

## طراحی، ساخت و بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت زیست تخریب پذیر اپوکسی/کنف تولید شده با روش VARTM

رضا سرخوش<sup>۱</sup>، حمید عرب قمی<sup>۲</sup>، امین فرخ آبادی<sup>۳\*</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
  - ۲- دانشجوی کارشناس ارشد هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
  - ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- (دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹)

### چکیده

در این مقاله به طراحی، ساخت و بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی یک کامپوزیت زیست تخریب پذیر تهیه شده از رزین ML506 و الیاف کنف پرداخته شده است. تولید نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش انتقال رزین به داخل قالب به کمک خلاء (VARTM) استفاده شده است. جهت تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت، دو آزمون کشش و خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها انجام شده است. مدول الاستیک، تنش تسلیم، تنش نهایی، میزان حداکثر تغییر طول، و میزان چقرمگی از آزمون کشش و استحکام خمشی، مدول الاستیک و تری خمشی از آزمون خمش سه نقطه به دست آمده است. در ادامه جهت تعیین خواص الکتریکی کامپوزیت، بر روی نمونه‌های تهیه شده، آزمون ثابت دی الکتریک در باند X انجام شد. همچنین تانژانت تلفات کامپوزیت تولید شده به دست آمد. بیشینه استحکام کششی و مدول الاستیک به دست آمده در این پژوهش به ترتیب برابر با ۶۲/۴۲ مگاپاسکال و ۴/۴۳ گیگاپاسکال است. میانگین استحکام خمشی و مدول الاستیک و تری خمشی نمونه‌های تولیدی به ترتیب برابر با ۹۹/۱۹ مگاپاسکال و ۵/۶۱۹ گیگاپاسکال است. بیشینه ثابت دی الکتریک و تانژانت تلفات نمونه‌های تولیدی در باند X به ترتیب برابر با ۴/۷۴ و ۰/۰۵۳ است. در نهایت به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده در این تحقیق، نتایج آزمون‌های انجام شده با نتایج سایر مراجع در این زمینه مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت زیست تخریب پذیر، الیاف کنف، اپوکسی، آزمون کشش، آزمون خمش سه نقطه، ثابت دی الکتریک

## Design, Manufacturing, And Evaluation of Mechanical and Electrical Properties of Biodegradable Epoxy/hemp Composite Produced by VARTM Method

Reza Sarkhosh, Hamid Arabqomi, and Amin Farrokhbabadi

### Abstract

In this study, a biodegradable composite by ML506 as matrix and kenaf fibers as reinforcement was designed, manufactured, and finally, its mechanical properties were investigated. The test samples were manufactured by the Vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) method. To determine the mechanical properties, a tensile test and three-point bending test were performed. Young modulus, yield stress, ultimate stress, maximum elongation, and toughness were obtained from the tensile test. Flexural strength and flexural chord modulus of elasticity were obtained from the three-point bending test. To determine the electrical properties, a dielectric constant test in X-band was performed. The loss tangent, as well as composite products, were obtained. The maximum tensile strength and tensile modulus were achieved in this research respectively equal to 62.42 Mpa and 4.43 Gpa. The flexural strength and flexural modulus were achieved in this research respectively equal to 99.19 Mpa and 5.619 Gpa. The dielectric constant and loss tangent of the samples produced in the X-band were 4.74 and 0.053 respectively. Finally, to validate the results in this research, the tests result was compared with the result of the other similar studies.

**Key words:** Biodegradable composite, Hemp fiber, epoxy, Tensile test, Three-point bending test, Dielectric constant

\* نویسنده پاسخگو: امین فرخ آبادی، پست الکترونیک: [amin-farrokh@modares.ac.ir](mailto:amin-farrokh@modares.ac.ir)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



## مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های سبز و زیست تخریب پذیر بطور چشم‌گیری در کاربردهای مهندسی مانند تولید قطعات داخلی و خارجی اتومبیل‌ها و هواپیماها رو به افزایش است [۱]. دلیل این امر نیز افزایش نسبت استحکام به وزن سازه بدون افزایش هزینه‌های تولید در اثر استفاده از این نوع کامپوزیت‌ها و همچنین اثرات مطلوب این نوع مواد در کاهش آلاینده‌های محیطی است. همچنین برای صنایع سازگار با محیط زیست مانند توربین‌های بادی تولیدکننده نیروی الکتریکی، استفاده از این نوع کامپوزیت‌ها می‌تواند بسیار مطلوب باشد. در کامپوزیت‌های زیست تخریب پذیر اگر علاوه بر الیاف تقویت کننده، ماده زمینه نیز از نوع طبیعی و زیست تخریب پذیر مانند پلی لاکتیک اسید (Poly Lactic Acid-PLA)، پلی بوتیلن سوکسینات (Poly Butylene Succinate-PBS) و پلی هیدرواکسی بوتیرات (Poly Hydroxy Butyrate-PHB) باشد به کامپوزیت تولید شده کامپوزیت سبز می‌گویند [۲].

الیاف طبیعی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد که عبارت هستند از الیاف حیوانی، گیاهی و معدنی. الیاف گیاهی یکی از مهم‌ترین نوع الیاف طبیعی می‌باشند. سلولز که یک پلیمر طبیعی و ماده اصلی تشکیل دهنده گیاهان است، به عنوان ماده اولیه الیاف گیاهی به حساب می‌آید. الیاف گیاهی از اجزای مختلف گیاهان می‌توانند بدست آیند و بر همین اساس به دسته‌های دانه‌ای، ساقه‌ای، برگ‌ی و میوه‌ای تقسیم می‌شوند. الیاف کف، کتان، سیسال، نارگیل و پنبه مثال‌هایی از الیاف طبیعی گیاهی می‌باشند. منشا الیاف حیوانی همان‌طور که از نامشان پیداست حیوانات هستند. ماده اصلی تشکیل دهنده الیاف حیوانی پروتئین است که یک ماده طبیعی حاصل از انواع اسیدهای آمینه یا آمینو اسیدها است. همه اجزا بدن حیوانات مانند گوشت، استخوان، ناخن، پشم، مو و... نیز از پروتئین تشکیل شده است. الیاف حیوانی به دو دسته تقسیم می‌شوند: نوع اول الیاف مویی هستند که از پوشش مویی سطح بدن حیواناتی مثل گاو، گوسفند و بز بدست می‌آیند و شامل پشم، مو و کشمیر می‌باشند. نوع دوم الیاف ابریشمی هستند که به وسیله کرم ابریشم و یا عنکبوت تولید می‌شوند. منشا الیاف معدنی، زمین و منابع معدنی است. الیاف معدنی مثل الیاف گیاهی و حیوانی تنوع زیادی ندارند. مهم‌ترین الیاف معدنی

الیاف آریست است که به پنبه نسوز معروف بوده و در تولید مصنوعات دیرگداز و پارچه‌های ضد حریق به کار می‌روند [۳]. الیاف کف جز الیاف گیاهی بوده که دارای قیمت مناسب و در اکثر کشورهای اروپایی و آسیایی کشت می‌شود و ارتفاع بوته این گیاه تا سه متر می‌رسد که باعث می‌شود این گیاه الیاف پیوسته و بلندی را تولید کند و بنابراین استفاده از الیاف این گیاه در کامپوزیت‌هایی که نیاز به فاز تقویت کننده بلند و پیوسته‌ای دارند می‌تواند مناسب باشد. از موارد عمده استفاده کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کف می‌توان به صنایع ساختمان‌سازی، صنایع اتومبیل، پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی، صنایع الکتریکی، زیردریایی‌ها و تجهیزات حمل و نقل اشاره کرد [۴]. عزیز و همکارانش [۵] دریافتند که استفاده از کف در بین منابع گیاهی سریع‌ترین رشد و توسعه را داشته است. تاکاشی و همکارانش [۶] خواص مکانیکی کامپوزیت پلی ال لاکتیک اسید (Poly L Lactic Acid-PLLA) که با الیاف کف تقویت شده بود را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این بررسی‌ها، آن‌ها دریافتند که الیاف کف اتصال خوبی با پلیمر ترموپلاستیک پلی ال لاکتیک اسید بر قرار می‌کند که منجر به ایجاد خواص مطلوبی در این کامپوزیت می‌شود و کف را به عنوان یک فاز تقویت کننده خوب معرفی کردند. یوسیف و همکارانش [۷] خواص خمشی کامپوزیت کف/اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. در بررسی‌های آن‌ها الیاف تک جهته با طول بلند و پیوسته که در حالت اول الیاف به صورت بهینه نشده و در حالت دوم الیاف با استفاده از سدیم هیدرواکسید (NaOH) بهینه شده‌اند مورد استفاده قرار گرفته است. آن‌ها دریافتند که بهینه سازی شیمیایی الیاف می‌تواند تاثیر مثبتی بر روی خواص خمشی و فصل مشترک بین الیاف و ماتریس داشته و آن‌ها را نسبت به حالت بهینه نشده بهبود بخشد. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که خواص خمشی کامپوزیت با استفاده از الیاف بهینه شده، ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. رضا محجوب و همکارانش [۸] خواص مکانیکی کامپوزیت کف/اپوکسی را که با استفاده از الیاف تک جهت تقویت شده بود، بررسی نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش حجم الیاف می‌تواند منجر به افزایش مدول الاستیک و کاهش تنش نهایی کامپوزیت شود. سرخوش و همکاران [۹] به بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت زمینه پلیمری تفلون تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند. آن‌ها به منظور دستیابی به

خواص مکانیکی بهینه کامپوزیت تولید شده، چرخه‌های مختلف حرارتی و زمانی را بررسی نمودند و خواص مکانیکی کامپوزیت را در سیکل‌های مختلف بررسی کردند. همچنین آن‌ها برای تعیین خواص الکتریکی، آزمون ثابت دی‌الکتریک انجام دادند و بیشینه مقدار ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات نمونه‌های تولیدی در باند X به ترتیب برابر با ۲/۳۷ و ۰/۰۹۶ به دست آوردند. مان و همکارانش [۱۰] پژوهشی در مورد بررسی تکنولوژی‌های ساخت و کاربردهای کامپوزیت‌های سبز ارائه کردند. آن‌ها در این پژوهش ابتدا خواص مکانیکی تعداد زیادی از الیاف طبیعی را ارائه دادند و سپس به کاربرد الیاف طبیعی در صنایع حمل و نقل مانند اتومبیل و کشتی‌سازی، تجهیزات تولید انرژی، صنایع معماری و عمران و تجهیزات ورزشی و سرگرمی پرداختند. همچنین فرایندهای ساخت کامپوزیت سبز با استفاده از روش قالب‌گیری تحت فشار، شکل‌دهی حرارتی، لایه چینی دستی، پیچش الیاف، پولتروژن، انتقال رزین در قالب، اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی را بررسی نمودند. مانرال و باجپایی [۱۱] کامپوزیت پلی لاکتیک اسید که با حالت‌های مختلف الیاف کنف (تک جهته، بافته شده و رندوم) تقویت شده بود را تحت تست‌های مختلف استاتیکی و دینامیکی و ساختاری بررسی نمودند. آن‌ها از روش قالب‌گیری تحت فشار برای نمونه‌های خود استفاده کردند و نتیجه گرفتند که در دما و فشار اعمال شده برای ساخت این نوع کامپوزیت، خلاء‌های اندکی وجود دارد که وجود خلاء‌های اندک روش ساخت آنها را تایید می‌کند. نتایج بدست آمده نشان داد که در حالت‌های بافته شده و تک جهته استحکام کششی و مدول یانگ بیشتر از حالت رندوم است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش الیاف کنف به پلیمر پلی لاکتیک اسید، تردی آن کاهش می‌یابد و در لحظه شکست تغییر طول بیشتری دارد. نادزری و همکارانش [۱۲] خواص مکانیکی کامپوزیت ترکیبی کنف/شیشه را بررسی نمودند. آن‌ها در این پژوهش به مرور مطالعات انجام شده بر روی خواص مکانیکی و خواص ضربه-پذیری با سرعت پایین در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کنف و شیشه پرداختند. بیگپور و همکارانش [۱۳] خواص مکانیکی کامپوزیت زیست تخریب پذیر ترکیبی تقویت شده با الیاف کنف و کتان رو با استفاده از آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه به صورت تجربی و عددی مقایسه کردند. آن‌ها از پلیمر پلی لاکتیک اسید به همراه حلال کلر فورم به عنوان ماده

زمینه استفاده نمودند. ملیک و همکارانش [۱۴] مروری بر مطالعات انجام شده بر روی کامپوزیت‌های ترموست تقویت شده با الیاف کنف و الیاف ترکیبی با مشتقات کنف را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این بررسی ابتدا روش‌های ساخت و بخش‌های مختلف این نوع کامپوزیت‌ها را بررسی کردند و سپس جزییات بررسی شده در مورد خواص مکانیکی، خواص حرارتی و جذب رطوبت را بررسی کردند. یاونیتا و همکارانش [۱۵] صفحات کامپوزیتی ساخته شده از اپوکسی که با استفاده از الیاف کنف تقویت شده است را بررسی کردند. آن‌ها در این بررسی تغییر دو پارامتر شامل درصد رزین در صفحات و میزان سدیم کلرید در بهینه سازی الیاف را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که خواص مکانیکی کامپوزیت در مقدار ۵ درصد سدیم کلرید و ۲۰ درصد رزین، بیشینه است.

با بررسی‌های انجام شده می‌توان دریافت که تاکنون تحقیقات محدودی بر روی کامپوزیت‌های زیست تخریب‌پذیر اپوکسی/کنف با روش ساخت VARTM انجام شده است. همچنین به دانش نویسندگان تاکنون بررسی خواص الکتریکی این کامپوزیت از جمله ثابت دی‌الکتریک، تانژانت تلفات در باند X انجام نشده است. لذا در این مقاله به طراحی، ساخت و بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی یک کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر تهیه شده از رزین ML506 به عنوان ماده زمینه و الیاف کنف بافته شده به عنوان الیاف تقویت کننده پرداخته شده است. تولید نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش انتقال رزین به داخل قالب به کمک خلاء (VARTM) صورت گرفت. جهت تعیین خواص مکانیکی آزمون کشش و خمش سه نقطه انجام گرفته است. سپس خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده، از جمله مدول الاستیک، تنش تسلیم، تنش نهایی، میزان حداکثر تغییر طول، و میزان چقرمگی، استحکام خمشی و مدول الاستیک خمشی اندازه گیری شدند و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند در ادامه نمونه‌هایی از کامپوزیت تولید شده تحت آزمون ثابت دی‌الکتریک قرار گرفتند و خواص ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات کامپوزیت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و در نهایت به منظور اعتبار سنجی نتایج بدست آمده در این تحقیق، نتایج آزمون‌های انجام شده با نتایج سایر مطالعات مشابه در این زمینه مقایسه شده است.

### مواد و تجهیزات مورد استفاده

برای ساخت نمونه ها، از رزین اپوکسی ML-506 در این پژوهش استفاده شده است. رزین از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شده است و طبق دستورالعمل فنی از سوی شرکت مواد مهندسی مکرر، هاردنر HA-11 به نسبت ۱ به ۱۳ به رزین اپوکسی افزوده می شود. با توجه به لزجت پایین این رزین می توان به خوبی از آن برای تهیه کامپوزیت های تقویت شده با الیاف استفاده کرد. خواص مکانیکی، فیزیکی و حرارتی این رزین در جدول ۱ آمده است [۱۷،۱۶].

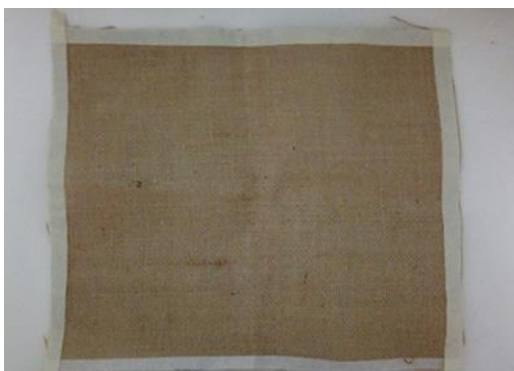
است. در جدول ۲ خواص مکانیکی و فیزیکی الیاف مورد استفاده آمده است. البته خواص مکانیکی الیاف کنف با توجه به نوع و محل رشد این گیاه می تواند متفاوت باشد [۱۸].

جدول ۲- خواص الیاف کنف [۱۹]

واحد	مقدار	خاصیت
g/cm <sup>3</sup>	۱/۵ - ۱/۶	چگالی
Mpa	۹۳۰-۳۵۰	مقاومت کششی
Gpa	۵۳-۴۰	مدول الاستیک
%	۱/۶	ازدیاد طول در لحظه شکست

### مراحل تولید کامپوزیت

برای تولید کامپوزیت زیست تخریب پذیر اپوکسی/کنف از روش ساخت VARTM استفاده شده است. ابتدا پارچه کنفی همانند شکل ۱ با ابعاد ۲۵×۳۰ سانتیمتر برش خورده است سپس چهار لایه از پارچه بر روی هم و سپس بر روی یک شیشه آغشته به واکس قرار داده شده است. بعد از قرار دادن الیاف بر روی شیشه یک لایه پارچه داکرون به منظور جلوگیری از چسبیدن و کیوم بگ و مش به الیاف قرار داده شده است. سپس یک لایه مش برای توزیع یکنواخت رزین بر روی پارچه داکرون قرار داده شده و مجموعه با استفاده از وکیوم بگ و سیلانت وکیوم شده است. پس از ایجاد خلا، رزین به همراه هاردنر از یک طرف تزریق شده و از سمت دیگر مجموعه، رزین اضافی با استفاده فشار پمپ خارج شده است. قطعه آماده شده پس از دو روز از وکیوم خارج شده است. در شکل ۲ الیاف پس از تزریق رزین نشان داده شده است.



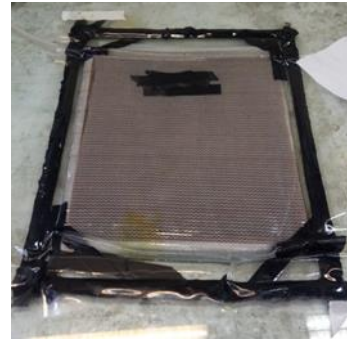
شکل ۱- پارچه کنفی برش خورده

جدول ۱ - خواص رزین ML506 [۱۷،۱۶].

خواص ظاهری و فیزیکی			
ویژگی	دمای کاری	حجم کم	حجم زیاد
عمر مصرف (Pot life)	۲۵	۵۰ دقیقه	۲۰ دقیقه
زمان ژل شدن (Gel Time)	۲۵	۶۰ دقیقه	۲۴ دقیقه
زمان خشک شدن (Curing Time)	۲۵	۹۰ دقیقه	۲۵ دقیقه
زمان خشک شدن تا رسیدن به بالاترین استحکام	۲۵	۷ روز	۷ روز
خواص حرارتی			
ویژگی	مقدار	واحد	استاندارد ASTM
مقاومت حرارتی تا نقطه نرمی	۶۳	□	D648
مقاومت حرارتی عملی	۸۰	□	-
ضریب انبساط طولی	۶,۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	□ <sup>-۱</sup>	D864
خواص مکانیکی			
ویژگی	مقدار	واحد	استاندارد ASTM
مقاومت فشاری	۹۷۴	Kgf/cm <sup>2</sup>	D695M
مدول فشاری	۹۳۷۱	Kgf/cm <sup>2</sup>	D695M
مقاومت کششی	۷۶۱	Kgf/cm <sup>2</sup>	D638M
مدول کششی	۲۷۸۹۰	Kgf/cm <sup>2</sup>	D638M
سختی	۸۲	Shore D	D2240

الیاف تقویت کننده از جنس کنف می باشند که به صورت بافته شده بوده و زاویه میان الیاف ۹۰ درجه است. ضخامت الیاف ۰/۶ میلیمتر و درصد حجمی الیاف به کار رفته در کامپوزیت به دلیل فاصله زیاد میان الیاف بافته شده ۳۳ درصد

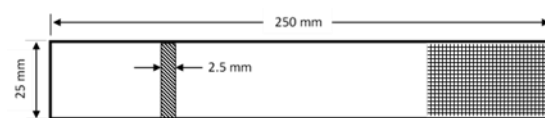
بارگزاری شبه استاتیکی مطلوب است [۲۰]. میزان طول نمونه میان فک‌های دستگاه آزمون کشش ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که بنابراین ۵۰ میلی‌متر از بخش بالای نمونه در داخل فک بالا و ۵۰ میلی‌متر از بخش پایین نمونه در داخل فک پایین قرار گرفته است. نمونه نصب شده در شکل ۵ نشان داده شده است. به دلیل استحکام کم نمونه‌ها نسبت به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف مصنوعی و زبری سطح نمونه‌ها نیازی به قرار دادن تب بر روی نمونه‌ها نیست و نمونه‌ها قبل از لغزش در داخل دستگاه آزمون کشش دچار شکست شدند. نتایج به صورت نمودار نیرو جابجایی بعد از انجام تست استخراج شده است.



شکل ۲- کامپوزیت نهایی پس از تزریق رزین

### آزمون کشش

بعد از آماده سازی صفحه کامپوزیتی نمونه‌های مورد نیاز برای انجام تست کشش مطابق با استاندارد ASTM-D3039 [۲۰] از صفحه برش داده شده است. در شکل ۳ ابعاد استخراج شده از استاندارد نشان داده شده است. در شکل ۴ نمونه‌های برش داده شده از صفحه اولیه نشان داده شده است.



شکل ۳- ابعاد نمونه های آزمون کشش



شکل ۵- دستگاه آزمون کشش به همراه نمونه

### آزمون خمش سه نقطه

جهت انجام تست خمش سه نقطه پنج نمونه مطابق با استاندارد ASTM D7246M-03 [۲۱] آماده شده است. ابعاد و اندازه نمونه‌های استاندارد در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس این استاندارد ضخامت قطعات بایستی ۴ میلی‌متر باشد و فاصله دو تکیه‌گاه دستگاه آزمون خمش سه نقطه، ۳۲ برابر این ضخامت بوده که برابر با ۱۲۸ میلی‌متر است و طول نمونه باید ۲۰ درصد بیشتر از فاصله میان دو تکیه‌گاه باشد. طول نمونه‌ها در حالت استاندارد برابر با ۱۵۳/۶ میلی‌متر، و عرض نمونه نیز ثابت و برابر با ۱۳ میلی‌متر است. در صورت عدم امکان دسترسی به این ضخامت می‌توان با تغییر طول قطعه و حفظ نسبت فاصله دو تکیه‌گاه و ضخامت که برابر با ۳۲ است نمونه‌ای با ضخامت‌های متفاوت و در نتیجه طول متفاوت آماده نمود اما مقدار عرض ثابت است. تمامی نمونه‌ها از صفحه‌ای که



شکل ۴- نمونه های آماده شده برای آزمون کشش

آزمون کشش یک روش استاندارد برای تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها است. برای انجام آزمون کشش در این پژوهش از دستگاه تست کشش و خستگی محوری سنتام (SANTAM SAF-50) استفاده شده است. بر طبق کاتالوگ ظرفیت این دستگاه ۵۰ کیلو نیوتون و حداکثر فاصله میان دو فک آن ۲۵۰ میلی‌متر است و از مکانیزم جک هیدرولیکی به منظور اعمال نیرو بهره می‌برد. این آزمون در دمای محیطی ۲۵ درجه سانتیگراد، رطوبت ۵۵ درصد و سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است که با توجه به استاندارد این سرعت برای

وسط تیر بوجود می‌آید. تنش در هر نقطه از نمودار نیرو-جابجایی می‌تواند با استفاده از رابطه ۱ بیان شود [۲۱].

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\sigma$  میزان تنش در پوسته خارجی تیر و در میانه تیر است و به ترتیب  $P$  مقدار نیرو در هر نقطه از نمودار نیرو-جابجایی،  $L$  فاصله میان دو تکیه گاه،  $b$  عرض تیر و  $h$  ضخامت تیر هستند. همچنین بیشینه کرنش نیز در پوسته خارجی تیر و در وسط تیر که محل اعمال نیرو است بوجود می‌آید که مقدار آن با رابطه ۲ بیان شده است [۲۱].

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

در رابطه ۲،  $\epsilon$  بیشینه کرنش در پوسته خارجی تیر و در وسط تیر است و  $\delta$  میزان خیز نقطه وسط تیر است.

با توجه به مطالب فوق می‌توان با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی که از آزمون خمش سه نقطه بدست می‌آید، نمودار تنش-کرنش بیشینه را در پوسته بیرونی و در وسط تیر بدست آورد.

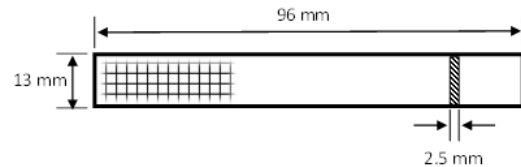
مدول الاستیک عبارت است از نسبت یک بازه از تنش به بازه کرنش متناظر آن. برای محاسبه مدول الاستیک و تری خمشی (Flexural Chord Modulus of Elasticity)، بازه پیشنهاد شده در استاندارد ۰/۰۰۲ می‌باشد که از کرنش ۰/۰۰۱ بر روی نمودار شروع شده و تا کرنش ۰/۰۰۳ ادامه می‌یابد [۲۱]. بنابراین مدول الاستیک و تری خمشی در این بازه با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شده است [۲۱].

$$E_f^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3)$$

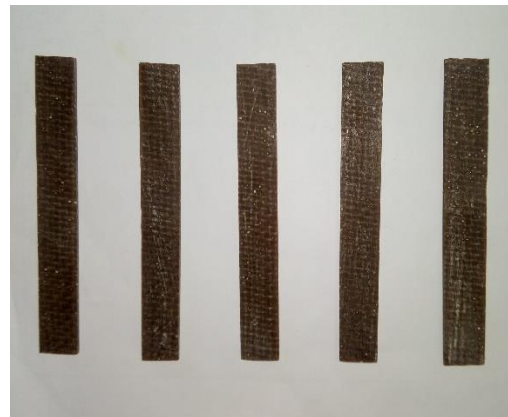
در رابطه فوق  $E_f^{chord}$  مدول الاستیک و تری خمشی می‌باشد و  $\Delta\sigma$  و  $\Delta\epsilon$  نیز به ترتیب تفاضل تنش و کرنش در دو نقطه انتخابی است که به طور معمول  $\Delta\epsilon = 0.002$  است.

مدول الاستیک سکانت خمشی (Flexural Secant Modulus of Elasticity) عبارت است از نسبت تنش به کرنش در هر نقطه دلخواه از نمودار تنش-کرنش و با واحد MPa بیان می‌شود. نقطه شروع برای محاسبه مدول الاستیک سکانت خمشی، نقطه مبدا در نمودار تنش-کرنش است. با استفاده از رابطه ۴ می‌توان این مقدار را محاسبه نمود [۲۱].

فرایند ساخت آن تشریح شد، برش داده شدند ضخامت نمونه‌ها ۲/۵ میلی‌متر است. با در نظر گرفتن شرایط استاندارد، طول هر نمونه برابر با ۹۶ میلی‌متر است و فاصله میان دو تکیه‌گاه برابر با ۸۰ میلی‌متر است. نمونه تهیه شده در شکل ۷ نشان داده شده است سرعت انجام آزمون با توجه به استاندارد مورد نظر ۱ میلی‌متر بر دقیقه است و برای انجام آزمون از دستگاه تست کشش اینسترون (INSTRON R5500) استفاده شده است. دستگاه آزمون خمش سه نقطه به همراه نمونه تحت آزمون در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۶- ابعاد نمونه‌های آزمون خمش سه نقطه

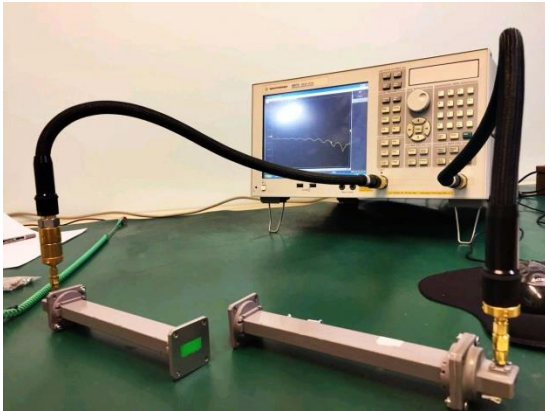


شکل ۷- نمونه‌های تهیه شده برای آزمون خمش سه نقطه



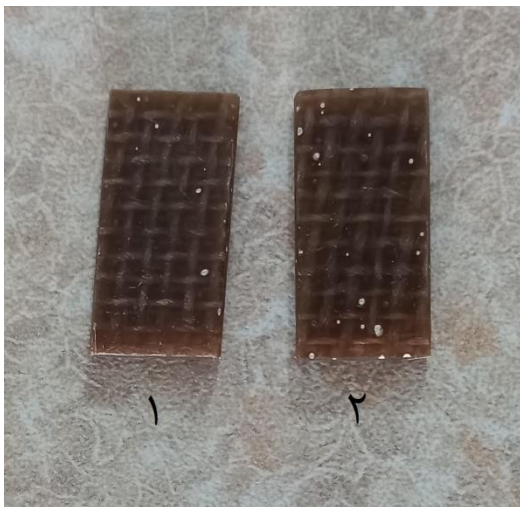
شکل ۸- دستگاه آزمون خمش سه نقطه به همراه نمونه تحت آزمون

در یک تیر همگن با تکیه‌گاه‌های لولایی و بارگذاری متمرکز در مرکز آن، بیشینه تنش در پوسته بیرونی تیر و در



شکل ۹ - دستگاه Network Analyzer ستاپ تست اندازه‌گیری جذب الکتریکی و الکترومغناطیسی

برش نمونه‌ها بایستی دقیق و بدون بریدگی‌های نامرتب باشد. چرا که وجود هرگونه کوتاه و یا بلندی نامنظم در اندازه نمونه‌ها باعث ورود هوای اضافی (ماده ای 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 از کامپوزیت زیست تخریب پذیر کنف/ اپوکسی دو نمونه با ابعاد ۱۰/۱۶ میلی‌متر عرض و ۲۲/۸۶ میلی‌متر طول و با ضخامت تقریبی ۲ میلی‌متر همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است به صورت دستی برش زده شد. این ابعاد برابر ابعاد تیغه‌ی دستگاه آزمون که در شکل ۹ نشان داده شده است، در نظر گرفته شدند. نمونه‌ها بایستی تا حد امکان صاف و بدون خمیدگی باشند.



شکل ۱۰ - نمونه‌های آماده شده جهت تست ثابت دی الکتریک.

$$E_f^{secant} = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (۴)$$

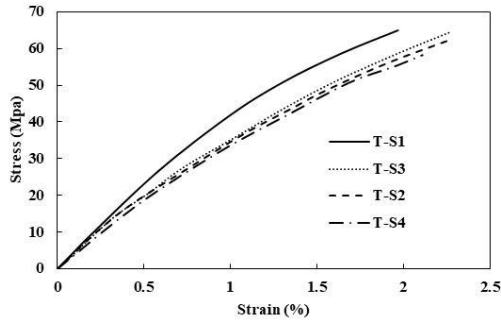
در رابطه ۴،  $E_f^{secant}$  بیانگر مدول الاستیک سکانت خمشی و  $m$  شیب سکانت نمودار نیرو- جابجایی است.

### آزمون ثابت دی الکتریک

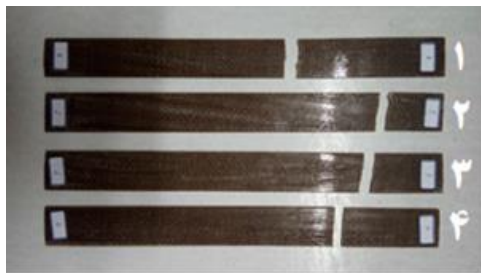
آزمون ثابت دی الکتریک برای تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی کامپوزیت تولید شده انجام شد. آزمون ثابت دی الکتریک با استفاده از دستگاه Network Analyzer واقع در پژوهشگاه نصر همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است انجام شد. استاندارد اندازه‌گیری مشخصه‌های دی الکتریک مواد بر اساس استاندارد ASTM D5568 [۲۲] روش اندازه‌گیری موجبری دو پورته است. تکنیک موجبری مستطیلی نمونه‌ای از دسته بندی 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 پورته است. این تکنیک برای اندازه‌گیری گذردهی الکتریکی نسبی مختلط (ثابت دی الکتریک نسبی و 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 نمونه دارد. محدوده عملیاتی فرکانسی بستگی به اندازه نمونه 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 موردنیاز است. هم‌چنین به طور کلی این آزمایش را می‌توان برای موجبرهای دایروی نیز به کار برد. نمونه‌های مورد آزمایش بایستی به اندازه کافی بلند باشند.

## نتایج

در این پژوهش تعداد ۴ نمونه از کامپوزیت زیست تخریب پذیر کنف/اپوکسی مطابق با استاندارد ASTM-D3039 [۲۰] تحت آزمون کشش قرار گرفت که نمودارهای نیرو-جابجایی آن‌ها در شکل ۱۱ آمده است. بر اساس نمودار تنش- کرنش نشان داده شده در شکل ۱۲ میزان حداکثر تنش کششی قابل تحمل برای این کامپوزیت ۶۲/۴۲ مگاپاسکال است که در حداکثر کرنش ۲/۲۳ درصد باعث شکست قطعه شده است. با توجه به مشخص نبودن محل دقیق تنش تسلیم از معیار تنش آفست استفاده شده است و در محلی که میزان کرنش به ۰/۲ درصد رسیده است میزان تنش تسلیم ۸/۵ مگاپاسکال بدست آمده است. همچنین شیب این ناحیه نمایانگر مدول الاستیک است که مقدار آن با توجه به نتایج حاصل از تست ۴/۴۳ گیگاپاسکال است. با توجه به مساحت زیر نمودار تنش کرنش میانگین میزان چقرمگی این کامپوزیت ۸۱۶/۱۲ کیلو ژول بر متر مکعب است. شکست نمونه‌ها بعد از انجام آزمون کشش در شکل ۱۳ نشان داده شده است. شکست همه نمونه‌های آزمون کشش مطابق شکست‌های پیش بینی شده در استاندارد ASTM D3039 اتفاق افتاده است شکست نمونه‌های دوم و سوم و چهارم که نتایج آنها خیلی به هم نزدیک هستند از نوع شکست LAT است و نوع شکست نمونه اول از نوع شکست LGM است.



شکل ۱۲- نمودار تنش-کرنش برای آزمون کشش

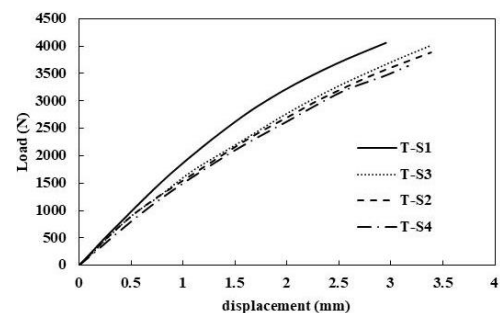


شکل ۲- نمونه‌ها بعد از آزمون کشش

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون کشش

استحکام کششی (Mpa)	حداکثر کرنش (%)	مدول الاستیک (Gpa)	نمونه
۶۴/۹۶	۱/۹۷	۴/۷۹	نمونه اول
۶۴/۳۲	۲/۲۶	۴/۴۱	نمونه دوم
۶۲/۱۸	۲/۲۶	۴/۴۱	نمونه سوم
۵۸/۲۲	۲/۱۷	۴/۱۲	نمونه چهارم
۶۲/۴۲	۲/۲۳	۴/۴۳	میانگین

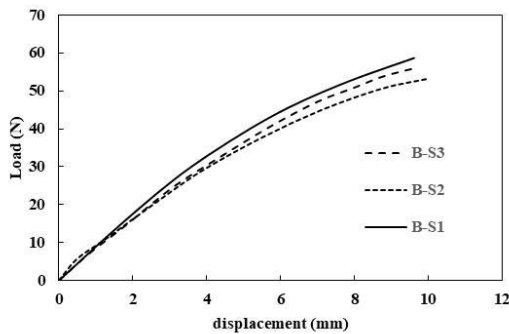
در جدول ۳ نتایج آزمون کشش به صورت خلاصه آورده شده است. علت اختلاف کم بین نتایج، همانند تمام کارهای تجربی، خطاهای ناشی از خطاهای انسانی، خطاهای تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری و همچنین عیوب و تخلخل بین نمونه‌ها است. با مقایسه نتایج حاصل از این آزمون با نتایج سافان و همکارانش [۲۳] می‌توان میزان صحت نتایج بدست آمده را بررسی نمود. آن‌ها خواص کششی و ضربه‌پذیری صفحات کامپوزیتی کنف/اپوکسی و بامبو/اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند و میزان تقریبی ۴۰ مگاپاسکال را به عنوان استحکام کششی کامپوزیت کنف/اپوکسی ارائه نموده‌اند. همچنین میزان مدول الاستیک به دست آمده توسط آن‌ها برای کامپوزیت کنف/اپوکسی در حدود ۴/۷۱ گیگاپاسکال گزارش شده است



شکل ۱۱- نمودار نیرو جابجایی برای آزمون کشش

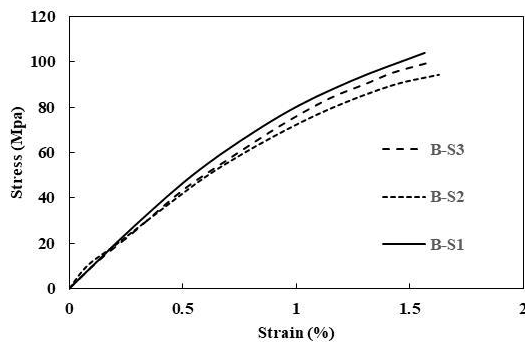


شکل ۱۴ نمودار نیرو- جابجایی مربوط به خمش سه نقطه هر سه نمونه آورده شده است.



شکل ۳- نمودار نیرو جابجایی آزمون خمش سه نقطه

همچنین با استفاده از روابط ۱ و ۲ نمودار تنش و کرنش مربوط به آزمون خمش سه نقطه برای کامپوزیت، استخراج شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. تصویر نمونه‌ها بعد از آزمون خمش در شکل ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۴ می‌توان دید که میانگین استحکام خمشی برابر ۹۹/۱۹ مگاپاسکال می‌باشد که در میانگین کرنش ۱/۵۸ درصد رخ می‌دهد.



شکل ۴- نمودار تنش-کرنش آزمون خمش سه نقطه

جدول ۴- خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی/کنف

استحکام خمشی (Mpa)	حداکثر کرنش (%)	مدول الاستیک و تری (Gpa)	نمونه
۱۰۳/۹۵	۱/۵۶	۵/۷۲۰	نمونه اول
۹۹/۳۴	۱/۵۷	۵/۵۱۸	نمونه دوم
۹۴/۲۹	۱/۶۲	۵/۶۱۹	نمونه سوم
۹۹/۱۹	۱/۵۸	۵/۶۱۹	میانگین

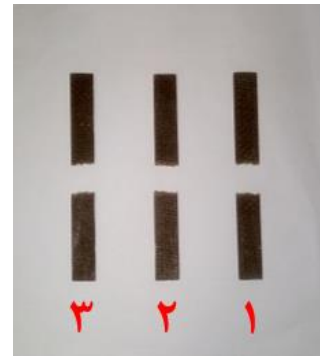
که به مقدار میانگین مدول الاستیک بدست آمده از آزمون کشش در این مقاله نزدیک است.

یاسیر و همکارانش [۲۴] خواص مکانیکی کامپوزیت کنف/اپوکسی را با استفاده از سه آزمون کشش، خمش سه نقطه و ضربه بررسی کردند. آن‌ها در آزمون کشش استحکام میانگین ۵۵ مگاپاسکال را برای کامپوزیت کنف/اپوکسی با الیاف تقویت کننده بافته شده به دست آوردند. مدول الاستیک بدست آمده توسط آن‌ها ۵/۱ گیگاپاسکال گزارش شده است.

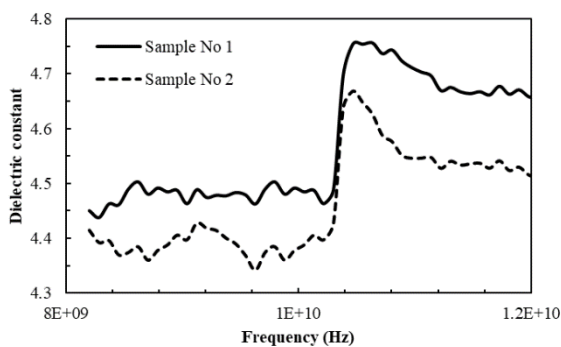
دامنه گسترده نتایج ارائه شده برای خواص مکانیکی کامپوزیت کنف/اپوکسی را می‌توان حاصل پارامترهای زیادی دانست. یکی از این پارامترها اختلاف میان درصد وزنی الیاف و رزین در بررسی‌های مختلف است. همچنین یکی دیگر از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر روی خواص مکانیکی این نوع کامپوزیت‌ها میزان رطوبت الیاف و در نتیجه اتصال میان ماتریس و الیاف است. از دیگر عوامل مهم می‌توان به متفاوت بودن نوع رزین مورد استفاده و روش پخت نمونه‌ها در پژوهش‌های مختلف دانست. اسیر و همکارانش میزان درصد حجمی الیاف را ۳۶ درصد گزارش نمودند که به مقدار درصد حجمی الیاف استفاده شده در این پژوهش نزدیک است و در نتیجه منجر به کاهش میزان اختلاف در نتایج شده است. میزان درصد حجمی الیاف در مطالعات انجام شده توسط سافان و همکارانش ارائه نشده است. همچنین روش ساخت در مطالعات متفاوت می‌باشد. کامپوزیت تولید شده در پژوهش‌های پیشین توسط قالب و تحت فشار تولید شدند اما روش تولید کامپوزیت در این پژوهش از روش VARTM استفاده شده است که با مکش هوای میان الیاف، تخلخل در محصول نهایی را نسبت به سایر روش‌ها به شدت کاهش می‌دهد و منجر به افزایش خواص مکانیکی سازه و استحکام بیشتر می‌شود. از جمله عوامل تاثیرگذار دیگر بر روی نتایج می‌توان به تفاوت در کیفیت الیاف تقویت کننده اشاره کرد. الیاف استفاده شده در این مقاله از نوع الیاف کنف با کیفیت عالی و مرغوب هستند که این عامل نیز می‌تواند منجر به افزایش استحکام کامپوزیت نسبت به تعدادی از بررسی‌های پیشین شود.

برای انجام آزمون خمش سه نقطه به دلیل مطابقت کامل نتایج و همانندی آن‌ها برای سه نمونه اول، تنها سه نمونه از پنج نمونه تحت آزمون قرار گرفت و نتایج خواص خمشی کامپوزیت با توجه به این سه نمونه استخراج شده است. در

نمودارهای ثابت دی الکتریک - فرکانس، تانژانت تلفات- فرکانس، ثابت مغناطیسی- فرکانس نمونه‌های آماده شده برای آزمون دی الکتریک از کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر کنف/اپوکسی، با استفاده از دستگاه Network Analyzer به دست آمد. بر اساس منحنی‌های ثابت دی الکتریک- فرکانس نشان داده شده در شکل ۱۷، ماکزیمم ثابت دی الکتریک در باند X برای نمونه اول و دوم کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر کنف/اپوکسی، به ترتیب برابر با، ۴/۷۴ و ۴/۶۶ است، که این مقدار ثابت دی الکتریک یک مقدار بسیار مطلوب نسبت به فلزات محسوب می‌شود.

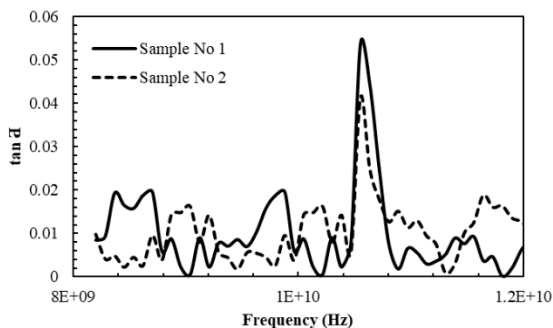


شکل ۵- نمونه های آزمون خمش سه نقطه بعد از انجام آزمون



شکل ۱۷- نمودار ثابت دی الکتریک کامپوزیت تولید شده در فرکانس باند X.

بر اساس منحنی‌های تانژانت تلفات- فرکانس نشان داده شده در شکل ۱۸، ماکزیمم تانژانت تلفات، برای نمونه های اول و دوم کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر کنف/اپوکسی، به ترتیب برابر با، ۰/۰۵۳ و ۰/۰۴۱ است. همچنین نمودار ثابت مغناطیسی نمونه اول و دوم کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر کنف/اپوکسی، در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۸- نمودار تانژانت تلفات کامپوزیت تولید شده در فرکانس باند X.

نتایج خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی نمونه‌های کامپوزیت زیست تخریب پذیر کنف/اپوکسی نشان می‌دهد که

یوسیف و همکارانش [۷] خواص خمشی صفحات کامپوزیتی کنف/اپوکسی را با میزان درصد حجمی الیاف ۳۸-۴۱ درصد به دو صورت بهینه سازی شده با استفاده از سدیم هیدرواکسید و بهینه نشده بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها میزان مدول خمشی کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر کنف/اپوکسی در حالت بهینه نشده ۵ تا ۶ گیگاپاسکال است. باکار و همکارانش [۲۵] نیز تاثیر بهینه‌سازی الیاف کنف، بر روی خواص کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف کنف را در درصد حجمی‌های مختلف الیاف بررسی نمودند. مطالعات آن‌ها شامل هر دو حالت بهینه شده و بدون بهینه‌سازی الیاف در نسبت جرمی‌های متفاوت الیاف کنف می‌باشد.

همچنین آن‌ها مدول الاستیک خمشی را نیز نسبت به تغییرات درصد وزنی الیاف به دست آوردند. میانگین مدول الاستیک خمشی در این بررسی بین ۲ تا ۳ گیگاپاسکال است. یاسیر و همکارانش [۲۴] نیز مدول الاستیک خمشی و استحکام خمشی کامپوزیت کنف/اپوکسی با درصد حجمی الیاف ۳۶ درصد که به روش لایه چینی تحت فشار تهیه شده است را به ترتیب ۴/۳ گیگاپاسکال و ۹۰ مگاپاسکال گزارش کرده‌اند. مهمترین عامل تاثیر گزار بر روی این نتایج می‌توان نوع مواد مصرفی باشد. با توجه به عدم وجود استاندارد قابل اتکا در الیاف کنف کیفیت این الیاف می‌تواند در بررسی‌ها متفاوت بوده که منجر به تغییر در استحکام الیاف و تغییر در مرز میان الیاف و ماتریس می‌شود.

با توجه به مقایسه نتایج می‌توان دریافت که مقادیر ارائه داده شده برای خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده از صحت و اعتبار مطلوبی برخوردار است و نتایج در محدوده بررسی‌های انجام شده در سایر مطالعات مشابه قرار می‌گیرد.

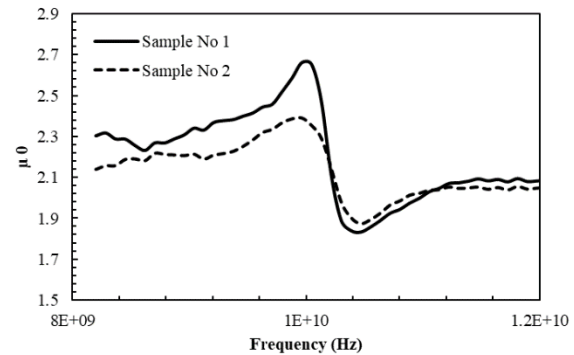
دارای وزن پایین تری می‌باشد. همچنین هزینه تولید پایین نیز از مزایای اقتصادی در تولید و استفاده از این کامپوزیت است. به دلیل زیست تخریب پذیر بودن کامپوزیت و استفاده از منابع تجدیدپذیر به عنوان فاز تقویت کننده، در حین تولید و پس از اتمام دوره مصرف محصول اثرات نامطلوب زیست محیطی کمی تولید خواهد شد.

- نمونه‌های تولید شده با وجود خلاء خوب و قابل قبول دارای حباب و تخلخل‌های کوچک ولی با تعداد بسیار زیادی همراه بود که موجب کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت شده است. این امر می‌تواند یکی از ضعف‌های الیاف کنف در تولید کامپوزیت با استفاده از خلاء باشد.
- ماکزیمم ثابت دی الکتریک و تانژانت تلفات که برای قطعه کامپوزیتی تفلون تقویت شده با الیاف شیشه بدست آمد به ترتیب برابر با ۴/۷۴ و ۰/۰۵۳ است.

#### منابع

- [1] Mann, Guravtar Singh, et al. "Green composites: A review of processing technologies and recent applications." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 33.8 (2020): 1145-1171.
- [2] P. K. Bajpai, I. Singh and J. Madaan, "Development and characterization of PLA-based green composites: A review," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 27, pp. 52-81, 2014.
- [3] Shekar, HS Sharath, and M. Ramachandra. "Green composites: a review." *Materials Today: Proceedings* 5.1 (2018): 2518-2526.
- [4] H. Akil, M. Zamri and M. Osman, "The use of kenaf fibers as reinforcements in composites," Elsevier, pp. 138-161, 2015.
- [5] S. H. Aziz and M. P. Ansell, "The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1--polyester resin matrix," *Composites science and technology*, vol. 64, pp. 1219-1230, 2004.
- [6] T. Nishino, K. Hirao, M. Kotera, K. Nakamae and H. Inagaki, "Kenaf reinforced biodegradable composite," *Composites*

این کامپوزیت از پتانسیل بالقوه‌ای در طراحی کاربردهای الکترومغناطیسی و الکتریکی نسبت به فلزات برخوردار است. ماکزیمم ثابت دی الکتریک که با این روش پخت برای قطعات کامپوزیت زیست تخریب پذیر کنف/ اپوکسی، بدست آمد برابر با ۴/۷۴ است.



شکل ۱۹- نمودار ثابت مغناطیسی کامپوزیت تولید شده در فرکانس باند X.

#### بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از الیاف کنف و رزین اپوکسی نوعی کامپوزیت زیست تخریب پذیر تولید شد که با استفاده از آزمون کشش و خمش سه نقطه خواص مکانیکی آن به دست آمد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- میانگین استحکام کششی و مدول الاستیک به دست آمده در این پژوهش به ترتیب برابر با ۶۲/۴۲ مگاپاسکال و ۴/۳۴ گیگاپاسکال است. میانگین استحکام خمشی و مدول الاستیک و تری خمشی نمونه‌های تولیدی به ترتیب برابر با ۹۹/۱۹ مگاپاسکال و ۵/۶۱۹ گیگاپاسکال است.
- خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده در مقابل کامپوزیت‌هایی که با الیاف شیشه و کربن و سایر الیاف مصنوعی مورد استفاده در زمینه کامپوزیت‌های سازه‌ای تقویت شده‌اند دارای استحکام کمتری می‌باشد که به دلیل استحکام پایین‌تر الیاف تقویت کننده و عدم برخورداری الیاف از کیفیت و تراکم لازم است.
- این کامپوزیت در مقایسه با سایر کامپوزیت‌ها به دلیل چگالی پایین الیاف کنف (۱,۵ گرم بر سانتیمتر مکعب) نسبت به الیاف شیشه (۲,۵۵ گرم بر سانتی متر مکعب) و کربن (۱,۷۸ گرم بر سانتیمتر مکعب)

- [16] Khalili, S. M. R., V. Daghigh, and R. Eslami Farsani. "Mechanical behavior of basalt fiber-reinforced and basalt fiber metal laminate composites under tensile and bending loads." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30.8 (2011): 647-659.
- [17] Tabatabaeian, Ali, et al. "Environmental, mechanical and materialistic effects on delamination damage of glass fiber composites: Analysis and optimization." *Journal of Composite Materials* 53.26-27 (2019): 3671-3680.
- [18] G. Koronis, A. Silva and M. Fontul, "Green composites: A review of adequate materials for automotive applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 44, pp. 120-127, 2013.
- [19] Ramesh, P., B. Durga Prasad, and K. L. Narayana. "Characterization of kenaf fiber and its composites: A review." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 37.11 (2018): 731-737.
- [20] ASTM D3039/D3039M-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014; Available online: [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [21] ASTM D7246/D7246M-03. Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2003; Available online: [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [22] ASTM-D5568 Standard Test Method for Measuring Relative Complex Permittivity and Relative Magnetic Permeability of Solid Materials at Microwave Frequencies using waveguide.
- [23] Safwan, Ahmad, et al. "Preliminary study on tensile and impact properties of kenaf/bamboo fiber reinforced epoxy composites." *Journal of Renewable Materials* 6.5 (2018): 529-535.
- [24] Kirmasha, Yasir Khaleel, et al. "Mechanical Performance of Unstitched and Silk Fiber-Stitched Woven Kenaf Fiber-Reinforced Epoxy Composites." *Materials* 13.21 (2020): 4801.
- science and technology, vol. 63, pp. 1281-1286, 2003.
- [7] B. Yousif, A. Shalwan, C. W. Chin and K. Ming, "Flexural properties of treated and untreated kenaf/epoxy composites," *Materials and Design*, vol. 40, pp. 378-385, 2012.
- [8] Mahjoub, Reza, et al. "Characteristics of continuous unidirectional kenaf fiber reinforced epoxy composites." *Materials & Design* 64 (2014): 640-649.
- [9] Sarkhosh R, Zarei H. Design, Manufacturing and mechanical and electrical properties evaluation of glass fiber reinforced PTFE polymer matrix composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2021; 21 (2) :117-127.(in persion)
- [10] G. S. Mann, L. P. Singh, P. Kumar and S. Singh, "Green composites: A review of processing technologies and recent applications," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 33, pp. 1145-1171, 2020.
- [11] A. Manral and P. K. Bajpai, "Static and dynamic mechanical analysis of geometrically different kenaf/PLA green composite laminates," *Polymer Composites*, vol. 41, pp. 691-706, 2020.
- [12] Ahmad Nadzri, Seri Nur Zumaimi, et al. "A review on the kenaf/glass hybrid composites with limitations on mechanical and low velocity impact properties." *Polymers* 12.6 (2020): 1285.
- [13] Beigpour, Reza, Hassan Shokrollahi, and S. Mohammad Reza Khalili. "Experimental and numerical analysis of a biodegradable hybrid composite under tensile and three-point bending tests." *Composite Structures* 273 (2021): 114255.
- [14] Malik, Khurshid, Faiz Ahmad, and Ebru Gunister. "A Review on the Kenaf Fiber Reinforced Thermoset Composites." *Applied Composite Materials* 28.2 (2021): 491-528.
- [15] Setyayunita, T., et al. "Study on The Characteristics of NaCl Treated Kenaf Fiber Epoxy Composite Board." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 891. No. 1. IOP Publishing, 2021.

- [25] Bakar, Abu, Sahrim Ahmad, and W. Kuntjoro. "The mechanical properties of treated and untreated kenaf fibre reinforced epoxy composite." *Journal of Biobased Materials and Bioenergy* 4.2 (2010): 159-163.