



مطالعه تجربی اثر ذرات پودر Fe_2O_3 بر خواص الکتریکی و مکانیکی کامپوزیت پایه پلیمری جاذب رادار در باند x

محمد حیدری قاسم آبادی^۱، رضا سرخوش^{۲*}، هادی صبوری^۳، محمد کاظمی نصرآبادی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

^۳ دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴

چکیده

در دنیای امروز، افزایش استفاده از امواج الکترومغناطیسی در شبکه‌های صنعتی، ارتباطات مدرن و سامانه‌های راداری نظامی و غیرنظامی، نیاز به مواد جاذب با عملکرد الکترومغناطیسی مناسب و استحکام مکانیکی بالا برای سازه‌های هوافضایی را افزایش داده است. در این پژوهش، اثر پرکننده پودر Fe_2O_3 بر خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت اپوکسی Fe_2O_3 بررسی شد. نمونه‌هایی با درصد‌های وزنی مختلف ساخته و برای ارزیابی خواص مکانیکی، آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای و برای بررسی خواص الکتریکی، آزمون ثابت دی‌الکتریک انجام شد. سپس نتایج با رزین اپوکسی خالص مقایسه گردید. بیشینه تلفات بازتابش برای رزین خالص، نمونه‌های حاوی ۳۷/۵ و ۷۵ درصد وزنی Fe_2O_3 به ترتیب ۱/۹-، ۷- و ۸/۱- دسی‌بل بود. بیشینه استحکام کششی این نمونه‌ها به ترتیب ۲۶، ۳۰ و ۲۳ مگاپاسکال و بیشینه استحکام خمشی آن‌ها ۸۲/۷، ۷۱/۹ و ۶۸/۵ مگاپاسکال به دست آمد. نتایج نشان داد افزودن پودر Fe_2O_3 خواص الکتریکی کامپوزیت را بهبود بخشیده، اما موجب کاهش خواص مکانیکی آن شده است.

کلمات کلیدی: امواج الکترومغناطیسی؛ خواص الکتریکی؛ پودر Fe_2O_3 ؛ خواص مکانیکی؛ کامپوزیت پلیمری.

Experimental study of the effect of Fe_2O_3 ferrite particles on the electrical and mechanical properties of polymer-based composite radar absorber in the x-band

Mohammad Heydari Ghasemabadi¹, Reza Sarkhosh^{2*}, Hadi Sabouri³, Mohammad Kazemi Nasrabadi⁴

¹PhD. Student, Graduate Center, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran.

² Assist. Prof., Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

³ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

⁴ Assoc. Prof., Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

The increasing demand for electromagnetic wave applications in complex industrial networks, modern communications, and advanced military and civilian radar systems has created a need for electromagnetic absorbing materials with broad performance, high mechanical strength, and suitability for aerospace structures. This study investigates the effect of Fe_2O_3 powder filler on the mechanical and electrical properties of epoxy/ Fe_2O_3 composites. Samples containing different Fe_2O_3 weight percentages were fabricated to determine the optimum composition. Tensile and three-point bending tests evaluated the mechanical properties, while dielectric constant measurements assessed the electrical performance. The properties of the composites were compared with those of pure epoxy resin. The maximum reflection losses for pure epoxy, 37.5 wt% Fe_2O_3 , and 75 wt% Fe_2O_3 were -1.9, -7.0, and -8.1 dB, respectively. Their maximum tensile strengths were 30, 26, and 23 MPa, while maximum flexural strengths were 82.7, 71.9, and 68.5 MPa, respectively. The results show that Fe_2O_3 filler significantly improved electromagnetic performance but reduced the mechanical strength of the epoxy composites.

Keywords: Electromagnetic waves; electrical properties; Fe_2O_3 powder; mechanical properties; polymer composite.

۱- مقدمه

امواج مایکروویو به عنوان رکن اصلی و بخش جدایی ناپذیر فناوری های پیشرفته امروزی، در کاربردهایی چون سیستم های ارتباطات زمینی، تجهیزات هدایت و ناوبری هوایی و دریایی نسل پنجم و ششم، رادارهای مختلف هواشناسی، فرودگاهی و مراقبتی و فناوری های پنهان کاری و مخفی سازی سازه های زمینی، هوایی و دریایی کاربرد گسترده ای داشته و نقش محوری ایفا می کنند. با این وجود، در این سامانه ها، دستیابی به مواد جاذب با پهنای باند وسیع (۸-۴۰ گیگاهرتز) که هم زمان خواص و پایداری مکانیکی مطلوب نیز دارا باشند، از چالش های کلیدی این حوزه به شمار می آید [۱]. پلیمرهای پایه اپوکسی به خاطر انعطاف پذیری و خواص مناسب، به طور گسترده در حوزه های مختلف نظیر هوافضا، کشتی سازی، خودروسازی و غیره به کار می رود [۲،۳]. این پلیمرها علیرغم خواص فیزیکی و مکانیکی ویژه ای که دارند، به دلیل عواملی نظیر شکنندگی، مقاومت کم در رشد ترک و استحکام کم، موجب شده اند تا پژوهش ها به سمت تولید تقویت کننده های آلی و غیر آلی سوق داده شوند. مواد گوناگونی همچون نانولوله های کربنی، نانوصفحات گرافنی، نانومواد سیلیکا، اکسید گرافن و پودرهای فریت به زمینه پلیمرهای ترموست اضافه شده اند [۴،۵،۶]. افزودن مواد پرکننده و الیاف مختلف در کامپوزیت ها باعث تغییر در خواص الکترومغناطیسی، مکانیکی و قابلیت جذب امواج مایکروویو خواهد شد. لذا محققان مطالعات زیادی بر روی تأثیر مواد و الیاف اضافه شده بر ریزساختار، ضریب گذردهی الکتریکی، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، ثابت دی الکتریک، ضریب تلفات، قابلیت جذب، تلفات بازتابش، مدول الاستیسیته، استحکام کشش، مقاومت به خمش، مقاومت به ضربه و ... کامپوزیت ها و نانوکامپوزیت های جاذب امواج مایکروویو انجام داده اند که به تعدادی از آن ها در ادامه اشاره شده است.

عبدالهی آذغان و همکاران [۴] تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن عامل دار بر رفتار مکانیکی کامپوزیت های وینیل استر/الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج، نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن عامل دار، بهترین خواص را نشان داد. سرخوش و همکاران [۵] با افزودن فوم سیلیکا به زمینه اپوکسی، خواص مکانیکی و الکتریکی نمونه های تولیدی را بررسی نمودند که نتایج نشان داد استحکام کششی و خمش

سه نقطه نمونه ها کاهش یافته است، ولی نتایج خواص الکتریکی حاکی از آن بود که افزودن پرکننده فوم سیلیکا به رزین، تأثیر منفی بر روی خواص الکتریکی نمونه ها نداشته است. تانگ و همکاران [۶] جهت بهبود خواص مکانیکی، نانوذرات اکسید گرافن و سیلیکا را به عنوان تقویت کننده به زمینه اپوکسی اضافه کردند. دوراما و همکاران [۷] تأثیر افزودن نانوذرات فوم سیلیکا به زمینه اپوکسی را بررسی کردند که طبق نتایج، افزودن این نانوذرات باعث افزایش مدول یانگ شده است. سرخوش و همکاران [۸] در پژوهشی فرآیند آماده سازی کامپوزیت پلیمری تفلون تقویت شده با الیاف شیشه به روش پخت معمولی را انجام دادند. بیشینه استحکام کششی و مدول یانگ کششی به ترتیب برابر با ۱۳۰ مگاپاسکال و ۳/۶۵ گیگاپاسکال و بیشینه ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات در باند X به ترتیب برابر با ۲/۳۷ و ۰/۰۹۶ به دست آمد. در تحقیقی دیگر، سرخوش و همکاران [۹] به طراحی، ساخت و بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت اپوکسی/کنف پرداختند که بیشینه استحکام کششی ۶۲/۴۲ مگاپاسکال، مدول الاستیک ۴/۴۳ گیگاپاسکال، ثابت دی الکتریک ۴/۷۴ و ضریب تلفات ۰/۰۵۳ و میانگین استحکام خمشی ۹۹/۱۹ مگاپاسکال به دست آمد. طالعی فرد و همکاران [۱۰] استحکام کشش و ثابت دی الکتریک کامپوزیت های پایه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه سری E و D را بررسی کردند. بالاترین استحکام کششی (۳۲۰/۹ مگاپاسکال) برای ترکیب الیاف شیشه سری E و رزین اپوکسی و پایین ترین ثابت دی الکتریک (۲/۸۵) برای الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی حاصل شد. سرخوش و همکاران [۱۱] خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت نیمه زیست تخریب پذیر پلی پروپیلن/کنف را بررسی کردند. ماسری و همکاران [۱۲] با افزودن نانوذرات فریت-کبالت به اپوکسی، خواص مکانیکی را ارزیابی کردند. نادزری و همکاران [۱۳] به مرور خواص مکانیکی کامپوزیت های هیبریدی کنف/شیشه پرداختند. رستمیان [۱۴] خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف کربن را بهینه سازی کرد. کیم و همکاران [۱۵] روش رسوب دهی برای ساخت نانوکامپوزیت ها را به کار بردند. تیانگ [۱۶] پیشرفت های نانوکامپوزیت های پلیمری را مرور کرد. کوتون و همکاران [۱۷] تأثیر شکل نانوذرات بر خواص مکانیکی را بررسی کردند. مون و همکاران [۱۸] نشان دادند استحکام کششی با کاهش

است تا درک عمیق تری از نقش این ترکیب در بهبود کارایی جاذب‌های میکروویو فراهم شود.

۲- مطالعه تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

رزین مورد استفاده در این پژوهش، رزین اپوکسی LR 2025 و سخت‌کننده HE 1515 است که از شرکت پیوند مبتکر پارس تهیه شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی رزین مطابق با داده‌های فنی شرکت پیوند مبتکر پارس در جدول ۱ آورده شده است (لازم به توضیح است که واحد استحکام در جدول ۱ بر اساس kgf/cm^2 می‌باشد. تبدیل به MPa طبق رابطه (۱) انجام می‌پذیرد).

(۱) $\text{kgf/cm}^2 \approx 10.2 \text{ MPa}$ یا $1 \text{ MPa} \approx 0.098 \text{ kgf/cm}^2$ پودر مورد استفاده در این پژوهش، پودر Fe_2O_3 می‌باشد که جهت تعیین اندازه دانه پودر، از میکروسکوپ الکترونی آزمایشگاه رازی استفاده شد که نمونه تصویر آن در شکل ۱ آورده شده است. مشخصات فنی پودر مورد استفاده، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱ خواص رزین اپوکسی LR 2025

فیزیکی			
خاصیت	دمای کاری	قطر ۵۰	قطر ۵۰
	[°C]	میلی متر و	میلی متر و
		ضخامت ۳	ضخامت ۲۶
		میلی متر	میلی متر
عمر مصرف	۲۵	۴۵ دقیقه	۳۵ دقیقه
زمان ژل شدن	۲۵	۶۰ دقیقه	۶۰ دقیقه
زمان خشک شدن		۷۲۰ دقیقه	۷۲۰ دقیقه
حرارتی و الکتریکی			
خاصیت	مقدار	واحد	استاندارد (ASTM)
ضریب	۲/۵	-	D150
دی‌الکتریک			
مقاومت	۶۱	[°C]	D648
حرارتی تا			
نقطه نرمی			

اندازه نانوذرات افزایش می‌یابد. تادس و همکاران [۱۹] خواص نانوکامپوزیت‌های پلیمری را بررسی کردند. در سال‌های اخیر، توجه گسترده‌ای به استفاده از ساختارهای چندفازی، متخلخل و متامتریالی برای بهبود کارایی جاذب‌های میکروویو معطوف شده است. شیانگ و همکاران [۲۰] با سنتز میکروکره‌های متخلخل SiC/SiO_2 نشان دادند که طراحی ناهمگن دی‌الکتریک، سبب بهبود تطابق امپدانس و افزایش جذب در باند وسیع می‌شود. وی و همکاران [۲۱] نیز با تولید ساختار ترکیبی نیکل گل‌مانند/نانوسیم‌های SiC موفق به ایجاد عملکرد هم‌زمان جذب امواج میکروویو و پنهان‌کاری فروسرخ شدند. دونگ و همکاران [۲۲] با بهره‌گیری از آلیاژ FeCo-C در قالب متامتریال، ویژگی جذب تقویت‌شده و پهنای باند گسترده‌تری را نسبت به مواد مرسوم گزارش کردند. لو و همکاران [۲۳] در مروری روشمند نشان دادند که طراحی اغتشاش‌های ساختاری و ناهمسانگردی در مقیاس نانو، کلید اصلی برای دستیابی به جذب بالا و پایداری مکانیکی مطلوب است. شی و همکاران [۲۴] با ساخت فوم کامپوزیت Fe_3O_4 /گرافن به جذب بالایی دست یافتند. در همین راستا، زنا و همکاران [۲۵] نیز مرور جامعی بر اثرگذاری نانوافزودنی‌ها همچون گرافن، فریت و فلزات گذار بر خواص دی‌الکتریک و مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری ارائه داده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که بهینه‌سازی برهم‌کنش سطحی و توزیع یکنواخت ذرات برای حفظ تعادل میان جذب بالا و استحکام مکانیکی ضروری است. با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته، مطالعات اندکی به بررسی روشمند تأثیر میکروذرات پودر Fe_2O_3 با درصدهای وزنی متفاوت در ماتریس اپوکسی پرداخته‌اند. بررسی هم‌زمان رفتار دی‌الکتریک، ضریب تلفات و ویژگی‌های بازتابش در گستره‌ی ۸-۱۲ گیگاهرتز همراه با خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی و خمشی، کمتر مورد توجه بوده است. انتخاب پودر Fe_2O_3 به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن از جمله هزینه پایین، در دسترس بودن بالا، پایداری شیمیایی مناسب، و دارا بودن خواص دی‌الکتریک و مغناطیسی قابل توجه در محدوده فرکانس میکروویو صورت گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع اثر درصد وزنی و ویژگی‌های فاز اکسید آهن (Fe_2O_3) بر عملکرد الکترومغناطیسی و مکانیکی کامپوزیت اپوکسی طراحی شده

جدول ۲ مشخصات پودر Fe_2O_3		
فرمول مولکولی	Fe_2O_3	واحد
شکل	پودر	-
رنگ	قرمز	-
اندازه دانه	۰/۳۳	(μm)
وزن مولکولی	۱۵۹/۶۹	(gr/mol)
چگالی	۵/۲۵	(gr/cm ³)

۲-۲- فرایند آماده‌سازی و تولید کامپوزیت

در اتصال قطعات هوافضایی کامپوزیتی مانند قسمت‌های بالا و پایین بال یا بدنه به یکدیگر نیاز به چسب‌های با ویسکوزیته بالا می‌باشد که خمیری شکل باشند لذا ترکیب پرکننده Fe_2O_3 با رزین با توجه به شکل خمیری آن، از روان شدن رزین حین اتصال و چکه کردن آن جلوگیری می‌کند و با توجه به اهمیت پنهان‌کاری در قطعات هوافضایی، استفاده از پودرهای پودر با قابلیت جذب امواج رادیویی در ساخت چسب‌های اتصالات حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش، با الگوبرداری از مرجع [۲۴]، حداکثر مقدار پودر Fe_2O_3 معادل ۷۵ درصد وزنی (نسبت به رزین) در نظر گرفته شد. برای بررسی روشمند تأثیر میزان پرکننده، سه سطح شامل ۵۰ و ۱۰۰ درصد از این حداکثر مقدار انتخاب گردید. بدین ترتیب، نمونه‌ها با درصدهای وزنی ۱۰۰، ۳۷/۵ و ۷۵ درصد (به ترتیب معادل ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درصد حداکثر مرجع) ساخته شدند. در ساخت تمام نمونه‌ها، سخت‌کننده مطابق با داده‌های فنی شرکت سازنده به نسبت ۱۵ به ۱۰۰ به رزین اپوکسی اضافه شده است. در شکل ۲-الف و شکل ۲-ب مواد استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است.



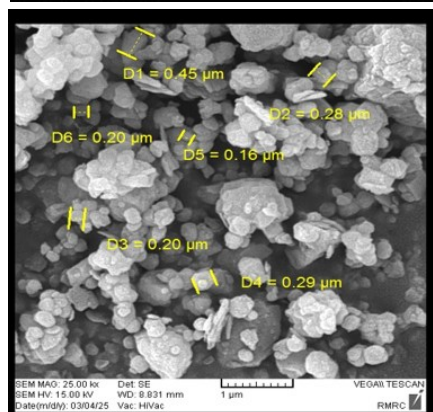
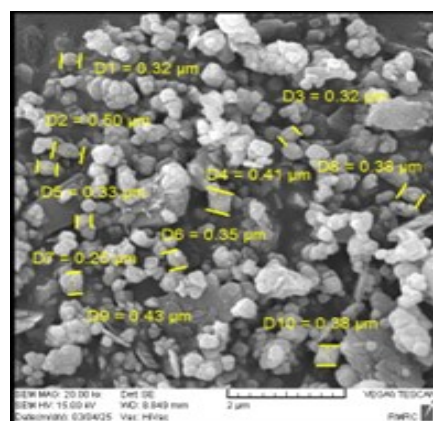
(ب)

(الف)

شکل ۲- مواد لازم جهت ساخت نمونه‌ها (الف) رزین اپوکسی

(ب) پودر Fe_2O_3

مقاومت	۸۰	[°C]	D648
حرارتی عملی			
مکانیکی			
خاصیت	مقدار	واحد	استاندارد
استحکام کششی	۵۰۳	kgf/cm ²	D368M
استحکام فشاری	۷۵۱	kgf/cm ²	D695M
استحکام خمشی	۶۵۲	kgf/cm ²	D790M
سختی	۸۰	Shore D	D2240
انرژی ضربه	۶/۳۹۸	kJ/m ²	D256



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی پودر Fe_2O_3

جدول ۳- مشخصات و وزن نمونه‌ها

شماره نمونه	مواد	رزین اپوکسی (gr)	سخت کننده (gr)	پودر Fe_2O_3 (gr)	نام اختصاری نمونه‌ها
۱	رزین اپوکسی خالص	۱۸۰	۲۷	-	R
۲	رزین اپوکسی پر شده با پودر Fe_2O_3 با ۳۷/۵ درصد وزنی	۱۸۰	۲۷	۷۷,۶۲۵	RF37.5
۳	رزین اپوکسی پر شده با پودر Fe_2O_3 با ۷۵ درصد وزنی	۱۸۰	۲۷	۱۵۵,۲۵	RF75



شکل ۴- قالب فولادی ساخته شده جهت ساخت نمونه‌ها



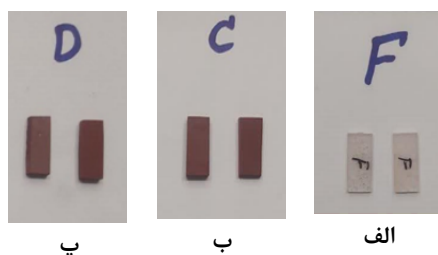
شکل ۵- قالب فولادی ساخته شده جهت ساخت نمونه‌ها

مواد استفاده شده در پژوهش برای ساخت نمونه‌ها، با درصدهای مختلف پودر Fe_2O_3 مطابق با جدول ۳ استفاده شده است. پودر Fe_2O_3 پس از وزن‌کشی با ترازو دقت صدم گرم به رزین اضافه گردید. نمونه مخلوط شده پودر Fe_2O_3 با رزین اپوکسی در شکل ۳ نشان داده شده است. بعد از هم زدن به روش دستی، جهت جلوگیری از کلوخه شدن پودر در داخل رزین، مخلوط حاصله به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت. سپس سخت کننده به ترکیب اضافه گردید. ترکیب رزین، سخت کننده و پودر Fe_2O_3 به مدت ۱۵ دقیقه به روش دستی هم زده شد. جهت جلوگیری از ته نشین شدن پودر به علت چگالی بالاتر، تا رسیدن به زمان ژل شدن هر ده دقیقه یک مرتبه ترکیب به روش دستی هم زده شد و قبل از شروع زمان ژل شدن محلول حاصل در قالب‌های آماده شده شکل ۴ ریخته شد. در ادامه پس از آماده سازی، قالب‌ها با تینر تمیزکاری شدند و جهت جلوگیری از چسبیدن قطعات به قالب، قالب‌ها سه مرحله واکس زده شدند و سپس مواد در درون قالب‌های شکل ۵ ریخته شدند. برای خارج شدن حباب‌های حاصل از هم زدن و فرآیند پخت، از دستگاه ارتعاش به مدت ۴۵ دقیقه استفاده گردید.

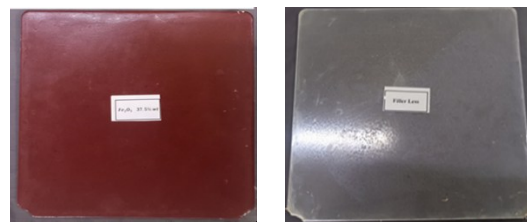
شکل ۳- رزین اپوکسی پر شده با پودر Fe_2O_3

پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها با احتیاط از قالب خارج شد و جهت عملیات پخت تکمیلی، نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دمای محیط قرار گرفتند. در شکل ۶ الف و ب تعدادی از نمونه‌ها نشان داده شده است.

تلف) و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی مختلط یک ماده جامد، ایزوتروپیک، مناسب است. این اندازه‌گیری برای محدوده فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۲۰ گیگاهرتز معتبر است. این محدوده دقیق نیست و بستگی به اندازه نمونه و اندازه خط انتقال موجبر مستطیلی نگهدارنده دارد (نمونه‌های بزرگ در فرکانس‌های پایین و نمونه‌های کوچک برای فرکانس‌های بزرگ). به عنوان یک روش غیر رزونانسی انتخاب هر تعداد فرکانس اندازه‌گیری گسسته در محدوده فرکانسی مناسب خواهد بود. برای پوشش کل محدوده فرکانسی استفاده از چند موجبر با ابعاد مختلف مورد نیاز است. هم چنین به طور کلی این آزمایش را می‌توان برای موجبرهای دایروی نیز به کار برد. نمونه‌های مورد آزمایش بایستی به اندازه کافی بلند باشند. برش نمونه‌ها بایستی دقیق و بدون بریدگی‌های نامرتب باشد؛ چرا که وجود هرگونه کوتاه یا بلندی نامنظم در اندازه نمونه‌ها باعث ورود هوای اضافی (ماده‌ای با دی الکتریک متفاوت) در لبه‌های مشترک نمونه با موجبر شده و نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نمونه‌ها بایستی بسیار تمیز و بدون آلودگی باشند. برای انجام این آزمون برای هر کدام از ۳ ماده ذکر شده، دو نمونه با ابعاد $10/16$ میلی‌متر، طول $22/86$ میلی‌متر و با ضخامت $2/5$ میلی‌متر همان گونه که در شکل ۸-الف، شکل ۸-ب و شکل ۸-پ نشان داده شده با استفاده از دستگاه واترجت برش زده شد. این ابعاد برابر با ابعاد تیغه‌ی دستگاه آزمون در نظر گرفته شدند.



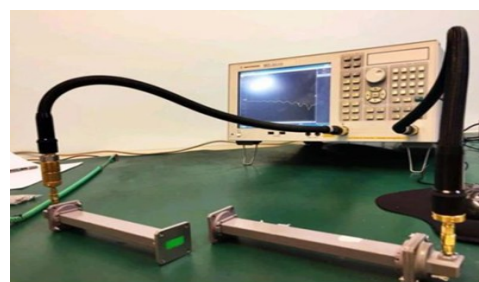
شکل ۸- نمونه‌های برش داده شده برای آزمون ثابت دی الکتریک (الف) نمونه بریده شده از رزین خالص (R) (ب) نمونه بریده شده از رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 با درصد وزنی $37/5$ (RF) (پ) نمونه بریده شده از رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 با درصد وزنی 75 (RF)



شکل ۶- الف) نمونه پخت شده بدون پرکننده (ب) نمونه پخت‌شده با پودر Fe_2O_3

۲-۳- آزمون ثابت دی الکتریک

آزمون ثابت دی الکتریک برای تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی کامپوزیت تولید شده انجام شد. آزمون ثابت دی الکتریک با استفاده از دستگاه تحلیل گر شبکه^۱ واقع در پژوهشگاه نصر، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، انجام شد.



شکل ۷- دستگاه تحلیل گر شبکه مورد استفاده در آزمون ضریب دی الکتریک

استاندارد اندازه‌گیری مشخصه‌های دی الکتریک مواد براساس استاندارد [۲۶] روش اندازه‌گیری موجبری دوپورت^۲ است. تکنیک موجبری مستطیلی نمونه‌ای از دسته‌بندی تکنیک‌های اندازه‌گیری است که تکنیک خط انتقال جهت دستیابی به ضریب گذردهی و نفوذپذیری مختلط نمونه نامیده می‌شود. در این تکنیک نمونه با سطح مقطع موجبری تطبیق و به همان اندازه پر می‌شود و میزان بازگشتی در طول نمونه اندازه‌گیری می‌شود. تکنیک‌های اندازه‌گیری خط انتقال به طور معمول دقیق‌تر از تکنیک تک پورتهی است. این تکنیک برای اندازه‌گیری گذردهی الکتریکی نسبی مختلط (ثابت دی الکتریک نسبی و

² Waveguide discontinuity

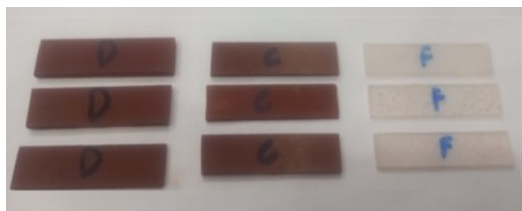
¹ Network Analyzer

۴-۲- آزمون کشش

از لغزش یا شکست لبه ی نمونه ها در داخل فک دستگاه آزمون کشش، برای دو لبه ی هر نمونه تب آماده سازی و نصب شد. ابعاد این تب ها ۴۰ میلی متر در ۲۵ میلی متر است. تب از جنس نمونه مورد آزمون بوده و پس از برش ابعاد، با ایجاد خراش های خطی و سطحی کم عمق با زاویه $\pm 45^\circ$ ، در سطح مشترک آن با نمونه ی آزمایش توسط چسب سیانواکریلات آغشته و تحت فشار ثابت متصل قرار داده شد و به آن زمان داده شد تا به استحکام برسد. پس از انجام آزمون، نمونه ها در استحکام کششی نهایی خود داخل دستگاه آزمون کشش دچار شکست شدند.

۵-۲- آزمون خمش

جهت انجام آزمون خمش سه نقطه، نمونه ها مطابق با استاندارد [۲۸] برش داده شد. براساس این استاندارد ضخامت قطعات ۴ میلی متر و فاصله دو تکیه گاه دستگاه خمش سه نقطه، ۳۲ برابر این ضخامت بوده که برابر با ۱۲۸ میلی متر است و طول نمونه باید ۲۰ درصد بیشتر از فاصله میان دو تکیه گاه باشد. طول نمونه ها در حالت استاندارد ۱۵۳/۶ میلی متر، و عرض نمونه نیز ثابت و برابر با ۱۳ میلی متر است. در صورت عدم امکان دسترسی به این ضخامت می توان با تغییر طول قطعه و حفظ نسبت فاصله دو تکیه گاه که ۳۲ برابر ضخامت است نمونه ای با ضخامت های متفاوت و در نتیجه طول متفاوت آماده نمود اما مقدار عرض ثابت است. ابعاد و اندازه نمونه ها مطابق استاندارد برابر با ضخامت ۲/۵ میلی متر، طول ۹۶ میلی متر فاصله بین دو تکیه گاه ۸۰ میلی متر و عرض ۱۳ میلی متر تعیین شد. برای هر ترکیب، تعداد ۳ نمونه آزمون خمش تهیه شد. تمامی نمونه ها از قطعاتی که فرایند ساخت آن تشریح شد برش داده شد همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نمونه های برش داده شده برای آزمون خمش

هنگامی که یک تیر با مواد همگن، دارای تکیه گاه های لولایی در دو انتها باشد و یک بار متمرکز در مرکز آن اعمال شود،

پس از ساخت قطعات، نمونه های آزمون کشش مطابق با استاندارد [۲۷] با استفاده از دستگاه واترجت، همانطور که در شکل ۹-الف نشان داده شده است، از صفحات برش داده شدند. در شکل های ۹-ب، ۹-پ و ۹-ت به ترتیب ابعاد نمونه های برش داده شده و تب گذاری شده مربوط به رزین خالص، رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 با درصد وزنی ۳۷/۵ و رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 با درصد وزنی ۷۵ نشان داده شده است. ابعاد نمونه ها مطابق با استاندارد برابر با ضخامت ۲،۵ میلی متر، طول ۲۵۰ میلی متر و عرض ۲۵ میلی متر می باشد. برای هر ترکیب، تعداد ۳ نمونه آزمون کشش تهیه گردید. برای انجام آزمون کشش از دستگاه یونیورسال (INSTRON R5500) استفاده شده است. مطابق دستورالعمل فنی، ظرفیت دستگاه ۲۰ تن و دامنه سرعت آزمایش ۰،۰۰۱ تا ۵۰۰ میلی متر بر دقیقه می باشد.



ب

الف

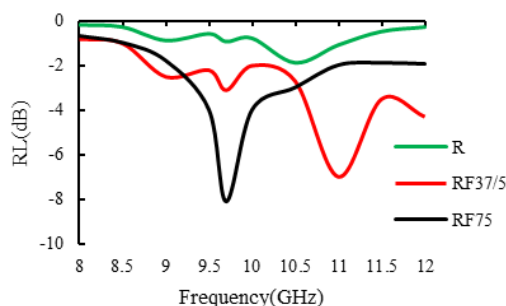


ت

پ

شکل ۹- (الف) برش نمونه ها با واترجت (ب) نمونه برش داده شده رزین خالص (پ) نمونه برش داده شده رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 با درصد وزنی ۳۷/۵ (ت) نمونه پر شده با پودر Fe_2O_3 با درصد وزنی ۷۵

این آزمون در دمای محیطی ۲۵ درجه سانتیگراد، رطوبت ۳۵ درصد و سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه انجام شده است که با توجه به استاندارد این سرعت برای بارگذاری شبه استاتیکی مطلوب است. طول نمونه بین دو فک دستگاه آزمون کشش ۱۶۰ میلی متر در نظر گرفته شد، بنابراین ۴۰ میلی متر از بخش بالای نمونه در داخل فک بالا و ۴۰ میلی متر از بخش پایین نمونه در داخل فک پایین قرار گرفت. به منظور جلوگیری



شکل ۱۱- نمودار مقایسه تلفات بازتابش نمونه‌ها با درصد وزنی‌های مختلف

جدول ۴- داده‌های تلفات بازتابش در فرکانس‌های مختلف

فرکانس (GHz)	R (dB)	RF37/5 (dB)	RF75 (dB)
۸	-۰/۲	-۰/۸	-۰/۷
۸/۵	-۰/۳	-۱	-۱
۹	-۰/۹	-۲/۵	-۱/۸
۹/۵	-۰/۶	-۲/۲	-۴
۹/۷	-۰/۹۵	-۳/۱	-۸/۱
۱۰	-۰/۸	-۲	-۴
۱۰/۵	-۱/۹	-۲/۷	-۳
۱۱	-۱/۱	-۷	-۲
۱۱/۵	-۰/۵	-۳/۵	-۱/۹
۱۲	-۰/۳	-۴/۳	-۱/۹۵

بررسی داده‌های تلفات بازتابش در جدول ۴ نشان‌دهنده رفتار پیچیده کامپوزیت‌های حاوی پودر در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز است. نمونه با ۳۷/۵ درصد وزنی پودر با میانگین تلفات ۲/۹۱- دسی‌بل، بهترین میانگین عملکرد را در کل پهنای باند از خود نشان می‌دهد که حاکی از توزیع یکنواخت‌تر تلفات در فرکانس‌های مختلف است. در مقابل، نمونه با ۷۵ درصد پودر اگرچه در فرکانس‌های خاصی مانند ۹/۷ گیگاهرتز به اوج تلفات ۸/۱- دسی‌بل می‌رسد، اما نوسانات بیشتری در عملکرد فرکانسی دارد که منجر به میانگین تلفات پایین‌تر (۲/۱۵- دسی‌بل) می‌شود. نمونه مرجع نیز با میانگین تلفات ۰/۸۵۵- دسی‌بل، پایین‌ترین کارایی جذب را تأیید می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه افزایش درصد پودر می‌تواند به اوج تلفات بالاتر در فرکانس‌های رزونانس منجر شود، اما ممکن است توزیع فرکانسی بهینه‌ای نداشته باشد. ترکیب ۳۷/۵

بیشینه تنش در پوسته بیرونی تیر و در میانه آن ایجاد می‌گردد. در آزمون خمش سه نقطه تنش در هر نقطه از نمودار نیرو-جابجایی می‌تواند با استفاده از رابطه (۲) بیان شود.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2)$$

در رابطه فوق σ میزان تنش در پوسته خارجی تیر و در میانه تیر است. به ترتیب P مقدار نیرو در هر نقطه از نمودار نیرو-جابجایی، L فاصله میان دو تکیه‌گاه، b عرض تیر و h ضخامت تیر است. همچنین بیشینه کرنش نیز در پوسته خارجی تیر و در وسط تیر که محل اعمال نیرو است به وجود می‌آید که مقدار آن با رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، ε بیشترین کرنش در پوسته خارجی تیر و در وسط تیر و δ میزان خیز نقطه وسط تیر است. همچنین L و h نیز به ترتیب فاصله میان دو تکیه‌گاه و ضخامت تیر هستند. با توجه به مطالب فوق می‌توان با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی که از آزمون خمش سه نقطه به دست می‌آید، نمودار تنش-کرنش بیشینه را در پوسته بیرونی و در وسط تیر به دست آورد.

۳- نتایج

نمودار تلفات بازتابش-فرکانس برای رزین خالص و نمونه‌های پرشده با پودر Fe_2O_3 با استفاده از تحلیل گر شبکه در باند X مطابق شکل ۱۱ به دست آمد. براساس شکل ۱۱، بیشینه تلفات بازتابش در باند X برای رزین اپوکسی، نمونه ۳۷/۵٪ وزنی و نمونه ۷۵٪ وزنی به ترتیب برابر ۱/۹-، ۷- و ۸/۱- دسی‌بل است. بیشینه تلفات نمونه ۳۷/۵٪ وزنی نسبت به رزین خالص ۲۶۸،۴٪ افزایش داشته که نشان‌دهنده جذب بیشتر امواج ماکروویو و افزایش تلفات موج بازگشتی است. افزایش تلفات نمونه ۷۵٪ وزنی نسبت به نمونه ۳۷/۵٪ وزنی فقط ۱۵/۷٪ بوده که نشان می‌دهد دو برابر کردن درصد وزنی پودر تأثیر چشمگیری در بهبود تلفات بازتابی ندارد؛ علت آن می‌تواند توزیع غیریکنواخت و کلوخه‌شدن پودر در درصدهای بالا باشد.

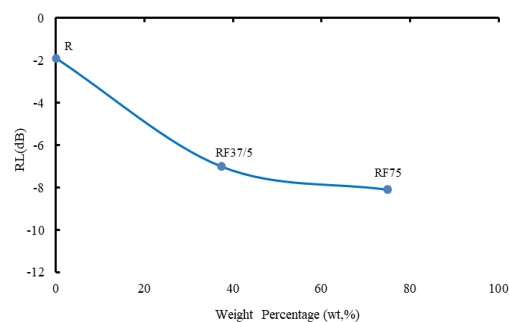
در نوع پرکننده، شرایط ساخت و اندازه‌گیری، مقادیر عددی مطلق قابل مقایسه مستقیم نیستند.

جدول ۵- مقایسه روند افزایش تلفات بازتابش با افزایش درصد وزنی پرکننده در سه پژوهش مستقل

پژوهش	رزین	پرکننده	درصد وزنی (تلفات dB)	درصد وزنی (تلفات dB)
[۲۹]	اپوکسی	Fe ₃ O ₄	۰٪ (-۱۱/۶)	۸۰٪ (-۱۴/۷)
[۳۰]	اپوکسی	Fe	۲۰٪ (-۸)	۶۰٪ (-۲۵)
پژوهش حاضر	اپوکسی	Fe ₂ O ₃	۳۷/۵٪ (-۷)	۷۵٪ (-۸/۱)

با استفاده از آزمون کشش، خواص مکانیکی نمونه‌های پر شده با پودر Fe₂O₃ با رزین اپوکسی خالص مقایسه شد. اولین نکته‌ی قابل توجه در نمودارهای تنش-کرنش استحکام کششی است. همچنین شیب این نمودار در ناحیه الاستیک، بیانگر مدول الاستیک است. هرچقدر شیب این نمودار بیشتر باشد، مدول الاستیک آن بزرگتر خواهد شد. در این آزمایش از هر ماده، سه نمونه مشابه، تهیه و تحت آزمون کشش قرار گرفت. با توجه به نزدیکی نمودارها در سه نمونه تحت آزمون، نمودار میانگین استخراج شد تا مورد بررسی قرار گیرد. مطابق شکل ۱۳ برای ماده رزین اپوکسی میانگین استحکام کششی ۳۰ مگاپاسکال و حداکثر کرنش قابل تحمل آن ۳٪ است. طبق شکل ۱۴ برای ماده رزین پر شده با پودر Fe₂O₃ ۳۷/۵ درصد وزنی، میانگین استحکام کششی ۲۶ مگاپاسکال در حداکثر کرنش ۱/۹٪ درصد است. برای ماده رزین پر شده با پودر Fe₂O₃ ۷۵ درصد وزنی میانگین استحکام کششی ۲۳ مگاپاسکال در حداکثر کرنش ۱/۵٪ است که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. رفتار نمودار تنش-کرنش رزین اپوکسی نشان دهنده این است که رزین به عنوان یک ماده ترد عمل می‌کند. با افزودن پودر Fe₂O₃ به رزین اپوکسی، کامپوزیت در کرنش کمتری دچار شکست می‌گردد و با افزایش مقدار پودر Fe₂O₃ از ۳۷/۵ درصد به ۷۵ درصد، کرنش شکست کامپوزیت کاهش می‌یابد و کامپوزیت نسبت به رزین خالص تردتر می‌گردد، همان طور

درصد پودر در این مطالعه، تعادل بهتری بین چگالی پودر و تطبیق امپدانس در پهنای باند وسیع‌تر ایجاد کرده است.

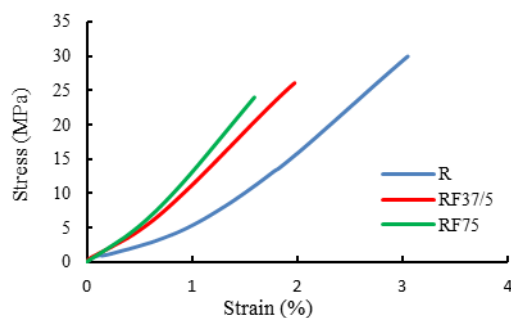


شکل ۱۲- نمودار تلفات بازتابش بر حسب درصد وزنی

شکل ۱۲ تغییرات تلفات بازتابش را بر حسب درصد وزنی پودر در باند فرکانسی X را نشان می‌دهد. این نمودار به‌وضوح روند کلی بهبود عملکرد جذبی را با افزایش بارگذاری تأیید می‌کند، به‌طوری‌که مقدار تلفات بازتابش از ۱/۹- دسی‌بل برای رزین خالص به ۸/۱- دسی‌بل برای نمونه حاوی ۷۵٪ پودر افزایش می‌یابد. با این حال، همان‌طور که از شیب منحنی مشهود است، این بهبود خطی نبوده و با افزایش درصد پودر، نرخ آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزودن پودر از ۰٪ به ۳۷/۵٪ موجب جهشی قابل توجه (حدود ۵ دسی‌بل) در تلفات می‌شود، در حالی که افزایش بارگذاری از ۳۷/۵٪ به ۷۵٪ تنها بهبودی جزئی (حدود ۱ دسی‌بل) را در پی دارد. این مشاهدۀ تجربی تأثیر محدودکننده عوامل فرآیندی مانند کلوخه‌شدن ذرات و توزیع غیریکنواخت در غلظت‌های بالای بارگذاری را نشان می‌دهد.

به منظور اعتبارسنجی روند کلی مشاهده‌شده در پژوهش حاضر و بررسی همسویی رفتار جذبی نمونه‌ها با ادبیات فنی، نتایج تلفات بازتابشی کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی پرکننده‌های مغناطیسی در جدول ۵ با دو مطالعه مرجع [۲۹] و [۳۰] مقایسه شده است. در این مقایسه، تأکید اصلی بر روند تغییرات تلفات بازتابشی در برابر افزایش درصد وزنی پرکننده است، نه قیاس کمی مطلق. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در هر سه مطالعه افزایش درصد وزنی پرکننده منجر به بهبود تلفات بازتابشی گردیده است. این همسویی کیفی، صحت روند فیزیکی (بهبود جذب با افزایش پرکننده) را در پژوهش حاضر تأیید می‌کند. بدیهی است که به دلیل تفاوت

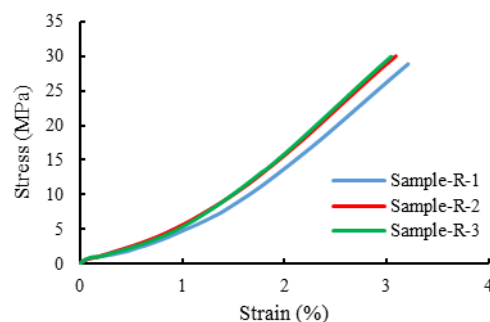
نمونه رزین خالص کاهش یافته است. براساس نمودارهای تنش کرنش، بیشترین تحمل تنش یا استحکام کششی برای رزین خالص ۳۰ مگاپاسکال است که در کرنش ۳٪ باعث شکست نمونه آزمون شده است و کمترین استحکام کششی مربوط به رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 ۷۵ درصد وزنی با ۲۳ مگاپاسکال است. علت این مشاهدات، محدود شدن درجه اتصالات عرضی تشکیل شده در حین فرایند پخت، به دلیل افزایش برهم کنش پلیمر-پرکننده است. در پژوهش سرخوش و همکاران [۵] کاهش خواص مکانیکی مانند استحکام کششی گزارش شده است که نتایج در این مقاله در رابطه با پودر Fe_2O_3 تایید می کند. همچنین با افزودن پودر Fe_2O_3 به رزین مشاهده شد مقدار مدول الاستیک با افزایش جرم پودر Fe_2O_3 افزایش یافت. نتایج حاصل شده در این مقاله با نتایج پژوهش سولامان و همکاران [۳۱] تطابق دارد. در جدول ۶ نتایج آزمون کشش به صورت خلاصه آورده شده است. برای نشان دادن پراکندگی داده ها، مقادیر میانگین استحکام کششی به همراه انحراف معیار در شکل ۱۷ ارائه شده است. انحراف معیار نسبتاً کوچک ارائه شده در این شکل حاکی از تکرارپذیری مناسب و پراکندگی کم داده های آزمون کشش در سه نمونه تکراری برای هر ترکیب است.



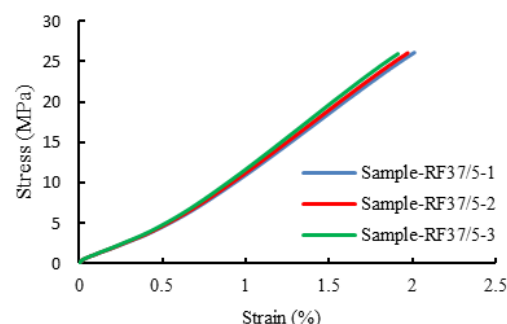
شکل ۱۶- نمودار تنش کرنش کششی رزین خالص و رزین پر شده با پودر Fe_2O_3

جدول ۶- نتایج آزمون استحکام کشش				
نمونه	مدول الاستیک (GPa)	استحکام کشش (MPa)	انحراف معیار (%)	کرنش (%)
R	۲/۰۱۳	۳۰	۰/۸	۳
RF37/5	۳/۶۰۶	۲۶	۰/۲	۱/۹
RF75	۳/۶۷	۲۳	۲/۶	۱/۵

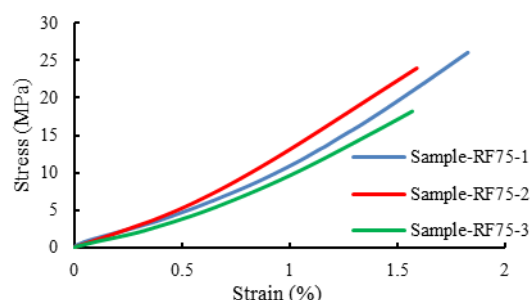
که در شکل های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است؛ علت این موضوع را می توان به بزرگی ذرات پودر Fe_2O_3 و کاهش چسبندگی و پیوند لازم بین ذرات پودر Fe_2O_3 و اپوکسی و در نتیجه ترد شدن ماده مرتبط دانست.



شکل ۱۳- نمودار تنش کرنش برای نمونه های رزین اپوکسی خالص



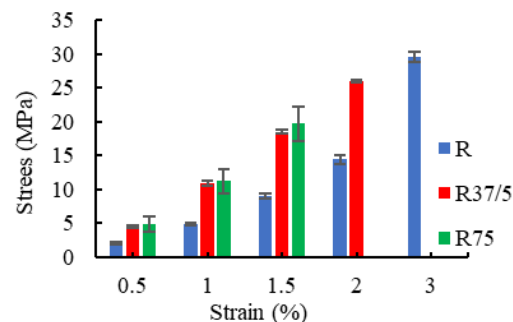
شکل ۱۴- نمودار تنش کرنش برای نمونه های رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 ۳۷/۵ درصد وزنی



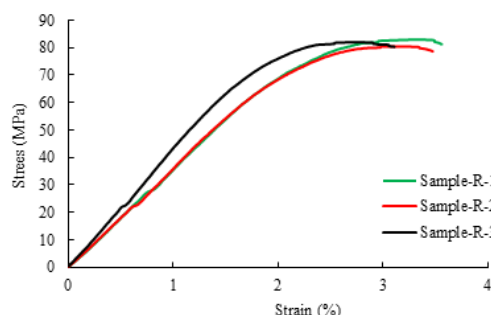
شکل ۱۵- نمودار تنش کرنش برای نمونه های رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 ۷۵ درصد وزنی

در شکل ۱۶ نمودار تنش-کرنش رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 در مقایسه با رزین خالص نشان داده شده است، استحکام کششی نمونه های پر شده با پودر Fe_2O_3 در مقایسه با

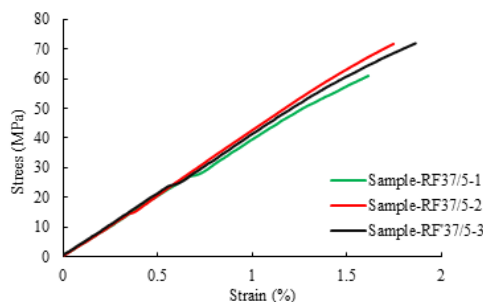
برای انجام آزمون خمش سه نقطه، سه نمونه از هر ماده تحت آزمون خمش قرار گرفت و نتایج خواص خمشی آن استخراج شد. با توجه به نمودارهای تنش کرنش در این آزمون بیشترین استحکام خمشی مربوط به رزین اپوکسی با ۸۲/۷ مگاپاسکال است که در شکل ۱۹ نشان داده شده است. نمودارهای تنش-کرنش رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 با درصد وزنی ۳۷/۵ و ۷۵ درصد به ترتیب در شکل ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است که استحکام خمشی برای رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 با درصد وزنی ۳۷/۵ و ۷۵ درصد به ترتیب برابر با ۷۱/۹ و ۶۸/۵ مگاپاسکال است.



شکل ۱۷- مقایسه میانگین استحکام کششی نمونه‌های R، RF37/5 و RF75 به همراه انحراف معیار



شکل ۱۹- نمودار تنش-کرنش آزمون خمش برای نمونه‌های رزین خالص



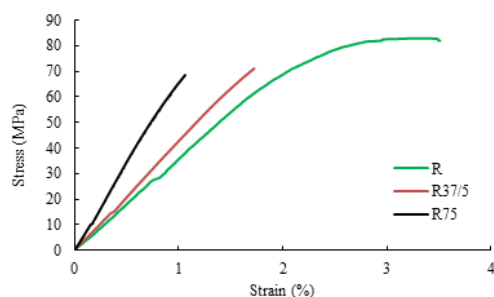
شکل ۲۰- نمودار تنش-کرنش آزمون خمش برای نمونه‌های رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 ۳۷/۵ درصد وزنی

دلیل کاهش استحکام کششی در نمونه‌های رزین پر شده با پودر Fe_2O_3 را می‌توان بزرگی ذرات پودر Fe_2O_3 و کاهش چسبندگی و پیوند لازم بین ذرات پودر Fe_2O_3 و اپوکسی و در نتیجه ترد شدن ماده دانست. برای تایید این موضوع به پژوهش سرخوش و همکاران [۵] می‌توان استناد نمود. برای توضیح این مشاهدات، چسبندگی بین ذرات و اپوکسی باید در نظر گرفته شود. برای سیستم‌هایی با برهمکنش ضعیف بین زمینه و ذرات، ذرات قادر به تحمل بار خارجی نخواهند بود و استحکام کامپوزیت از استحکام پلیمر خالص کمتر خواهد بود. ناحیه و زاویه شکست نمونه‌ها پس از اتمام آزمون کشش در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود زوایای شکست حدود ۹۰ درجه می‌باشد که موید تردی نمونه‌ها که از خواص اپوکسی است می‌باشد.



شکل ۱۸- شکست نمونه‌ها در آزمون کشش

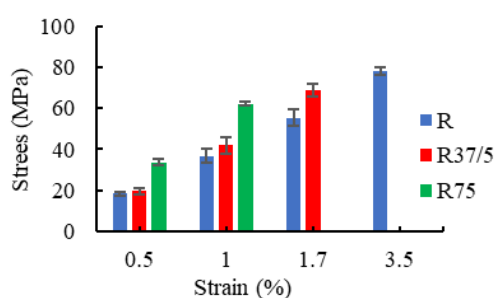
همان طور که مشاهده می شود، دامنه انحراف معیارها در تمام نمونه ها کوچک بوده که حاکی از تکرارپذیری مناسب و قابلیت اعتماد نتایج آزمون خمش می باشد. زاویه و شکل شکست نمونه ها پس از پایان آزمایش خمش سه نقطه در شکل ۲۴ نشان داده شده است.



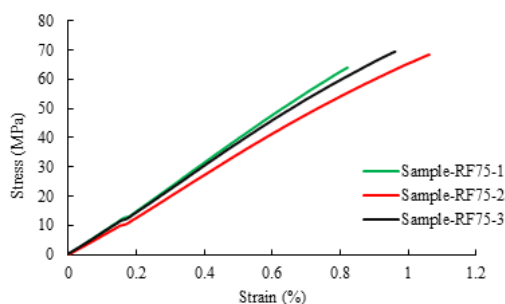
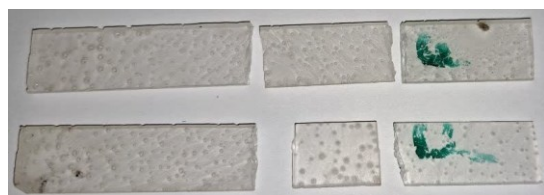
شکل ۲۲- نمودار تنش کرنش خمشی رزین خالص و رزین پر شده با پودر Fe_2O_3

جدول ۷- نتایج آزمون خمش

نمونه	استحکام خمش (MPa)	انحراف معیار (MPa)	کرنش (%)
R	۸۲/۷	۱/۸	۳/۵۶
RF37/5	۷۱/۹	۳/۲	۱/۷۴
RF75	۶۸/۵	۰/۸	۱/۰۶



شکل ۲۳- مقایسه میانگین استحکام خمشی نمونه های R، RF37/5 و RF75 به همراه انحراف معیار



شکل ۲۱- نمودار تنش کرنش آزمون خمش برای نمونه های رزین با پودر Fe_2O_3 ۷۵ درصد وزنی

نمودارهای تنش-کرنش به دست آمده از نتایج آزمون خمش در شکل ۲۲ نشان داده شده است. مشاهده شد که استحکام خمشی رزین اپوکسی نسبت به شرایطی که رزین با پرکننده های پودر Fe_2O_3 پر شده، بیشتر است. استحکام خمشی با افزایش وزن پرکننده به زمینه رزین کاهش چشمگیری داشته است. این موضوع نشان می دهد که با افزایش درصد وزنی پرکننده به رزین، به دلیل کاهش چسبندگی بین فازها و در نهایت ترد شدن ماده، میزان مقاومت خمشی روند کاهشی داشته است. در پژوهش کاواگوچی و همکاران [۳۲] کاهش چسبندگی بین ذره و زمینه به عنوان عاملی کلیدی در کاهش استحکام مکانیکی کامپوزیت ها گزارش شده است که نتایج این تحقیق آن را تأیید می کند.

همچنین کاهش استحکام خمشی با افزایش درصد پرکننده، مشابه نتایج گزارش شده توسط سرخوش و همکاران [۵] در کامپوزیت اپوکسی/فوم سیلیکا است. نتایج آزمون خمش سه نقطه در جدول ۷ آورده شده است. نتایج نشان می دهد که با افزودن مواد پرکننده پودر Fe_2O_3 به زمینه رزین اپوکسی، استحکام خمشی کاهش یافته است. از دلایل این کاهش می توان به ایجاد تخلخل، کاهش چسبندگی و همچنین اثر افزایش درصد بارگذاری ذرات بر یکپارچگی مکانیکی ماتریس اشاره کرد که مطابق با یافته های فو و همکاران [۳۳] در زمینه تأثیر بارگذاری ذرات بر خواص مکانیکی کامپوزیت های پلیمری می باشد.

مقادیر منحنی های ارائه شده در شکل ۲۳، میانگین حاصل از آزمون خمش سه نمونه برای هر ترکیب است. به منظور ارزیابی پراکندگی داده ها، انحراف معیار مربوط به هر نقطه به صورت نوارهای خطا در همین شکل نمایش داده شده است.

• نتایج آزمون خمش سه نقطه نیز روند کاهشی استحکام با افزایش درصد پودر را تأیید نمود، به طوری که استحکام خمشی نمونه حاوی ۷۵٪ پودر Fe_2O_3 نسبت به رزین خالص، از ۸۲/۷ به ۶۸/۵ مگاپاسکال (کاهش معادل ۲۷/۳ درصد) افت نشان داد. این کاهش چشمگیر، بیانگر حساسیت بالای خواص مکانیکی کامپوزیت به غلظت پرکننده است.

• به طور خلاصه، این مطالعه نشان داد که اگرچه افزودن پودر Fe_2O_3 خواص الکترومغناطیسی رزین اپوکسی را به طور چشمگیری برای کاربردهای جاذب امواج بهبود می بخشد، اما این بهبود به بهای کاهش استحکام کششی و خمشی تمام می شود. این معاوضه بین خواص عملکردی و مکانیکی، یک چالش کلیدی در طراحی کامپوزیت های ساختاری-کارکردی است. برای غلبه بر این محدودیت و دستیابی به مواد بهینه با تعادل مناسب بین استحکام و قابلیت جذب، توسعه روش های ساخت پیشرفته تر (مانند اختلاط اولتراسونیک یا مکانیکی برای یکنواختی بهتر) و به ویژه اصلاح شیمیایی سطح ذرات پودر (عامل داری) به منظور تقویت چسبندگی فصل مشترک ذره-ماتریس به عنوان مسیرهای پژوهشی آتی پیشنهاد می شود. چنین اقداماتی می تواند توزیع یکنواخت تر ذرات، کاهش تخلخل و در نهایت استحکام مکانیکی بالاتری را برای کامپوزیت های حاوی درصد های زیاد پودر به ارمغان آورد.

مراجع

- [1] Montanaro A, Valsesia D, Fracastoro G, Magli E (2022) Semi-supervised learning for joint SAR and multispectral land cover classification. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 19:1-5.
- [2] Liu YL, Hsu CY, Wei WL, Jeng RJ (2003) Preparation and thermal properties of epoxy-silica nanocomposites from nanoscale colloidal silica. Polymer 44(18):5159-5167.
- [3] Mai YW, Yu ZZ (2006) Polymer nanocomposites. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering 3:6519-6528.

[۴] عبدالحی آذغان م، حسینی آب بندانک سن، امیریان ی، علیرزاده ع (۲۰۲۰) تأثیر نانوصفات گرافن عامل دار بر



شکل ۲۴- شکست نمونه ها در آزمون خمش

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر افزودن پودر Fe_2O_3 به عنوان پرکننده بر خواص مکانیکی و الکتریکی رزین اپوکسی مورد استفاده در کاربردهای هوافضایی، به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نمونه ها شامل رزین خالص و کامپوزیت های اپوکسی حاوی ۳۷/۵ و ۷۵ درصد وزنی پودر Fe_2O_3 بودند که به روش دستی ساخته شدند. یافته های کلیدی این تحقیق به شرح زیر است:

• افزودن پودر Fe_2O_3 منجر به افزایش تلفات بازتابش گردید به طوری که نمونه حاوی ۷۵ درصد وزنی پودر نسبت به رزین خالص، افزایشی معادل ۳۲۶/۳٪ و نمونه حاوی ۳۷/۵ درصد وزنی افزایشی معادل ۲۶۸/۰۴٪ در تلفات بازتابش نشان داد. این بهبود چشمگیر در پاسخ الکترومغناطیسی زمینه، نشان دهنده پتانسیل بالای این کامپوزیت ها برای کاربردهای جذب امواج و رادارگریزی است. افزایش درصد پودر Fe_2O_3 تلفات بازتابش را به طور نظام مند افزایش داد که با مکانیسم های تلفات دی الکتریک و مغناطیسی مطابقت دارد.

• افزودن پودر Fe_2O_3 تأثیری دوگانه بر خواص کششی داشت. از یک سو، مدول الاستیک به طور قابل ملاحظه ای (حدود ۸۰٪) افزایش یافت که نشان دهنده بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل الاستیک است. از سوی دیگر، استحکام کششی نهایی حدود ۲۳/۳٪ کاهش و کرنش شکست تا ۵۰٪ کم شد. این رفتار متناقض نما (افزایش سفتی همراه با کاهش استحکام و شکل پذیری) عموماً ناشی از ضعف فصل مشترک بین ذرات پودر و ماتریس اپوکسی و همچنین احتمال افزایش تخلخل و تمرکز تنش اطراف ذرات پرکننده است که موجب تردی ماده می شود.

- Nanocomposites and Nanomaterials International Conference, pp 87-90.
- [16] Tjong SC (2006) Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering* 53(3-4):73-197.
- [17] Kutvonen A, Rossi G, Puisto SR, Rostedt NKJ, Ala-Nissila T (2012) Influence of nanoparticle size, loading, and shape on the mechanical properties of polymer nanocomposites. *The Journal of Chemical Physics* 137(21):1-21.
- [18] Moon C-K, Kim B-A (2015) Nanoparticle effect on the mechanical properties of polymer composites. *Journal of Power System Engineering* 19(5):12-16.
- [19] Tadesse MG, Prince Periyasamy A, Lübben JF (2023) Nanomaterials Based Polymer Composites: Mechanical Properties. In: *Mechanics of Nanomaterials and Polymer Nanocomposites*, Springer, pp 129-145.
- [20] Xiang Z, Wang Y, Yin X, He Q (2023) Microwave absorption performance of porous heterogeneous SiC/SiO_2 microspheres. *Chemical Engineering Journal* 451:138742.
- [21] Wei J, Zhang Y, Li X, Hui J, Zhang H, Lei W (2023) Multifunctional flower-like Ni particles/silicon carbide nanowires for infrared radar compatible stealth performance. *J. Colloid and Interface Science* 641:414-427.
- [22] Duong TX, Tung DK, Khuyen BX, Anh NTN, Tung BS, Lam VD, Chen L, Zheng H, Lee YP (2023) Enhanced Electromagnetic Wave Absorption Properties of $FeCo-C$ Alloy by Exploiting Metamaterial Structure. *Crystals* 13:1006.
- [23] Lu Z, Liu L, Chen Z, Wang C, Zhu X, Lu X, Yuan H, Huang H (2025) Progress in Electromagnetic Wave Absorption of Multifunctional Structured Metamaterials. *Polymers* 17:2559.
- [24] Shi Y, Gao X, Qiu J (2019) Synthesis and strengthened microwave absorption properties of three-dimensional porous Fe_3O_4 /graphene composite foam. *Ceramics International* 45(3):3126-3132.
- [25] Zena YG, Woldemariam MH, Koricho EG (2023) Nano-additives and their effects on the microwave absorptions and mechanical properties of the composite materials. *Manufacturing Review* 10(8):2023004.
- [26] ASTM D5568-22, Standard Test Method for Measuring Relative Complex Permittivity and Relative Magnetic Permeability of Solid Materials at Microwave Frequencies Using Waveguide, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
- [27] ASTM D3039/D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- خواص مکانیکی کامپوزیت وینیل استر/ الیاف شیشه.
مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۱۰(۴):۴-۱۴.
- [5] Sarkhosh R, Kazemi Nasrabadi M, Parsafar R (2024) Study of the effect of fumed silica on mechanical, electrical, and magnetic properties of epoxy/fumed silica composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 11(2):37-57.
- [6] Lian TW, Kondo A, Kozawa T, Akoshima M, Abe H, Ohmura T, Tuan WH, Naito M (2017) Effect of hydrophobic nano-silica on the thermal insulation of fibrous silica compacts. *Journal of Asian Ceramic Societies* 5(2):118-122.
- [7] Dueramae I, Jubsilp C, Takeichi T, Rimdusit S (2014) High thermal and mechanical properties enhancement obtained in highly filled polybenzoxazine nanocomposites with fumed silica. *Composites Part B: Engineering* 56:197-206.
- [8] Sarkhosh R, Zarei H (2021) Design, manufacturing and mechanical and electrical properties evaluation of glass fiber reinforced PTFE polymer matrix composites. *Modares Mechanical Engineering* 21(2):117-127.
- [9] Sarkhosh R, Arabqomi H, Farrokhhabadi A (2022) Design, manufacturing, and evaluation of mechanical and electrical properties of biodegradable epoxy/hemp composite produced by VARTM method. *Journal of Aeronautical Engineering* 24(1):70-82.
- [10] Talei-Fard E, Parsa H, Eskandari Jam J (2021) Investigation of tensile strength and dielectric constant of GFRP composite. *Journal of Science and Technology of Composites* 8(3):1714-1721.
- [11] Sarkhosh R, Arabqomi H, Farrokhhabadi A (2023) Experimental investigation of mechanical and electrical properties of semi-biodegradable polypropylene/hemp woven thermoplastic composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 10(4):62-77.
- [12] El-Masry MM, Ramadan R, Ahmed MK (2020) The effect of adding cobalt ferrite nanoparticles on the mechanical properties of epoxy resin. *Results in Materials* 8:100160.
- [13] Ahmad Nadzri, Seri Nur Zumaimi (2020) A review on the kenaf/glass hybrid composites with limitations on mechanical and low velocity impact properties. *Polymers* 12(6):1285.
- [14] Rostamiyan Y (2017) Investigation and optimization of the mechanical properties of epoxy based Hybrid Nano-composites reinforced by carbon-fiber using Taguchi method. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 7(3):97-112.
- [15] Kim SG, Chu WS, Kim HJ, Ahn SH (2006) Measurement of Mechanical Strength of Nano Composite Fabricated by Nano Composite Deposition System (NCDS). In: *Multifunctional*

- [31] Soloman MA, Kurian P, Anantharaman MR (2002) Dielectric and mechanical properties of rubber ferrite composites containing barium ferrite. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology* 18(4):269-282.
- [32] Kawaguchi T, Pearson R (2003) The effect of particle-matrix adhesion on the mechanical behavior of glass filled epoxies: Part 1. A study on yield behavior and cohesive strength. *Polymer* 44(15):4229-4238.
- [33] Fu SY, Feng XQ, Lauke B, Mai YW (2008) Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Composites Part B: Engineering* 39(6):933-961.
- [28] ASTM D7264/D7264M-03, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [29] Qiao Y, Yao Z, Wang X, Zhang X, Bai C, Li Q, Chen K, Li Z, Zheng T (2020) Lattice composites with embedded short carbon fiber/Fe₃O₄/epoxy hollow spheres for structural performance and microwave absorption. *Materials & Design* 188:108427.
- [30] Khismatullina A, Nekrasov I, Beketov I, Bagazeev A, Malkin A, Knyazev N (2019) Microwave electromagnetic and absorbing properties of iron/polymer nanocomposites. *USBREIT* 2019:481-484.