوکسی انتخاب شد. با استناد به مرجع^[17]، نرخ کرنش و درصد هاردنر انتخاب شده برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت، به ترتیب ۱ میلی‌متر بر دقیقه و ۰/۵% می‌باشد. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت، با توجه

چگالی انرژی کرنشی مواد شکل پذیر را می توان به صورت دو بخش الاستیک و پلاستیک ارائه نمود^[13]،

$$(SED)_{tot.} = (SED)_e + SED_p = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y + \int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_p} \sigma_p d\varepsilon_p \quad (2)$$

اکنون با در نظر گرفتن کرنش تسلیم بصورت $\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$ برای نقطه شروع انتگرال گیری و جایگذاری رابطه ۱ در رابطه ۲، چنین به دست می آید^[13]:

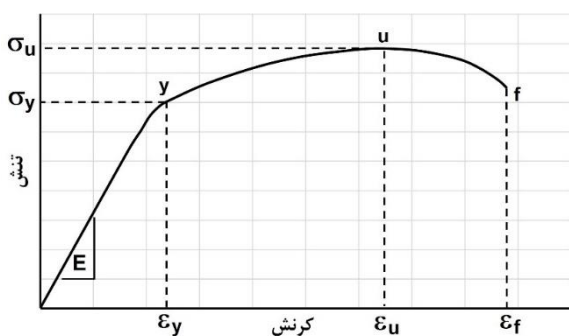
$$(SED)_{tot.} = \frac{\sigma_y^2}{2E} + \int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_p} K \varepsilon_p^n d\varepsilon_p \quad (3)$$



شکل ۱) شماتیک ابعاد و هندسه نمونه های آزمون شکست



شکل ۲) نمونه های آزمون شکست



شکل ۳) نمودار تنش کرنش مهندسی برای مواد نرم

۲-۳- تجهیزات و استاندارد آزمایش

در این مقاله خواص کششی به کمک دستگاه کشش تک محوره شرکت سنتام در آزمایشگاه سنتز پلیمر گروه علوم پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، مطابق با استاندارد ASTM- D638 و چقرمگی شکست نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM-D5045، تعیین شده است. نمونه های انتخاب شده برای مطالعه شکست به صورت یک صفحه مستطیلی با یک سوراخ لوزی شکل در وسط آن که چهار گوشه این سوراخ به شکل شیار v شکل هستند، می باشد. در شکل ۱، شماتیک و ابعاد نمونه های آزمون شکست و در شکل ۲، نمونه های ساخته شده برای آزمون شکست، نمایش داده شده است. پارامتر 2α در شکل زاویه شیار را نشان می دهد که در تمامی آزمون ها برابر ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین پارامتر ρ شعاع شیار را نشان می دهد. سه شعاع شیار با اندازه های ۱، ۲ و ۴ میلیمتر برای ساخت نمونه های شیاردار، در نظر گرفته شده است.

۳- مفهوم ماده معادل

از آن جا که تحلیل های شکست برای الاستوپلاستیک پیچیده و زمان بر هستند، برای نخستین بار ترابی^[16]، برای غلبه بر این پیچیدگی ها، مفهوم ماده معادل (EMC) را ارائه داد. در روش مفهوم ماده معادل با استفاده از دیدگاه چگالی انرژی کرنشی (مساحت سطح زیر نمودار منحنی تنش-کرنش در آزمون کشش)، ماده شکل پذیر واقعی تا نقطه آغاز رشد و گسترش ترک که رفتار الاستوپلاستیک از خود نشان می دهد، با یک ماده ی ترد مجازی با رفتار الاستیک خطی که مدول الاستیسیته برابری دارد، معادل می شود. با تعیین استحکام کششی نهایی ماده ی ترد مجازی و با در نظر گرفتن چقرمگی شکست برابر در حالت کرنش صفحه ای برای ماده نرم واقعی و ماده ی ترد مجازی، ظرفیت باربری مواد شکل پذیر با ترکیب روش مفهوم ماده معادل با یک معیار شکست ترد، به صورت تئوری محاسبه می شود. چگالی انرژی کرنشی (SED) در واقع انرژی کرنشی جذب شده توسط حجم واحدی از مواد است.

۳-۱- چگالی انرژی کرنشی ماده واقعی شکل پذیر

در شکل ۳، نمودار تنش-کرنش یک ماده شکل پذیر به صورت شماتیک نمایش داده شده است که در آن σ_y استحکام تسلیم، σ_u استحکام کششی ماده و ε_f کرنش شکست می باشد.

برای یک ماده شکل پذیر با مقدار قابل توجهی تغییر شکل پلاستیک و با در نظر گرفتن رابطه توانی تنش-کرنش در ناحیه پلاستیک، می توان نوشت:

$$\sigma_p = K \varepsilon_p^n \quad (1)$$

که در این رابطه σ_p و ε_p به ترتیب تنش پلاستیک و کرنش پلاستیک هستند. متغیر K و n نیز به ترتیب ضریب کرنش سختی و توان سختی هستند که وابسته به خواص مکانیکی مواد هستند.

می باشد و معمولا با استحکام نهایی مواد، برابر در نظر گرفته می شود.

در شکل ۵، مفهوم معیار بیشترین تنش محیطی، نمایش داده شده است. فاصله بحرانی نیز جزء خواص مواد و برای محاسبه تنش محیطی حول شیار ۷ شکل، ضروری است. رابطه ی زیر برای فاصله بحرانی در گذشته توسط محققین گزارش شده است [18].

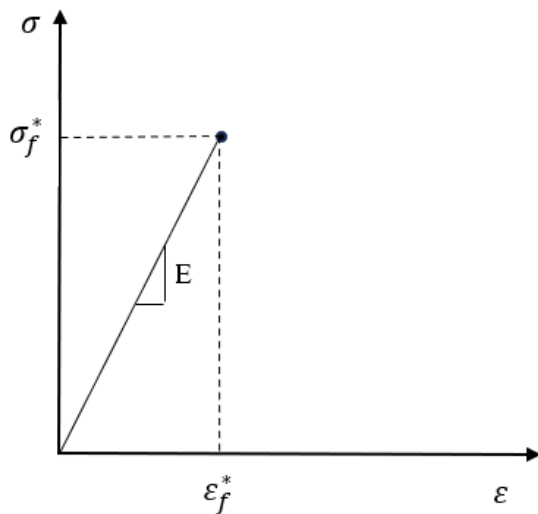
$$r_c = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (10)$$

در رابطه ی بالا K_{Ic} چقرمگی شکست در حالت کرنش صفحه ای را نشان می دهد.

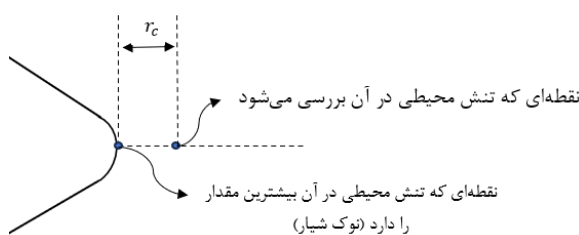
۵- نتایج

۵-۱- محاسبه خواص مکانیکی نمونه ها

در این مقاله خواص کششی نمونه ها به کمک دستگاه کشش تک محوره شرکت سنتام در آزمایشگاه سنتز پلیمر گروه علوم پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، مطابق با استاندارد ASTM- D638، محاسبه شده است. منحنی تنش-کرنش نمونه های نانوکامپوزیتی در شکل ۶، نشان داده شده است. مطابق نمودار ارائه شده برای نمونه های نانوکامپوزیتی ناحیه غیر خطی قبل از رسیدن به بیشترین بار قابل تحمل، نشان دهنده ی تغییر شکل پلاستیک و نرم بودن رفتار نمونه ها می باشد. نتایج مربوط به خواص مکانیکی نمونه ها در جدول ۱ گزارش شده است



شکل ۴) منحنی تنش-کرنش ماده ترد مجازی



شکل ۵) نمایش مفهوم معیار بیشترین تنش محیطی

بنابراین

$$(SED)_{tot} = \frac{\sigma_y^2}{2E} + \frac{K}{n+1} (\epsilon_p^{n+1} - \epsilon_y^{n+1}) \quad (4)$$

اکنون با توجه به اینکه در لحظه شروع ترک نمونه بیشترین مقدار بار را تحمل می کند، برای چنین شرایطی می توان به جای ϵ_p ، مقدار حقیقی کرنش نهایی $\epsilon_{u,true}$ را جایگذاری کرد، بنابراین، رابطه ۴ چنین بدست می آید [13]:

$$(SED)_{tot} = \frac{\sigma_y^2}{2E} + \frac{K}{n+1} (\epsilon_{u,true}^{n+1} - \epsilon_y^{n+1}) \quad (5)$$

لازم به ذکر است که $\epsilon_{u,true}$ ، کرنش در قله منحنی تنش-کرنش حقیقی است و رابطه آن با ϵ_u ، به صورت زیر بیان می شود:

$$\epsilon_{u,true} = \ln(1 + \epsilon_u) \quad (6)$$

۳-۲- چگالی انرژی کرنشی ماده ترد مجازی

در شکل ۴، ϵ_f^* و σ_f^* به ترتیب، کرنش شکست و استحکام کششی نهایی ماده ترد مجازی هستند. با توجه به شکل ۴، چگالی انرژی کرنشی ماده ترد مجازی (مساحت سطح زیر نمودار تنش-کرنش) مطابق رابطه زیر می باشد [16]:

$$(SED)_{EMC} = \frac{\sigma_f^{*2}}{2E} \quad (7)$$

۳-۳- استحکام نهایی ماده ترد مجازی

با توجه به مفهوم ماده معادل، باید چگالی انرژی کرنشی ماده شکل پذیر واقعی و ماده ترد مجازی، برابر باشد. بنابراین برای محاسبه استحکام نهایی ماده ترد مجازی، داریم [16]:

$$\frac{\sigma_f^{*2}}{2E} = \frac{\sigma_y^2}{2E} + \frac{K}{n+1} \left(\left(\frac{\sigma_u}{K} \right)^{(n+1)/n} - \epsilon_y^{n+1} \right) \quad (8)$$

سرانجام رابطه استحکام نهایی ماده ترد مجازی به صورت زیر به دست می آید [14,15]:

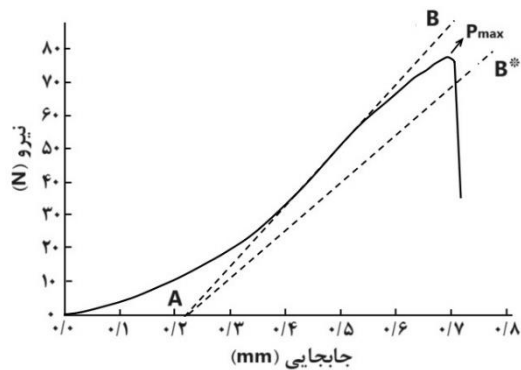
$$\sigma_f^* = \sqrt{\sigma_y^2 + \frac{2EK}{n+1} \left(\left(\frac{\sigma_u}{K} \right)^{(n+1)/n} - \epsilon_y^{n+1} \right)} \quad (9)$$

لازم به ذکر است که برای محاسبه مقدار σ_f^* ، ضرورتا لازم نیست از رابطه ۹ استفاده شود و با محاسبه مساحت سطح زیر نمودار تنش-کرنش ماده شکل پذیر و با استفاده از رابطه ۷، مقدار آن قابل محاسبه است. این روش محاسبه، در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- معیار شکست ترد

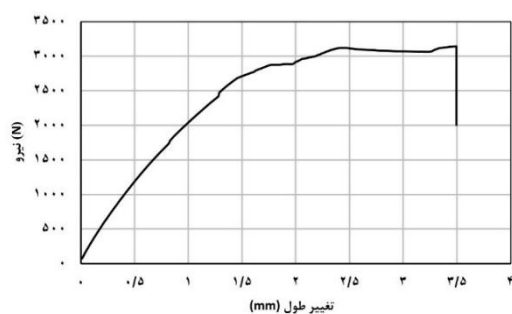
۴-۱- معیار شکست بیشترین تنش محیطی برای شیار ۷ شکل

معیار شکست بیشترین تنش محیطی، برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ میلادی توسط اردوغان و سیج [17]، منتشر شد. این معیار در بیشتر مواقع، برای پیش بینی شکست ترد در ساختار مهندسی شیاردار، استفاده می شود. مطابق این معیار شکست، شکست ترد زمانی اتفاق می افتد که تنش محیطی در یک فاصله ی تعیین شده در نوک شیار که فاصله بحرانی (r_c) نامیده می شود، از تنش بحرانی (σ_c) مواد تجاوز کند. برای مواد ترد، تنش بحرانی جزء خواص مواد



شکل ۷) نمودار نیرو-جابجایی مربوط به آزمون خمش سه نقطه

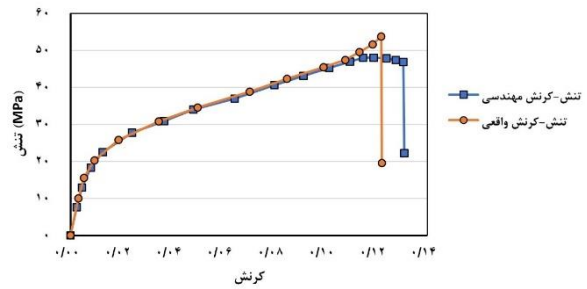
۳-۵- نتایج تجربی حاصل از ظرفیت باربری نمونه‌های آزمایشگاهی با توجه به نتایج آزمایشگاهی حاصل از نمونه‌های تحت آزمون کشش نمونه‌های مستطیلی شکل در این مقاله، ظرفیت باربری نمونه‌های نانوکامپوزیتی در زاویه شیار ۶۰ درجه و شعاع‌های نوک شیار (۴ و ۲،۱) میلی‌متر تعیین شد. در این آزمون، هندسه نمونه کاملاً متقارن می‌باشد و بارگذاری دقیقاً در راستای خط نیمساز عمودی اعمال شد. بنابراین دو گوشه شیار وی شکل سوراخ لوزی شرایط مود خالص یک را تجربه می‌کنند. در شکل ۸ نمونه‌ای از منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌ها نمایش داده شده است. مطابق با این منحنی، نقطه پیک منحنی، ظرفیت باربری نمونه را نمایش می‌دهد. ظرفیت باربری نمونه‌ها، در قالب جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول، p_i ($i = 1, 2, 3$) نشان دهنده ظرفیت باربری نمونه‌ها در سه مرتبه و میانگین سه ظرفیت باربری هستند. لازم به ذکر است که در این آزمون به منظور تکرارپذیری، تمامی هندسه‌ها سه مرتبه تحت آزمایش قرار گرفتند. بنابراین، ۹ آزمون شکست برای نمونه‌های شیاردار در نظر گرفته شده است.



شکل ۸) نمونه منحنی نیرو-جابجایی نمونه نانوکامپوزیتی با شعاع نوک شیار ۲ میلی‌متر

جدول ۲) نتایج تجربی حاصل از ظرفیت باربری نمونه‌های تحت آزمون کشش با شعاع‌های نوک شیار مختلف

2α (deg.)	ρ (mm)	p_1 (N)	p_2 (N)	p_3 (N)	P_{ave} (N)
۶۰	۱	۲۸۱۸	۲۶۸۳	۲۷۴۸	۲۷۴۹
۶۰	۲	۳۲۱۹	۳۰۳۱	۳۱۶۵	۳۱۳۹
۶۰	۳	۳۳۷۶	۳۶۱۸	۳۵۳۹	۳۵۱۱



شکل ۶) منحنی تنش-کرنش نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی/اگرافن اکسید

۲-۵- محاسبه چقرمگی

در این بخش نتایج حاصل از آزمون چقرمگی و آزمون شکست آورده شده است. برای محاسبه چقرمگی شکست نمونه‌های مورد آزمایش از استاندارد ASTM-D5045 استفاده شده است. مطابق با این استاندارد نمونه‌های نانوکامپوزیتی، برای محاسبه چقرمگی شکست با استفاده از آزمون خمش سه نقطه، مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار نیرو-جابجایی مربوط به این آزمون در شکل ۷، نشان داده شده است.

برای محاسبه مقدار K_{Ic} مطابق با استاندارد ASTM-D5045 ابتدا باید خط AB مماس بر قسمت خطی قبل از نقطه شکست نمونه، سپس خط AB* با شیب پنج درصد بیشتر نسبت به شیب خط AB، نسبت به خط عمودی، ترسیم شود. سپس اگر قله نمودار بین خطوط AB و AB* قرار بگیرد، نقطه مذکور P_{max} به جای P_Q در رابطه ۱۱، برای محاسبه چقرمگی، قرار می‌گیرد.

$$K_{Ic} = \left(\frac{P_Q S}{B W^{3/2}} \right) f(x);$$

$$f(x) = 3 x^{1/2} [1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)] / [2(1+2x)(1-x)^{3/2}] \quad (11)$$

که در رابطه بالا B ضخامت نمونه، S فاصله تکیه گاه ها، W عرض نمونه، a طول ترک و x نسبت a به W می‌باشد. لازم به ذکر است آزمون شکست نمونه‌های خمش سه نقطه، طبق استاندارد ASTM-E399 مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن $x = 0.55$ ، ضخامت ۶ میلی‌متر و عرض ۱۲ میلی‌متر، مقدار چقرمگی شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی تقریباً برابر $1.02 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ به دست می‌آید.

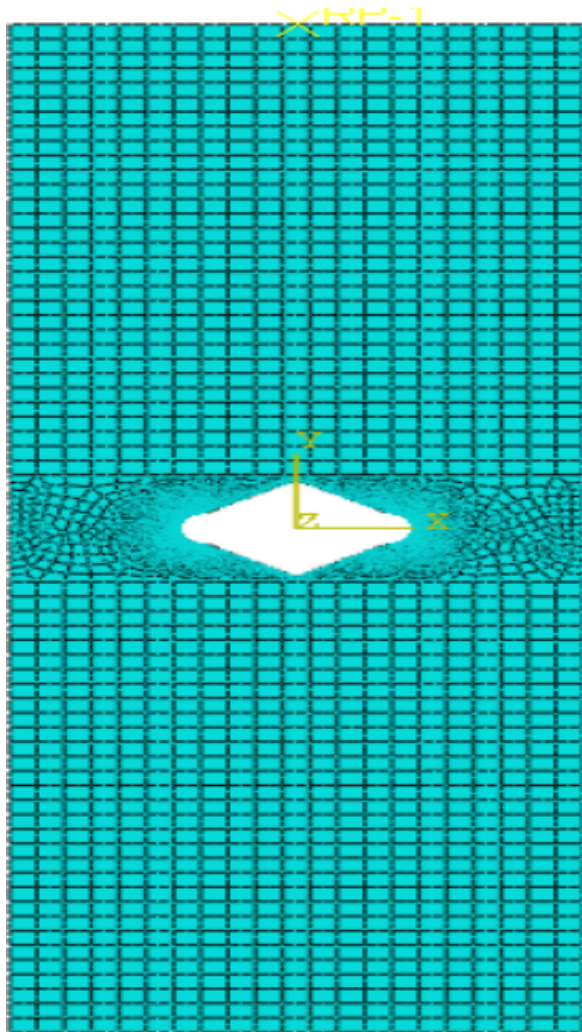
بعد از محاسبه چقرمگی باید صحت مقدار به دست آمده بررسی شود، بدین منظور برای دستیابی به نتیجه قابل قبول مطابق این استاندارد، باید معیار اندازه زیر ارضا شود.

$$B, a, (W-a) > 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (12)$$

که با مقادیر تعیین شده برای پارامترهای رابطه ۱۲، مقدار محاسبه شده برای چقرمگی از دقت و صحت لازم برخوردار می‌باشد.

قرار گرفته، مقادیر تنش محیطی در آن‌ها اختلاف چندانی باهم ندارند. مطابق مفهوم ماده معادل، برای پیش‌بینی تئوری ظرفیت باربری نمونه‌ها باید تنش بحرانی در نمونه‌های نانوکامپوزیتی با استحکام کششی نهایی محاسبه شده و برای ماده‌ی ترد مجازی، جایگزین شود، هم‌چنین، مطابق معیار EMC-MTS، برای پیش-بینی ظرفیت باربری یک نمونه نانوکامپوزیت، ابتدا باید نقطه مشخص در فاصله بحرانی از خط نیمساز شیار تعیین شود، سپس، برای یک نیروی قراردادی مثلا ۱۰۰ نیوتن، تنش محیطی ($\sigma_{\theta\theta}$) در این نقطه مشخص شده، محاسبه شود. شکست ترد نمونه‌های شیاردار مطابق معیار بیشترین تنش محیطی زمانی اتفاق می‌افتد که تنش محیطی در فاصله بحرانی از استحکام کششی نهایی ماده ترد مجازی، تجاوز کند. بنابراین با داشتن مقدار فاصله بحرانی که از رابطه ۱۰ محاسبه شد و مقدار آن که برابر با ۰/۱ میلی‌متر به دست آمده است، ظرفیت باربری نمونه‌ها، می‌تواند، به راحتی با استفاده از رابطه ۱۳ [19]، محاسبه شود.

$$P_{EMC-MTS} = \frac{\sigma_f^*}{\sigma_{\theta\theta}} \times 100N \quad (13)$$



شکل ۹) نحوه‌ی مش بندی نمونه شکست

۴-۵- پیش‌بینی تئوری ظرفیت باربری نمونه‌های نانوکامپوزیتی

۴-۵-۱- محاسبه استحکام نهایی ماده ترد مجازی

از آنجایی که در مفهوم ماده معادل چگالی انرژی کرنش ماده شکل‌پذیر واقعی و ماده ترد مجازی برابر در نظر گرفته می‌شود، برای محاسبه استحکام نهایی ماده ترد مجازی، ابتدا باید مساحت سطح زیر نمودار منحنی تنش کرنش واقعی نمونه‌های دنبلی نانوکامپوزیت محاسبه شود، برای این منظور از نرم افزار اکسل استفاده شده است. مقدار به دست آمده برای مساحت زیر نمودار، مقدار ۲/۴۴ MPa می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته ۳/۲ GPa و جایگذاری این مقادیر در رابطه ۷، مقدار استحکام نهایی ماده ترد مجازی، ۱۲۵ MPa به دست می‌آید.

۴-۵-۲- شبیه سازی و تحلیل نمونه‌ها در المان محدود

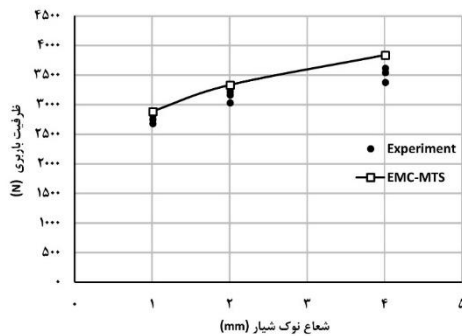
به منظور استفاده از معیارهای مکانیک شکست ترد و ترکیب آن با مفهوم ماده معادل و همچنین برای پیش‌بینی تئوری ظرفیت باربری نمونه‌های شیاردار، لازم است میدان توزیع تنش‌های الاستیک خطی نمونه‌ها تحت بارگذاری مود خالص بازشوندگی، تعیین گردد. برای این منظور، نمونه‌ها در نرم افزار المان محدود (آباکوس) مدل سازی می‌شوند. برای شبیه سازی نمونه‌های نانوکامپوزیتی شیاردار، مدل‌های دو بعدی المان محدود ایجاد شده و تحت شرایط تنش صفحه‌ای در مود یک بارگذاری مورد تحلیل قرار گرفتند. در شکل ۹ و شکل ۱۰ مدل مش بندی شده کلی و اطراف نوک شیار اجزای محدود نمونه‌ها، نمایش داده شده است. در همسایگی شیار، المان مرتبه دوم هشت گرهی تنش صفحه‌ای با انتگرال گیری کاهش یافته استفاده شده است. برای دستیابی به همگرایی قابل قبول نتایج، چندین تحلیل با تعداد المان‌های مختلف تکرار شده است. برای مدل‌های مستطیلی، نیروی کششی به گره‌های یک لبه اعمال شده و درجات آزادی گره-های لبه مقابل نمونه‌ها به صورت کامل در تمام جهات بسته نگه داشته شده است. در شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳، شماتیک میدان توزیع تنش نمونه‌ها برای نیروی قراردادی ۱۰۰ نیوتن نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که چون در شکل‌های ۱۱ و ۱۳ هندسه نمونه تحت آزمایش به صورت افقی مدل سازی شده، در آن‌ها به عنوان تنش محیطی و برای شکل ۱۲، به دلیل مدل سازی هندسه به صورت عمودی و تغییر در جهت گیری مدل، s_{22} به عنوان تنش محیطی در نظر گرفته شده است. این میدان‌های تنش کاملاً متقارن هستند که نشان دهنده شکست در حالت مود بازشوندگی خالص نمونه‌ها هستند. در شکل‌های مربوط به توزیع تنش، با توجه به اینکه با افزایش شعاع شیار از ۱ به ۲ و ۴ میلی‌متر، تمرکز تنش کاهش پیدا می‌کند، مقادیر تنش محیطی کاهش پیدا می‌کند. و هم‌چنین در شعاع نوک شیار ۲ و ۴ میلی‌متر بدلیل اینکه ناحیه اطراف نوک شیار کمتر تحت تاثیر اثرات ناحیه پلاستیک

۵-۵- نتایج مربوط به محاسبه تجربی و تئوری ظرفیت باربری نمونه-ها و میزان اختلاف آن‌ها

بعد از محاسبه تجربی و تئوری نتایج مربوط به ظرفیت باربری، نسبت تغییرات آن‌ها نسبت به زاویه شیار و شعاع نوک شیار در شکل ۱۴، گزارش شده است. نتایج مربوط به ظرفیت باربری نمونه‌ها در جدول ۳ و میزان اختلاف آن‌ها با یکدیگر، در جدول ۴، گزارش شده است. مطابق جدول ۴، مشخص است است معیار EMC-MTS، به خوبی توانسته است، نتایج تجربی مربوط به ظرفیت باربری نمونه‌های شیاردار را پیش‌بینی کند. میانگین اختلاف بدست آمده این معیار ۶/۷٪ می‌باشد. بنابراین این معیار می‌تواند، برای تخمین نیروی بحرانی قطعات نانوکامپوزیتی شیاردار، استفاده شود.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

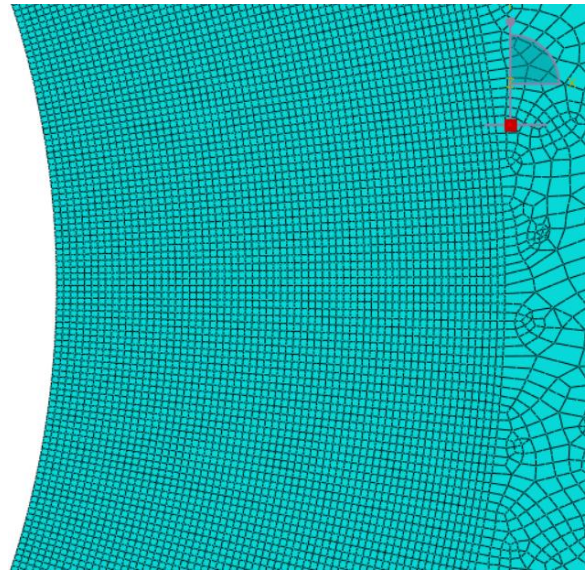
با توجه به مطالعات پیشین انجام شده در زمینه شکست مواد، مشخص شد مواد ترد و مواد شکل‌پذیر رفتار متفاوتی را در بارگذاری های مختلف مکانیکی از خود نشان می‌دهند، و مکانیزم رشد و گسترش ترک در مواد شکل‌پذیر و مواد ترد، تفاوت های زیادی با هم دارند. و همچنین مشخص شد به دلیل سادگی تئوری‌های موجود در زمینه شکست ترد مواد، بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه شکست، روی شکست ترد مواد انجام شده و به دلیل پیچیده و زمان بر بودن تئوری‌های موجود در زمینه شکست نرم مواد شکل پذیر، مطالعات خیلی کمی در این زمینه انجام شده است. همچنین مشخص شد، بیشتر مطالعات انجام شده در مورد فلزات خالص و آلیاژهای آن‌ها صورت گرفته و مطالعات کمی در مورد شکست مواد پلیمری و نانوکامپوزیت‌های پلیمری، انجام شده است.



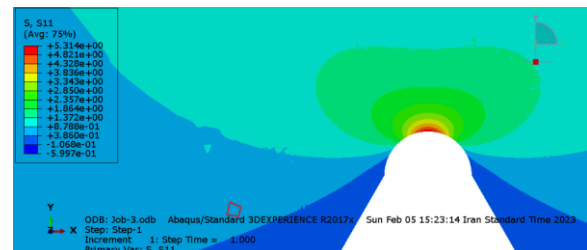
شکل ۱۴ تغییرات ظرفیت باربری نسبت به شعاع نوک شیار

جدول ۳ مقادیر ظرفیت باربری تجربی و تئوری نمونه‌های نانوکامپوزیتی

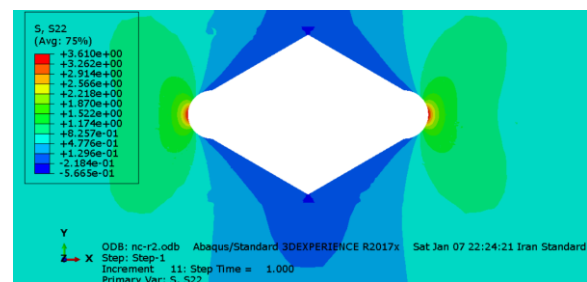
2α (deg.)	ρ (mm)	ظرفیت باربری (N)	
		تجربی	EMC-MTS
۶۰	۱	۲۷۴۹	۲۸۸۵
۶۰	۲	۳۱۳۹	۳۳۳۰
۶۰	۴	۳۵۱۱	۳۸۳۴



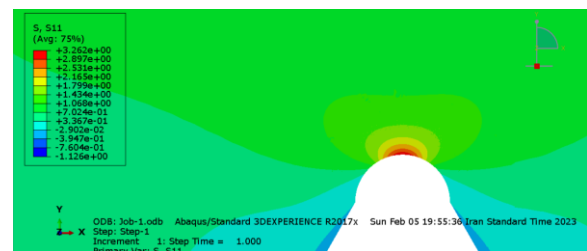
شکل ۱۰ نحوه مش بندی اطراف نوک شیار



شکل ۱۱ شماتیک توزیع تنش محیطی برای نمونه نانوکامپوزیتی با شعاع نوک شیار ۱ میلی متر



شکل ۱۲ شماتیک توزیع تنش محیطی برای نمونه نانوکامپوزیتی با شعاع نوک شیار ۲ میلی متر



شکل ۱۳ شماتیک توزیع تنش محیطی برای نمونه نانوکامپوزیتی با شعاع نوک شیار ۴ میلی متر

- 5- Ren F, Zhu G, Ren P, Wang Y, Cui X. In situ polymerization of graphene oxide and cyanate ester-epoxy with enhanced mechanical and thermal properties. *Applied Surface Science*. 2014 Oct 15;316:549-57.
- 6- Hummers Jr WS, Offeman RE. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the american chemical society*. 1958 Mar;80(6):1339-.
- 7- Liu Q, Zhou X, Fan X, Zhu C, Yao X, Liu Z. Mechanical and thermal properties of epoxy resin nanocomposites reinforced with graphene oxide. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2012 Feb 1;51(3):251-6.
- 8- Norhakim N, Ahmad SH, Chia CH, Huang NM. Mechanical and thermal properties of graphene oxide filled epoxy nanocomposites. *Sains Malaysiana*. 2014 Apr 1;43(4):603-9.
- 9- Gharebiglou M, Izadkhan MS, Erfan-Niya H, Entezami AA. Improving the mechanical and thermal properties of chemically modified graphene oxide/polypropylene nanocomposite. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Oct 10;16(8):196-206.
- 10- Ma P, Jiang G, Chen Q, Cong H, Nie X. Experimental investigation on the compression behaviors of epoxy with carbon nanotube under high strain rates. *Composites Part B: Engineering*. 2015 Feb 1;69:526-33.
- 11- Shokrieh MM, Esmkhani M, Shahverdi HR, Vahedi F. Effect of graphene nanosheets (GNS) and graphite nanoplatelets (GNP) on the mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Science of Advanced Materials*. 2013 Mar 1;5(3):260-6.
- 12- Susmel L, Taylor D. On the use of the Theory of Critical Distances to predict static failures in ductile metallic materials containing different geometrical features. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008;75(15):4410-21.
- 13- Torabi AR. On the use of the equivalent material concept to predict tensile load-bearing capacity of ductile steel bolts containing V-shaped threads. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013 Jan 1;97:136-47.
- 14- Saboori B, Torabi AR, Kamjoo MR. Evaluation of the equivalent material concept in mixed mode I/III fracture estimation of V-notched Al7075-T6 plates. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020 Oct 1;237:107259.
- 15- Torabi AR, Rahimi AS, Ayatollahi MR. Mixed mode I/II fracture prediction of blunt V-notched nanocomposite specimens with nonlinear behavior by means of the Equivalent Material Concept. *Composites Part B: Engineering*. 2018 Dec 1;154:363-73.
- 16- Torabi AR. Estimation of tensile load-bearing capacity of ductile metallic materials weakened by a V-notch: The equivalent material concept. *Materials Science and Engineering: A*. 2012 Feb 28;536:249-55.
- 17- Erdogan F, Sih GC. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear.
- 18- Gomez FJ, Guinea GV, Elices M. Failure criteria for linear elastic materials with U-notches. *International Journal of Fracture*. 2006 Sep;141:99-113.
- 19- Rahimi AS, Ayatollahi MR, Torabi AR. Fracture study in notched ductile polymeric plates subjected to mixed mode I/II loading: Application of equivalent material concept. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 2018 Jul 1;70:37-43.

جدول ۴) اختلاف مربوط به نتایج تجربی و تئوری ظرفیت باربری نمونه‌ها

$2\alpha(\text{deg.})$	$\rho(\text{mm})$	مقدار اختلاف برای-EMC MTS (%)
۶۰	۱	۴/۹
۶۰	۲	۶/۱
۶۰	۴	۹/۲

به دلیل این که تاکنون مطالعه‌ای روی شکست نرم رزین اپوکسی تقویت شده با نانوذرات گرافن اکسید انجام نشده، در این مقاله به مطالعه شکست نرم این نانوکامپوزیت در شرایط مود I بارگذاری شکست بر اساس روش مفهوم ماده معادل، پرداخته شده است. در ابتدا رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت با رفتار نرم قابل توجه و استحکام کافی ساخته شده و خواص مکانیکی آن‌ها تعیین شده است. نتایج حاصل نشان داد که با افزودن نانوذره استحکام رزین اپوکسی حدود ۸٪ بهبود پیدا می‌کند. پس از آن، به صورت آزمایشگاهی، ظرفیت باربری نمونه‌های شیاردار در شرایط مود I بارگذاری شکست تعیین شدند و سپس با استفاده از نرم افزار المان محدود و معیار شکست ترد بیشترین تنش محیطی، ظرفیت باربری نمونه‌ها به صورت تئوری محاسبه شدند. در نهایت این نتیجه حاصل شد که میانگین اختلاف نتایج تجربی و تئوری ۶٫۷٪ می‌باشد و با افزایش زاویه نوک شیار از ۱ میلی متر به ۴ میلی متر مقدار خطای نتایج تجربی از ۴/۹٪ تا ۹/۲٪ افزایش می‌یابد، و هم‌چنین مشخص شد که روش جدید مفهوم ماده معادل که بر مبنای دیدگاه چگالی انرژی کرنشی است، با ترکیب شدن با معیار شناخته شده شکست ترد "بیشترین تنش محیطی"، نتایج تجربی را به خوبی پیش بینی می‌کند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچگونه تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- Mohan P. A critical review: the modification, properties, and applications of epoxy resins. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2013 Jan 15;52(2):107-25.
- 2- Montazeri A, Javadpour J, Khavandi A, Tcharkhtchi A, Mohajeri A. Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. *Materials & Design*. 2010 Oct 1;31(9):4202-8.
- 3- Lorenz H, Fritzsche J, Das A, Stöckelhuber KW, Jurk R, Heinrich G, Klüppel M. Advanced elastomer nanocomposites based on CNT-hybrid filler systems. *Composites Science and Technology*. 2009 Oct 1;69(13):2135-43.
- 4- Geim AK, Novoselov KS. The rise of graphene. *Nature materials*. 2007 Mar;6(3):183-91.