

شبیه‌سازی چند مقیاسی المان محدود و پیش‌بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت لاستیکی پایه SBR تقویت‌شده با دوده

میرحمیدرضا قریشی (استاد)، فرود عباسی سورکی (استاد) و احمد الماسی* (دانشجوی دکتری)

گروه لاستیک، پژوهشگاه فرایند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

ahmadeliyaalmasi@gmail.com

چکیده: در این پژوهش پیش‌بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های لاستیکی پایه SBR تقویت‌شده با پرکننده‌ی دوده، توسط روش شبیه‌سازی چند مقیاسی المان محدود انجام شد. یک حجم‌کننده که شامل ماتریس، پرکننده و فاز میانی است در نظر گرفته شد. ذرات پرکننده به‌صورت تصادفی، در مقادیر مختلف، در بستر ماتریس توزیع شدند. خصوصیات مواد از برازش داده‌های تجربی توسط نرم‌افزار تعیین شدند. سپس مدل‌های هندسی تولیدشده، با اعمال شرط مرزی تناوبی و تحت بارگذاری کششی توسط نرم‌افزار مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند و سپس نتایج حاصل، از مقیاس میکرو به مقیاس ماکرو (اندازه‌ی واقعی کامپوزیت) توسط روش‌های همگن‌سازی تعمیم داده شدند. نتایج تنش و کرنش به‌دست آمده از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی مقایسه شدند تا دقت و کارایی روش استفاده‌شده مورد ارزیابی قرار بگیرد. میدان کرنش در حجم‌کننده مورد بررسی قرار گرفت و ناهمگونی در میزان تغییر شکل، تفاوت در میزان پاسخ ماتریس، فاز میانی و پرکننده در کنار پدیده‌ی کرنش تشدید یافته مشاهده شدند و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت، لاستیک، شبیه‌سازی، چند مقیاسی، روش المان محدود

مقدمه

شد. ابتدا یک آمیزه خالص (Neat) بدون افزودن دوده تهیه و سپس سه آمیزه دیگر با افزودن مقادیر مختلف دوده N330 (۳۰، ۵۰ و ۷۰ پارت) به آمیزه پایه ساخته شدند. پس از آن نمونه‌های پخت شده به‌صورت ورقه‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه و خواص مکانیکی آن‌ها شامل نمودار تغییرات تنش برحسب کرنش در حالت کششی مطابق استاندارد ASTM D412C به‌دست آمدند.

شبیه‌سازی و مدل المان محدود

مدل مواد

برای بیان رفتار مکانیکی جزء لاستیکی کامپوزیت از مدل ابرکشان نئوهوکی [۴] با مقادیر مدول برشی و توده (Bulk) 0.273 MPa و 165.3 MPa استفاده شد. مقادیر عددی مدول برشی و توده از برازش داده‌های تجربی تنش برحسب کرنش و تراکم حجمی توسط نرم‌افزار MCalibration [۵] تعیین شدند. همچنین رفتار مکانیکی پرکننده (دوده) و ناحیه فازی میانی با مدل کشسان خطی بیان شدند. مقدار مدول کشسانی دوده برابر با 8000 MPa همراه با نسبت پواسون 0.3 در نظر گرفته شد [۶]. مدول کشسانی ناحیه فاز میانی نیز با استفاده روش پیشنهادی در مرجع [۳] تعیین شد که برابر با 1500 MPa به‌دست آمد. نسبت پواسون فاز میانی نیز برابر 0.3 در نظر گرفته شد.

مدل هندسی

برای ساخت مدل هندسی (RVE) چهار کامپوزیت مورد مطالعه (آمیزه خالص بدون دوده و آمیزه‌های پر شده با دوده در مقادیر ۳۰، ۵۰ و ۷۰ پارت) از نرم‌افزار Digimat [۷] استفاده شد. RVE ساخته‌شده به‌صورت مکعب بوده و طول هر ضلع آن برابر با 0.16 m میکرون انتخاب شد. ضخامت ناحیه میانی نیز برابر با ۱۰ درصد ابعاد پرکننده فرض شد. شکل ۱ هندسه سه‌بعدی ساخته‌شده برای چهار نمونه یادشده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای نمونه فاقد دوده (آمیزه خالص) یک مکعب ساده در نظر گرفته شد. در مقابل برای نمونه‌های حاوی دوده متناسب با نسبت حجمی دوده در هر آمیزه، ذرات پرکننده و فاز میانی به‌صورت اتفاقی (Random) در داخل (RVE) توزیع شدند. ابعاد ذرات پرکننده به‌صورت توزیع اتفاقی بین ۲۸ تا ۳۶ نانومتر فرض شدند.

پیش‌بینی خواص مکانیکی آمیزه‌ها یا کامپوزیت‌های لاستیکی به‌دلیل پیچیدگی برهمکنش ماتریس پلیمری و ذرات پرکننده همانند اندازه، نوع و شکل پرکننده، ساختار پرکننده و تجمع آن، اثر فاز میانی و مد بارگذاری همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. برای رسیدن به این هدف از دو روش مدل‌سازی ماکرو مانند مدل‌های بر پایه کرنش تشدید یافته (Amplified Strain) [۱] و میکرو مانند مدل‌سازی چند مقیاسی [۲ و ۳] استفاده می‌شود. در روش نخست بدون وارد شدن به ساختار درونی کامپوزیت و با در نظر گرفتن آن به‌عنوان یک ماده همگن، پیش‌بینی رفتار مکانیکی صورت می‌پذیرد. از سوی دیگر در مدل‌سازی‌های میکرو، ماده به‌صورت ناهمگن در نظر گرفته‌شده و اثر و نقش اجزاء تشکیل‌دهنده شامل ماتریس لاستیکی، پرکننده و فاز میانی به‌طور جداگانه در محاسبات لحاظ می‌شود. در مدل‌سازی چند مقیاسی (میکرو)، شکل هندسی هر یک سه فاز (پلیمر خالص، پرکننده و فاز میانی) در یک جزء حجمی با ابعاد بسیار کوچک که کننده (Representative Volume Element, RVE) کامپوزیت اصلی است در نظر گرفته می‌شود. سپس (RVE) ساخته‌شده با فرض این‌که کامپوزیت نهایی از تکرار تناوبی (Periodic) آن ایجاد می‌شود، توسط روش المان محدود تحلیل می‌شود. در این‌جا خواص هریک از فازهای تشکیل‌دهنده به‌طور مجزا در شبیه‌سازی المان محدود وارد شده و نتایج به‌دست‌آمده به مقیاس بزرگ‌تر (ابعاد اصلی کامپوزیت) با کمک یک روش همگن‌سازی (Homogenization) تعمیم داده می‌شود. در این کار پژوهشی رفتار مکانیکی یک آمیزه لاستیکی پایه SBR محلولی توسط مدل‌سازی چند مقیاسی مورد مطالعه قرار گرفت که در ادامه جزئیات آن آورده شده است.

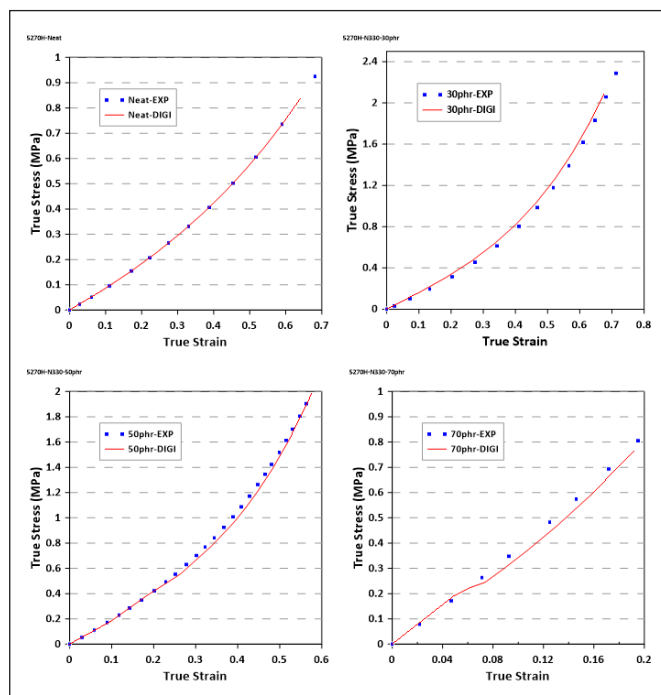
بخش تجربی

مواد اولیه و آمیزه کاری

چهار آمیزه لاستیکی بر پایه کائوچوی SBR محلولی گونه 5270H ساخت شرکت کومهو تهیه شدند. بدین منظور از سامانه پخت گوگردی و دو شتاب‌دهنده نوع معمولی (Conventional) همراه با سایر اجزای آمیزه کاری شامل روغن آروماتیک، آنتی‌اکسیدان، ضد تخریب، اکسید روی و اسید استئاریک استفاده

مدل المان محدود

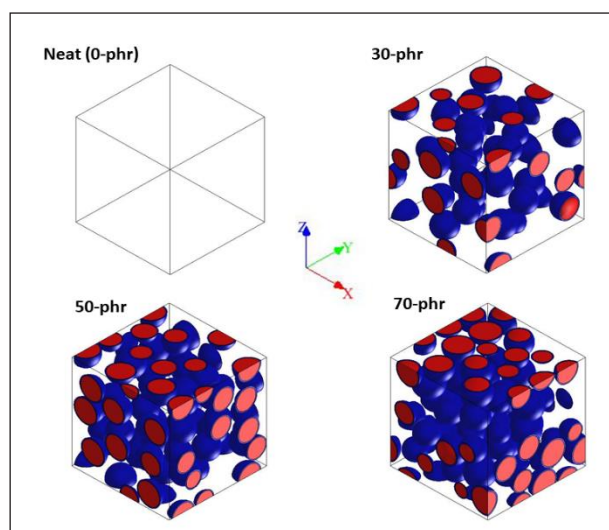
فاقد پرکننده انطباق بسیار خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی وجود دارد که حاکی از درستی روش و نحوه انتخاب پارامترها، داده‌های اولیه و شرط مرزی انتخابی است.



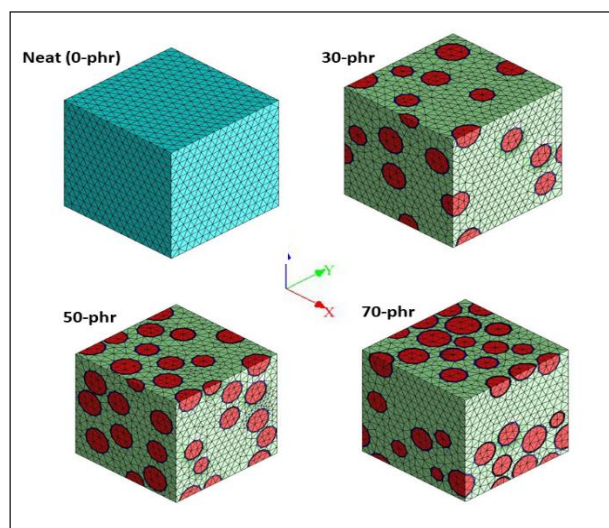
شکل ۳- تغییرات تنش واقعی بر حسب کرنش واقعی برای چهار آمیزه مختلف در دوحالت پیش‌بینی شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده تجربی

با افزودن پرکننده به ماتریس لاستیک، همان‌گونه که انتظار می‌رود به‌دلیل پیچیده شدن رفتار مکانیکی و برهم‌کنش مابین پرکننده، ماتریس پلیمری و فاز میانی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌شده انحراف به‌وجود می‌آید که میزان آن با افزایش مقدار پرکننده تشدید می‌شود. این مطلب برای مقدار بالای پرکننده (۷۰ پارت) کاملاً مشهود است؛ اما در مجموع چنین می‌توان گفت که این روش محاسباتی کاربردی بوده و می‌تواند تخمین کمی بسیار خوبی از مقدار افزایش خواص مکانیکی با افزودن پرکننده بدهد. برای بررسی بیشتر توزیع کرنش واقعی در نمونه‌های بدون پرکننده و با ۳۰ پارت پرکننده (دوده) در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین، در این شکل توزیع کرنش برای نمونه با ۳۰ پارت دوده برای قسمت‌های لاستیکی و پرکننده (به‌طور مجزا) نیز آورده شده است. برای هر دو نمونه (بدون پرکننده و با ۳۰ پارت پرکننده) فرض شد که مقدار کرنش اعمال شده به نمونه در حالت ماکرو برابر با ۰٫۲۵ باشد. مطابق فرض اولیه و شرط مرزی تناوبی مقدار کرنش در نمونه اصلی (ماکرو) و هندسه (RVE) یا میکرو نیز با یکدیگر برابر است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود در نمونه بدون پرکننده توزیع کاملاً یکنواختی از کرنش در (RVE) وجود داشته که بین ۰٫۲۲۲ تا ۰٫۲۲۴ است. این مقادیر را می‌توان با تقریب بسیار خوبی برابر با کرنش اولیه اعمال شده (۰٫۲۵) در نظر گرفت. از سوی دیگر در نمونه با ۳۰ پارت دوده توزیع کرنش کاملاً ناهمگون بوده به‌طوری‌که بیشینه کرنش به حدود ۱٫۱۷۹ (تقریباً ۴٫۷ برابر کرنش اولیه اعمال شده) می‌رسد. دلیل این امر نیز اختلاف بسیار زیاد بین سفتی ماتریس لاستیکی و ذرات پرکننده بوده که منجر به ایجاد بیشترین تغییر شکل و بالطبع بیشترین کرنش در قسمت لاستیکی که سفتی پایین‌تری نسبت به پرکننده دارد می‌شود. افزون‌بر آن، به‌دلیل توزیع اتفاقی ذرات پرکننده در برخی نقاط، نمونه تحت بار فشاری قرار گرفته و از این‌رو کرنش منفی می‌شود. این پدیده کرنش تشدید یافته نامیده شود. همچنین این اختلاف در مدهای برشی نیز وجود داشته در جای خود قابل‌بحث و بررسی است.

برای ساخت مدل المان محدود و مرحله پیش‌پردازش و نیز محاسبات همگن‌سازی (تعمیم از مقیاس میکرو به ماکرو) از نرم‌افزار Digimat و از نرم‌افزارهای Digimat جهت محاسبات المان محدود (پردازش) و Abaqus [۸] برای محاسبات المان محدود و تعیین توزیع تنش، کرنش و انرژی در اجزاء تشکیل‌دهنده کامپوزیت استفاده شد. شکل ۲ مدل شبکه‌بندی شده المان محدود مدل‌های هندسی (RVE) انتخاب شده را نشان می‌دهد که متناظر با تصاویر نشان داده شده در شکل ۱ هستند. برای ساخت این شبکه‌ها به‌دلیل پیچیدگی این شکل‌ها که از سه فاز جداگانه با توزیع اتفاقی ساخته شده‌اند، از المان‌های چهاروجهی (Tetra-hedral) استفاده شد. این مدل‌ها تحت بار کششی در جهت محور x قرار گرفته و تحلیل المان محدود غیرخطی بر روی آن‌ها صورت گرفت. همچنین از شرط مرزی تناوبی (Periodic) نیز استفاده شد. بدین ترتیب که فرض شد کرنش اعمال شده به مدل هندسی (RVE) برابر با مقدار متناظر اعمال شده به نمونه اصلی باشد.



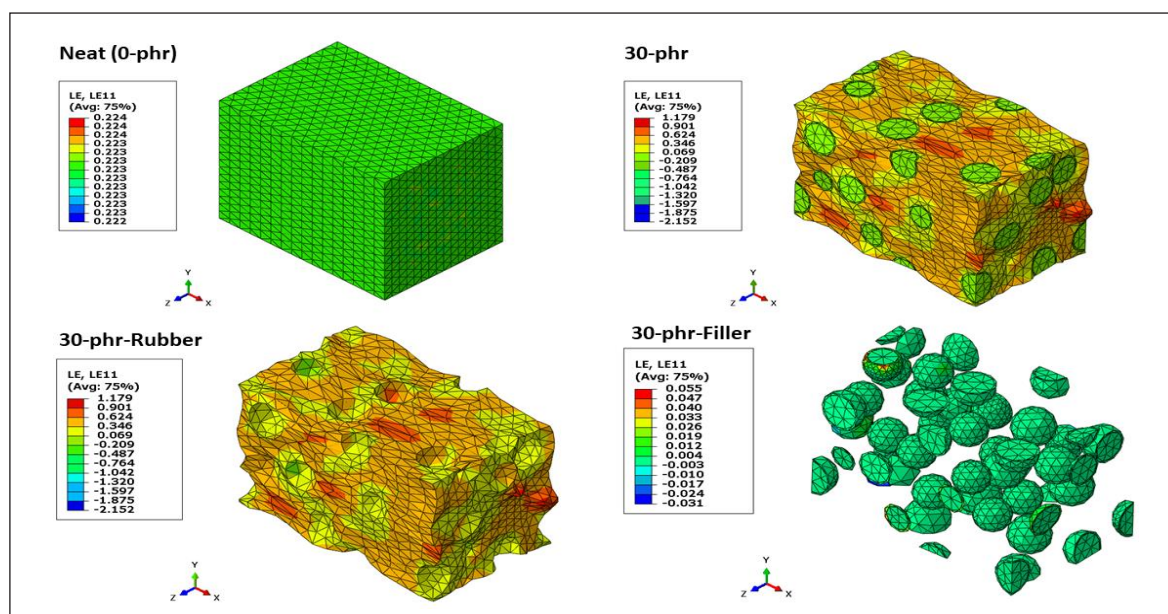
شکل ۱- مدل هندسی RVE برای چهار آمیزه با مقادیر مختلف دوده



شکل ۲- شبکه المان محدود چهار آمیزه با مقادیر مختلف دوده

نتیجه‌ها و بحث

شکل ۳ نمودار تنش واقعی (True Stress) بر حسب کرنش واقعی (True Strain) برای چهار نمونه مورد مطالعه که توسط متوسط گیری حجمی (Volumetric Mean) به کمک نرم‌افزار Digimat به‌دست آمده‌اند همراه با داده‌های تجربی مربوط به هر کدام از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای نمونه



شکل ۴- توزیع کرنش واقعی در هندسه (RVE) برای نمونه بدون پرکننده (بالا سمت چپ)، نمونه با ۳۰ پارت دوده (بالا سمت راست)، قسمت‌های لاستیک و پرکننده نمونه با ۳۰ پارت دوده (پایین سمت چپ و راست)

نتیجه‌گیری

را به‌خوبی پیش‌بینی کرد. افزون بر آن، با مطالعه توزیع کرنش، تنش و انرژی در داخل RVE می‌توان پدیده‌هایی همانند کرنش تشدید یافته و بروز کرنش‌ها و تنش‌های برشی در حالت بارگذاری کششی را مشاهده کرد و مورد بررسی قرار داد.

با استفاده از ساخت مدل المان محدود در مقیاس‌های بسیار کوچک (RVE) که در آن اجزاء تشکیل‌دهنده یک کامپوزیت لاستیکی شامل ماتریس پلیمری، پرکننده و فاز میانی به‌طور جداگانه مدل شده باشند می‌توان خواص نهایی آمیزه

مراجع

- [1] Ghoreishy MHR, Abbasi-Sourki F. Mechanical Behavior of Filled Rubber Compounds: Hyper-Elastic Models Based on Strain Amplification. Iran J Polym Sci Technol 2024; 37: 169–179.
- [2] Barghamadi M, Ghoreishy MHR, Karrabi M, et al. Multiscale modeling of hyperviscoelastic behavior of particulate rubber composites based on hybrid silica/carbon black filler system. Polym Compos 2024; 45: 4359–4373.
- [3] Andideh M, Ghoreishy MHR, Soltani S, et al. Effects of nonlinear hyper-viscoelasticity and matrix/fiber debonding on the mechanical properties of short carbon fiber/styrene-butadiene rubber composites under cyclic uniaxial loading using a multiscale finite element model. Polym Compos 2023; 44: 5159–5172.
- [4] Ghoreishy MHR, Abbasi-Sourki F. Practical Aspects of the Finite Element Modeling of Industrial Rubber Products: Some Case Studies. In: Wythers MC (ed) Advances in Materials Science Research. New York: Nova Science Publishers, Incorporated, 2025, pp. 47–91.
- [5] MCalibration, Veryst Engineering, Needham, MA, USA. 2020.
- [6] Kropotin OV, Rogachev EA, Kalenchuk AA. Influence of Carbon Black on the Elastic Modulus of Composite Materials Based on Linear Low Density Polyethylene at Various Structural Levels. Mech Compos Mater 2025; 61: 67–78.
- [7] Digimat, e-Xstream Engineering, MSC Softwar Corporation, User's Manual_Release 2017.0, Luxembourg, 2017.
- [8] Abaqus Analysis User's Guide, Abaqus Documentation, Simulia Inc, n.d. 2020.