



بررسی استحکام کششی و ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه

احسان طالع‌ی فرد^{1*}، حسین پارسا²، جعفر اسکندری جم³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 15875-1774، etalei74@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

ریدوم کامپوزیتی سازه‌ای مقاوم برای محافظت از آنتن رادارهای مخابراتی در برابر عوامل مکانیکی و محیطی می‌باشد. با توجه به قرارگیری آن در مقابل آنتن و امکان تأثیر بر روی امواج دریافتی و ارسالی، علاوه بر خواص مکانیکی، خواص الکترومغناطیسی این سازه بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش خواص مکانیکی (استحکام کششی در راستای الیاف) به همراه خواص الکترومغناطیسی (ثابت دی‌الکتریک در فرکانس باند X) برای ریدوم کامپوزیتی (GFRP) بررسی و بهینه‌یابی شده است. برای این منظور از دو نوع الیاف شیشه سری E و D و دو نوع رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر استفاده شده است. علاوه بر آن، جهت ساخت کامپوزیت، سه روش متداول لایه‌چینی دستی، کیسه خلأ و نفوذ در خلأ به کار گرفته شده است. همچنین با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل سیگنال به نویز ترکیب بهینه برای هر یک از خواص به دست آمد که برای استحکام کششی ترکیب الیاف شیشه سری E و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ بالاترین استحکام کششی به مقدار 320.9 مگاپاسکال و برای ثابت دی‌الکتریک الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ با مقدار 2.85 پایین‌ترین مقدار تعیین گردید. پس از دست‌یابی به ترکیب بهینه برای هر یک از خواص، به بررسی حالت بهینه با در نظر گرفتن تمامی عوامل مکانیکی و الکترومغناطیسی بصورت یکجا به کمک روش بهینه‌یابی چندپاسخه (رابطه خاکستری)، پرداخته شده که در نهایت، ترکیب الیاف شیشه سری D، رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ پیشنهاد شده است.

دریافت: 1400/11/05

پذیرش: 1401/01/31

کلیدواژگان

ریدوم، کامپوزیت، استحکام کششی، ثابت دی‌الکتریک

Investigation of tensile strength and dielectric constant of GFRP composite

Ehsan Talei-Fard^{1*}, Hossein Parsa¹, Jafar Eskandari Jam¹

1- Faculty of Materials and Manufacturing Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, etalei74@gmail.com

Keywords

Radome, Composites, tensile strength, dielectric constant

Abstract

A composite radome is a durable structure to protect telecommunication radar antennas against mechanical and environmental factors. Due to its placement in front of the antenna and the possibility of affecting the received and transmitted waves, in addition to the mechanical properties, the electromagnetic properties of this structure are very important. In this study, the mechanical properties (tensile strength in the direction of fibers) and the electromagnetic properties (dielectric constant at X-band frequency) for a GFRP composite radome has been studied and optimized. For this purpose, two types of glass fibers E and D series, and two types of epoxy resin and polyester resin have been used. In addition, three common methods of composite fabrication including hand layup, vacuum bag, and vacuum infusion have been used. Also, by using the Taguchi test design method and signal-to-noise analysis, the optimal composition was obtained for each of the properties, which for tensile strength of the combination of E series glass fibers and epoxy resin and vacuum bag fabrication method, the highest tensile strength was 320.9 MPa and for the dielectric constant of D series glass fibers and epoxy resin and vacuum bag fabrication method with the lowest value of 2.85 were determined. After determining the optimal composition for each of the properties, the optimum state was investigated by considering all the mechanical and electromagnetic properties factors together by using the multi-response optimization method (gray relation). Finally, a combination of D-series glass fibers, epoxy resin, and vacuum bag fabrication method was proposed.

1- مقدمه

الکترومغناطیسی رادار اثر نامطلوبی بگذارد. به همین منظور برای ساخت ریدوم از موادی استفاده می‌شود که هم استحکام مکانیکی لازم را دارا بوده و هم کاملاً از آنتن در برابر شرایطی محیطی که در آن قرار دارد محافظت کند و همچنین دارای خواص الکترومغناطیسی مطلوب باشد تا در عملکرد رادار تأثیر نامطلوبی

تمامی اجزا رادار برای مقابله با عوامل مکانیکی و محیطی نیاز به یک پوشش محافظ دارند که به این پوشش در اصطلاح ریدوم گفته می‌شود. این پوشش‌ها ضمن داشتن خواص سازه‌ای (استحکام مکانیکی مناسب)، نباید بر روی امواج برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Talei-Fard, E., Parsa, H., Eskandari Jam, J., "Investigation of tensile strength and dielectric constant of GFRP composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1708-1714, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.546100.1767>

بیس‌مالی‌مید به کد QY8911 و QY9611 و رزین سیانات استر 9915 در سه فرکانس 0.2، 1 و 1.6 (THz) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند که در هر 3 فرکانس رزین اپوکسی BA9916 کمترین مقدار دی‌الکتریک (2.9، 2.83 و 2.8 به ترتیب برای فرکانس 0.2 و 1 و 1.6 (THz)) به دست آمده است.

در سال 2015 ردی و همکاران [7] به مطالعه و طراحی یک ریدوم تحت فشار بالا برای یک زیردریایی پرداختند. در بخشی از این پژوهش با تحقیق بر روی خواص الیاف شیشه، کولار و کربن به این نتیجه رسیدند که الیاف کربن به دلیل رسانای الکتریکی بودن برای ریدوم مناسب نیست و همچنین کولار با وجود مستحکم‌تر بودن از الیاف شیشه، در جذب رطوبت و مقاومت فشاری ضعیف است به همین دلیل سه نوع رایج از الیاف شیشه E و H و S را انتخاب کردند. با بررسی خواص گونه‌های بیان شده به این نتیجه دست یافتند که با وجود بالاتر بودن استحکام و مدول کششی انواع E و S، نوع H به دلیل ثابت دی‌الکتریک 2.9 و تانژانت تلفات 0.01 انتخاب مناسب‌تری برای آن‌ها می‌باشد در سال 2018 زیانگ ژو و همکاران [8] تحقیقاتی بر روی خواص دی‌الکتریک کامپوزیت آرامید/اپوکسی تحت بار فشاری انجام دادند. آن‌ها مقادیر دی‌الکتریک کامپوزیت تک‌جهته و شبه آیزوتروپیک آرامید/اپوکسی و رزین اپوکسی و کامپوزیت شیشه/اپوکسی را تحت بارهای فشاری مختلف اندازه‌گیری کردند. در نهایت مشاهده شد که در تمام باند X بار فشاری تأثیر بسیار کمی بر روی ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت شیشه اپوکسی با مقدار 3.95 به دست آمد. مختاری و همکاران [9] در سال 2019 در پژوهشی نحوه ساخت و ارزیابی یک ریدوم هواشناسی را بررسی کردند. فرایند طراحی، آزمون مکانیکی و میدانی ریدوم و پارامترهای مؤثر در آن بررسی و بهترین انتخاب برای ساخت ریدوم پیشنهاد و نمونه‌های طراحی شده، ساخته و در نهایت آزمون الکترومغناطیسی بر روی آن انجام شده است. از آنجایی که ریدوم در دوره کاری خود تحت بارگذاری‌های فشاری مانند نیروی باد قرار دارد، برای بررسی میزان دوام سازه ساخته شده در برابر کمناش ناشی از نیروی باد، نمونه‌های ساخته شده، مورد آزمون کمناش قرار گرفته است.

در سال 2021 سرخوش و زارعی [10] در تحقیقی مشابه خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت پلیمری تفلون تقویت شده با الیاف شیشه را بررسی کردند و جهت تعیین خواص مکانیکی آزمون کشش و جهت تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی آزمون ثابت دی‌الکتریک در باند X انجام گرفت. بیشینه استحکام کششی و مدول یانگ کششی که در این پژوهش به دست آمد به ترتیب برابر با 130 مگاپاسکال و 3.65 گیگاپاسکال است. ماکزیمم ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات نمونه‌های تولیدی در باند X به ترتیب برابر با 2.37 و 0.096 است.

در سال 2022 سرخوش و همکاران [11] در تحقیق دیگری بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر اپوکسی/کنف تولید شده با روش انتقال رزین به داخل قالب به کمک خلأ³ پرداختند. بیشینه استحکام کششی و مدول الاستیک به دست آمده از آزمون کشش در این پژوهش به ترتیب برابر با 62.42 مگاپاسکال و 4.43 گیگاپاسکال و بیشینه ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات نمونه‌های تولیدی در باند X به ترتیب برابر با 4.47 و 0.053 است.

مطالعات گوناگونی بر روی مواد دی‌الکتریک کامپوزیتی و خواص هر جز از آن بصورت مجزا انجام شده اما نگاهی جمعی برای یافتن بهترین مواد و روش ساخت که مطلوب‌ترین خواص مکانیکی (استحکام کششی) و خواص الکترو-

نگذارد. غالباً ریدوم‌ها از پوسته‌های با دی‌الکتریک¹ و تانژانت تلفات² بهینه مورد نیاز و همچنین استحکام بالا طراحی می‌شوند [1]. در نتیجه مهندسی به این نتیجه دست یافتند که ریدوم‌ها را از موادی باید ساخت که تمام این ویژگی‌های منحصر به فرد را دارا باشد و بهترین ماده‌ای که دارای خواص بهبود یافته است، کامپوزیت‌ها می‌باشد.

کامپوزیت به ماده‌ای اطلاق می‌شود که از دو فاز ماتریس یا زمینه و تقویت‌کننده تشکیل شده باشد که در آن‌ها اجزای تشکیل‌دهنده علاوه بر حفظ کردن ویژگی‌های خود، نقاط ضعف سایر اجزا را نیز تقویت می‌کنند. خواص الکتریکی و مکانیکی مواد کامپوزیت به عوامل مختلفی همچون جنس مواد بکار گرفته شده و روش ساخت بستگی دارد [2].

ریدوم‌های کامپوزیتی در دو دسته کامپوزیت‌های پلیمری و سرامیکی ساخته می‌شود. کامپوزیت‌های سرامیکی را می‌توان در دمای بسیار بالا مورد استفاده قرار داد. کامپوزیت‌های پلیمری گرمانرم در سازه‌های با دمای حرارت متوسط استفاده می‌شوند در حالی که مواد گرماسخت در دماهای بالا نیز مقاومت می‌کنند. در اکثر موارد ریدوم‌ها، همچون ریدوم زمینی شکل 1 با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت ساخته می‌شود و برای بهبود خواص آن‌ها از پوشش‌های مختلف استفاده می‌کنند [3].



Fig. 1 composite radome for Meteorological radar

شکل 1 نمونه ریدوم کامپوزیتی برای رادار هواشناسی

سوکولوو و همکاران [4] در سال 2004 به بررسی خواص دی‌الکتریک رزین اپوکسی و عامل‌های مختلف آن و انواع مختلف شیشه و کامپوزیت‌های ساخته شده با آن‌ها در بازه فرکانسی 1 (MHz) تا 400 (GHz) پرداختند. با مقایسه مقادیر مختلف به این نتیجه رسیدند که در پایین‌ترین فرکانس مقدار ثابت دی‌الکتریک رزین اپوکسی بین 3.4 تا 4 و تانژانت تلفات بین 0.01 تا 0.027 است، در حالی که با افزایش فرکانس ثابت دی‌الکتریک رزین کاهش ولی تانژانت تلفات افزایش می‌یابد به نحوی که در بالاترین فرکانس مقدار ثابت دی‌الکتریک بین 2.8 تا 3.1 و تانژانت تلفات بین 0.03 تا 0.045 می‌شود.

در تحقیق دیگری محمد اکرم و همکاران [5] در سال 2005 خواص دی‌الکتریک مواد کامپوزیتی پایه پلیمر را بررسی کردند و به مطالعه تأثیر دما و فرکانس بر روی این نوع کامپوزیت‌ها پرداختند. الیاف مورد مطالعه آن‌ها الیاف شیشه در انواع E، C و S و از پلی‌استر به عنوان زمینه استفاده شده است. در این تحقیق چهار نمونه را در شرایط یکسان ساخته‌اند و در بازه 330 (Hz) تا 3 (MHz) و دمای 25 تا 150 درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار دادند. در نهایت تفاوت نسبی بین نمونه‌ها در فرکانس‌های پایین مشاهده شد که با افزایش فرکانس این تفاوت به مراتب کاهش می‌یابد.

در سال 2010 وانگ و همکاران [6] در رابطه با طیف‌سنجی رزین کامپوزیت‌های که در سازه‌های هوانوردی استفاده می‌شوند، به مطالعه پرداختند. در این پژوهش دو نوع رزین اپوکسی A3238 و BA9916 و دو نوع رزین

¹ Dielectric

² Loss tangent

³ VARTM

ترکیبی با درصد برابر از شیشه سری E و D تشکیل شده است. برای عامل رزین نیز از دو سطح اپوکسی و یک سطح پلی‌استر (به دلیل اهمیت و کاربرد بیشتر رزین اپوکسی در مطالعات پیشین) و در نهایت برای روش ساخت سه سطح لایه‌چینی دستی، کیسه خلأ و نفوذ در خلأ به کار گرفته شده است.

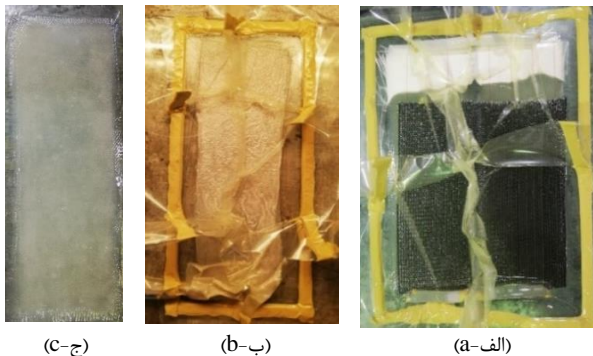


Fig. 2 Some of the parts made by a) infusion, b) vacuum bag, c) hand layup method

شکل 2 نمونه قطعات ساخته شده با روش الف) نفوذ در خلأ، ب) کیسه خلأ، ج) لایه‌چینی دستی

با توجه به کیفی بودن تمامی عامل‌ها از بین روش‌های طراحی آزمایش، روش تاگوچی که مبتنی بر آرایه‌های متعامد و آنالیز سیگنال به نویز است انتخاب شده است. به دلیل داشتن سه عامل در سه سطح بهترین انتخاب برای مسئله حاضر آرایه L_9 می‌باشد. به این ترتیب برای به دست آوردن بهترین ترکیب برای حالت بهینه هر یک از پاسخ‌ها نیاز به انجام 9 آزمایش می‌باشد که در جدول 1 نحوه ترکیب عامل‌ها مشخص شده است. جهت تعریف تاگوچی و انجام فرایند بهینه‌یابی از نرم‌افزار آماری مینی‌تب⁵ 20.3 استفاده شده است.

جدول 1 نحوه چینش متغیرهای ورودی

Table 1 Arrangement of input variables

شماره نمونه	جنس الیاف	جنس رزین	روش ساخت
1	شیشه سری E	اپوکسی	لایه‌چینی دستی
2	شیشه سری E	اپوکسی	کیسه خلأ
3	شیشه سری E	پلی‌استر	نفوذ در خلأ
4	شیشه سری D	پلی‌استر	لایه‌چینی دستی
5	شیشه سری D	اپوکسی	کیسه خلأ
6	شیشه سری D	اپوکسی	نفوذ در خلأ
7	ترکیب شیشه سری E و D	اپوکسی	لایه‌چینی دستی
8	ترکیب شیشه سری E و D	پلی‌استر	کیسه خلأ
9	ترکیب شیشه سری E و D	اپوکسی	نفوذ در خلأ

متغیرهای پاسخ در این پژوهش، استحکام کششی و ثابت دی‌الکتریک می‌باشند، که در بخش بعد بصورت مختصر به بیان استانداردها و روش‌های محاسبه این خواص اشاره می‌شود.

برای به دست آوردن حالت بهینه هر یک از این پاسخ‌ها، نیاز به انجام تحلیل سیگنال به نویز بر روی آن‌ها می‌باشد. مقدار پاسخ موردنظر از رابطه 1 برای خواص مکانیکی هر چه بیشتری باشد بهتر است و از رابطه 2 برای خواص الکترومغناطیسی اگر هر چه مقدار کمتری باشد مطلوب‌تر است، مقدار میانگین

مغناطیسی (ثابت دی‌الکتریک) را داشته باشد و بسیار کاربردی باشد، تا کنون انجام نشده است. لذا در این تحقیق با بررسی خواص مکانیکی و خواص الکترومغناطیسی در مدل‌های مختلف به مقادیر مطلوب و بهینه دست یافته و با یکدیگر مقایسه شده است.

2- مواد و روش ساخت

1-2- مواد

برای استفاده از ریدوم به طور معمول از الیاف شیشه استفاده می‌شود [12]. الیاف شیشه دارای خواص مکانیکی قابل قبول و خواص الکترومغناطیسی مناسبی می‌باشد و همچنین از نظر قیمت از الیاف کربن و آرامید بسیار بصره‌تر است. الیاف شیشه نوع D مخصوص کاربردهای دی‌الکتریک است، ولی خواص مکانیکی آن از نوع E که عایق الکتریکی می‌باشد، کمتر است. با این وجود نوع E نیز به دلیل وجود درصد کمی از ترکیبات فلزی خواص الکترومغناطیسی مطلوبی دارد. به همین دلیل در این پژوهش، در هر نمونه، از 12 لایه پارچه $(0/90)_{12}$ شیشه سری E با وزن واحد سطح $150 \text{ (g/m}^2\text{)}$ و یا سری D با وزن واحد سطح $200 \text{ (g/m}^2\text{)}$ و یا ترکیبی از این دو نوع پارچه در کنار هم با درصد برابر (6 لایه شیشه سری E و 6 لایه شیشه سری D) ساخت شرکت هیلتکس¹ هلند، استفاده شده است.

با توجه به تحقیقات انجام شده، بطور معمول برای فاز زمینه ریدوم کامپوزیت از دو نوع رزین پلی‌استر و اپوکسی استفاده شده است. این دو رزین دارای خواص مکانیکی بسیار خوبی است و برای کاربردهای الکترومغناطیسی نیز استفاده می‌شود. رزین پلی‌استر مورد استفاده در این پژوهش رزین پلی‌استر غیر اشباع کبالت خورده ساخت شرکت صنایع شیمیایی بوشهر است که نیاز به افزودن 2 درصد اسید به عنوان کاتالیزور دارد. رزین اپوکسی نیز دارای کد LY5052 به همراه سخت‌کننده HY5052 با درصد ترکیب 100 به 35 و ساخت شرکت هانسن² است. چرخه پخت قطعات ساخته شده با این رزین به صورت هوا پخت³ است به نحوی که پس از ساخت قطعه، یک روز آن را در دمای اتاق (23 درجه سلسیوس) نگه داشته می‌شود و پس از آن به مدت 15 ساعت در دمای 50 درجه در داخل کوره گذاشته تا چرخه پخت کامل شود.

2-2- روش ساخت

روش‌های ساخت ریدوم متناسب با نوع کاربرد آن متفاوت است [13]. در این پژوهش از بین روش‌های ساخت ریدوم، سه روش لایه‌چینی دستی، کیسه خلأ و نفوذ در خلأ⁴ بررسی شده و میزان تأثیر آن‌ها بر روی خواص ریدوم کامپوزیتی، با یکدیگر مقایسه شده است. در روش لایه‌چینی دستی برخلاف دو روش دیگر از پمپ خلأ برای خروج حباب استفاده نمی‌شود در نتیجه حباب بیشتری در داخل قطعه می‌ماند. در روش کیسه خلأ ابتدا رزین اعمال می‌شود و سپس قطعه تحت خلأ قرار می‌گیرد ولی در روش نفوذ در خلأ ابتدا قطعه تحت خلأ قرار می‌گیرد و سپس به واسطه وجود خلأ رزین به داخل قطعه تزریق می‌شود (شکل 2).

3-2- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش یک رویکرد علمی است که با کمک آن به فهم بهتر از یک فرآیند و همچنین تعیین چگونگی تأثیر ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها پرداخته می‌شود. در هر طراحی آزمایش نیاز به تعدادی عامل ورودی در سطح‌های گوناگون است. عامل‌های مدنظر در این پژوهش نوع الیاف، رزین و روش ساخت کامپوزیت است. عامل الیاف از سه سطح شیشه سری E و شیشه سری D و

⁴ Infusion

⁵ Minitab

¹ Hiltex

² Hunstman

³ Cold cure

از هر نمونه، نمودار تنش کرنش یکی از سه نمونه آزمون که مقداری نزدیک به میانگین مقادیر سه نمونه آزمون داشته، در شکل 4 آورده شده است. مقادیر استحکام نهایی و مدول الاستیک در راستای الیاف برای هر یک از نمونه‌ها در جدول 2 آمده است. با توجه به نمودار شکل 4، از میان نمونه‌های مورد آزمون، بیشترین مقدار استحکام کششی برای کامپوزیت شیشه E و اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ (نمونه شماره 2) می‌باشد.

پس از انجام تحلیل در نرم‌افزار مینی‌تب مقادیر سیگنال به نویز هر یک از عوامل در هر سطر برای استحکام کششی مطابق جدول 2 به دست آمد. پس از آنالیز نتایج، مقدار سیگنال به نویز برای سطوح هر یک از عوامل در جدول 3 آمده است.

هرچه مقدار دلتا بیشتر باشد، پراکندگی سطوح عامل بیشتر و در نتیجه تأثیر آن عامل بر روی سیستم بیشتر از سایر عامل‌ها است. با توجه به جدول 3 می‌توان بیان کرد که نوع الیاف بیشترین تأثیر را بر روی استحکام کششی دارد. همچنین مشخص گردید که با ترکیب الیاف شیشه E و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ بالاترین مقدار استحکام کششی (نمونه شماره 2) به مقدار 320.9 (MPa) به دست آمده است.

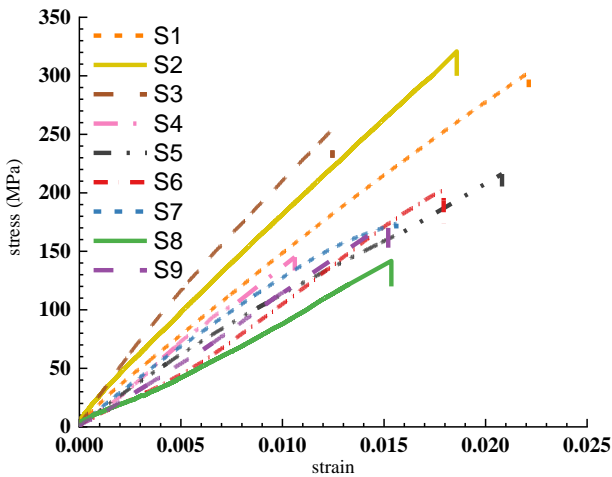


Fig. 4 Stress-Strain diagram

شکل 4 نمودار تنش کرنش

جدول 2 مقادیر استحکام کششی نهایی در راستای الیاف

Table 2 Final tensile strength values in the direction of the fibers

شماره نمونه	استحکام کششی نهایی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	مقادیر سیگنال به نویز استحکام کششی
1	302.9	13.76	49.626
2	320.9	17.26	50.127
3	254.3	21.19	48.107
4	145.09	13.66	43.233
5	216.15	10.38	46.695
6	202.5	11.25	46.129
7	173.5	12.05	44.786
8	141.8	9.23	43.034
9	175.1	11.51	44.866

مربعیات انحرافات¹ استفاده می‌شود و در نهایت با رابطه 3 مقدار سیگنال به نویز را به دست می‌آید.

$$MSD = \frac{[(y_1)^2 + (y_2)^2 + \dots + (y_n)^2]}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}{n} \quad (1)$$

$$MSD = \frac{[\frac{1}{(y_1)^2} + \frac{1}{(y_2)^2} + \dots + \frac{1}{(y_n)^2}]}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(y_i)^2}}{n} \quad (2)$$

$$S/N = -10 \log_{10}(MSD) \quad (3)$$

در این روابط y_i پاسخ i -ام هر یک از آزمایش‌ها و n تعداد تکرار پاسخ در هر آزمایش است. هرچه نسبت S/N بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده نتایج بهتری است زیرا اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از پارامترهای غیر قابل کنترل (نویز) است. در انتها پس از محاسبه سیگنال به نویز پاسخ هر یک از آزمایش‌ها، مقدار میانگین سیگنال به نویز پاسخ برای هر یک از سطوح عامل‌ها، محاسبه می‌شود.

در نهایت با مقایسه مقادیر سیگنال به نویز سطوح هر عامل، بهترین سطح برای آن عامل مشخص و با استفاده از این مقادیر بهترین پاسخ را می‌توان پیش‌بینی نمود. همچنین هرچه اختلاف مقادیر سیگنال به نویز سطوح در یک عامل بیشتر باشد میزان تأثیر آن عامل در پاسخ نهایی بیشتر است.

3- نتایج

3-1- خواص مکانیکی

از جمله مهم‌ترین خواص مکانیکی در یک کامپوزیت، استحکام کششی در راستای الیاف است. در این پژوهش از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D3039 استفاده شده است. بر طبق این استاندارد برای هر قطعه ساخته شده، سه نمونه مجزا به همراه تب‌های فلزی در نظر گرفته شده است که هر نمونه با ابعاد 250 در 25 میلی‌متر مربع، با استفاده از دستگاه آزمون کشش عمودی شرکت سنتام مدل STM-150، آماده شده و در نهایت پس از انجام آزمون کشش، خروجی‌های تنش-کرنش از دستگاه استخراج شده است. در شکل 3، سه نمونه آزمون قبل، حین و بعد از آزمون کشش عمودی آورده شده است.

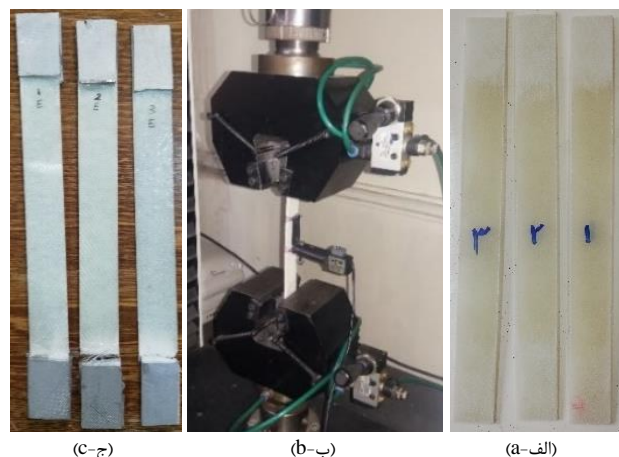


Fig. 3 a) 3 samples prepared for testing, b) Vertical tensile testing machine with sample, c) 3 samples after testing

شکل 3 الف) سه نمونه آزمون آماده شده جهت آزمایش، ب) دستگاه آزمون کشش عمودی همراه با نمونه آزمون، ج) سه نمونه آزمون بعد از آزمایش

2 Noise

1 Mean squared deviation

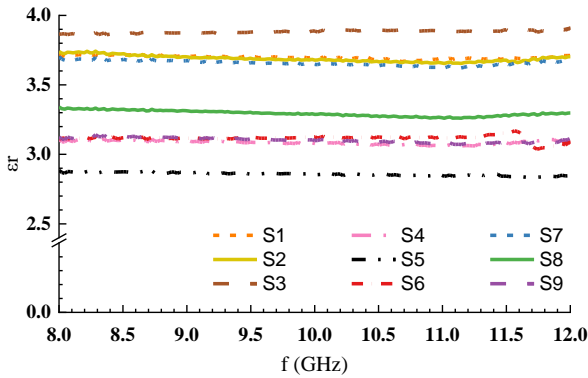


Fig. 5 Dielectric constant at X band

شکل 5 ثابت دی‌الکتریک در باند X

برای ارزیابی، مقایسه نتایج و یافتن حالت بهینه برای خواص الکترو-مغناطیسی از بین فرکانس‌های باند X، فرکانس 10.5 گیگاهرتز به دلیل کاربری بالای این فرکانس در سازه‌های مخابراتی هوایی و دریایی انتخاب شد که در جدول 4 مقدار ثابت دی‌الکتریک مقادیر سیگنال به نویز به دست آمده از نرم‌افزار در این فرکانس آورده شده است.

جدول 4 مقادیر ثابت دی‌الکتریک در فرکانس 10.5 GHz

Table 4 Dielectric constant at 10.5 GHz

شماره نمونه	ثابت دی‌الکتریک در فرکانس	شماره نمونه
-11.341	3.69	1
-11.281	3.665	2
-11.806	3.893	3
-9.737	3.068	4
-9.115	2.856	5
-9.894	3.124	6
-11.217	3.638	7
-10.339	3.271	8
-9.794	3.088	9

پس از انجام مقادیر سیگنال به نویز سطوح هر یک از عوامل و مقدار دلتا برای ثابت دی‌الکتریک در جدول 5 آورده شده است. با توجه به جدول می‌توان نتیجه گرفت که همچنان نوع الیاف بیشترین تأثیر را بر روی ثابت دی‌الکتریک دارد. ترکیب الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ (نمونه شماره 5) کمترین مقدار ثابت دی‌الکتریک (2.85) را در فرکانس 10.5 گیگاهرتز می‌دهد.

جدول 5 نتایج تحلیل سیگنال به نویز ثابت دی‌الکتریک

Table 5 Results of signal-to-noise analysis for Dielectric constant

سطح	الیاف	روش ساخت	رزین
1	-11.476	-10.765	-10.440
2	-9.582	-10.245	-10.627
3	-10.450	-10.498	
دلتا	1.894	0.520	0.187
رتبه	1	2	3

جدول 3 نتایج تحلیل سیگنال به نویز استحکام نهایی

Table 3 Results of signal-to-noise analysis for ultimate strength

سطح	الیاف	روش ساخت	رزین
1	49.29	45.88	47.04
2	45.35	46.62	44.79
3	44.23	46.37	
دلتا	5.06	0.47	2.25
رتبه	1	3	2

2-3- خواص الکترومغناطیسی

از جمله مهم‌ترین پارامترهای الکترومغناطیسی در طراحی یک ریدوم، ثابت دی‌الکتریک آن است. خواص دی‌الکتریک یک ماده عایق به شکل یک کمیت فیزیکی مختلط مطابق رابطه (4) توصیف می‌شود که به ترتیب بخش حقیقی آن (ϵ') بیانگر ذخیره انرژی (که معرف ثابت دی‌الکتریک است) و بخش موهومی آن (ϵ'') بیانگر اتلاف انرژی در ماده است در این رابطه 0ϵ ثابت دی‌الکتریک در خلأ است.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (4)$$

از بین روش‌های محاسبه خواص الکترومغناطیسی، روش خط انتقال دارای خطای کم و دقتی بالا می‌باشد و می‌توان به وسیله آن در تمام باند X مقادیر ثابت دی‌الکتریک را محاسبه کرد. طبق استاندارد D5568 اندازه نمونه‌ها در این روش 22.5 در 10 میلی‌متر مربع است که در داخل دستگاه (شکل 5) قرار می‌گیرد.



Fig. 4 Internal compartment of transmission line test device

شکل 4 محفظه داخلی دستگاه آزمون خط انتقال

با توجه به اهمیت دقت ابعادی نمونه‌های آزمون دی‌الکتریک، جهت تهیه و جدا کردن این نمونه‌ها از قطعه اصلی، روش برشی جت آب¹ به کار گرفته شده است تا از ایجاد هرگونه فضای خالی بین نمونه و محفظه قرارگیری² آن جلوگیری شود.

پس از انجام آزمون بر روی هر یک از نمونه‌ها، مقادیر ثابت دی‌الکتریک آن‌ها در فرکانس 8 تا 12 گیگاهرتز (GHz) (محدوده فرکانسی باند X) به دست می‌آید که در نمودار شکل 5 نشان داده شده است.

همانطور که در نمودار شکل 5 مشاهده می‌شود مقادیر ثابت دی‌الکتریک در بازه 2.8 تا 3.9 متغیر است و کم‌ترین مقدار ثابت دی‌الکتریک برای نمونه شماره 5 (کامپوزیت شیشه E و اپوکسی و روش کیسه خلأ) و بیشترین مقدار برای نمونه شماره 3 (کامپوزیت شیشه E و پلی‌استر و روش نفوذ در خلأ) در بین نمونه‌های موجود به دست آمده است.

² Waveguide

¹ Water jet

3-3- بهینه‌یابی

در رابطه (7) مقدار Δ_{max} برابر با 1 و مقدار Δ_{min} برابر با صفر (به دلیل 1 بودن مقدار هدف) است. λ ضریب تمایز است که بر اساس نیازهای عملی سیستم تنظیم می‌شود و عددی بین صفر و یک می‌باشد. مقدار آن در این مطالعه بصورت هم‌وزن و برابر با 0.5 در نظر گرفته شده است. مقدار GC_{ij} محاسبه شده برای هر یک از پاسخ‌ها در جدول 7 آورده شده است.

جدول 7 مقادیر GC_{ij} خروجی‌ها

Table 7 GC_{ij} values of outputs

شماره نمونه	ثابت دی‌الکتریک	استحکام نهایی
1	0.377	0.876
2	0.383	1.000
3	0.333	0.637
4	0.684	0.340
5	1.000	0.508
6	0.633	0.470
7	0.390	0.399
8	0.524	0.333
9	0.665	0.403

پس از به دست آوردن ضرایب رابطه خاکستری پاسخ هر یک از آزمایش‌ها، مقدار ضریب نهایی G_i برای هر یک از آزمایش‌ها طبق رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$G_i = \frac{1}{m} \sum (\alpha_j \times GC_{ij}) \quad (8)$$

در این معادله α_j برابر است با ضریب تأثیر هر یک از پاسخ‌ها با توجه به میزان اهمیت آن پاسخ نسبت به سایر پاسخ‌ها و m برابر با مجموع ضرایب تأثیر پاسخ‌ها است. با توجه به اینکه کاربری این سازه برای محافظت از آنتن می‌باشد، اهمیت خواص الکترومغناطیسی بیشتر از خواص مکانیکی است. به همین دلیل برای ثابت دی‌الکتریک ضریب تأثیر 4 و برای استحکام نهایی ضریب تأثیر 3 در نظر گرفته شده است. در جدول 8 مقدار G نهایی برای تمامی آزمایش‌ها آورده شده است. همانطور که در جدول (8) مشخص شده است، نمونه شماره 5 (الیاف شیشه سری D، رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ) نمونه بهینه در بین نمونه‌های موجود شده است.

پس از به دست آوردن مقادیر G_i ، آن‌ها را به عنوان پاسخ جدید در نظر گرفته و از آن‌ها به عنوان ورودی نرم‌افزار مینی‌تب استفاده نموده تا سطوح بهینه نهایی هر یک از عامل‌ها به دست آید. مقادیر سیگنال به نویز و مقدار دلنا برای سطح‌های هر عامل، در جدول 9 آورده شده است. در این تحلیل نیز همچون سایر تحلیل‌های خواص مکانیکی و الکترومغناطیسی تأثیر الیاف بر نتیجه نهایی بیشتر از سایر عامل‌ها است.

ترکیب الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ، ترکیب بهینه و ایده‌آلی برای حالت نهایی است. این ترکیب کامپوزیت که با نمونه شماره 5 نیز تطابق دارد و به عنوان حالت بهینه ثابت دی‌الکتریک نیز به دست آمده بود، دارای استحکام کشش 216.15 (MPa) و ثابت دی‌الکتریک 2.85 در فرکانس 10.5 (GHz) است.

با استفاده از روش تاگوچی تنها می‌توان به بهینه‌یابی یک پاسخ پرداخت و سطوح بهینه عامل‌ها را بر اساس میانگین مقادیر سیگنال به نویز تعیین کرد و نمی‌توان مسائل چند پاسخی را مستقیماً با آن بهینه‌یابی کرد. در حالی که در پژوهش حاضر قصد بر این است بیش از یک پاسخ (استحکام کششی و ثابت دی‌الکتریک) بهینه شود و نتیجه نهایی به هر دو پاسخ‌ها وابسته است. رویکرد کلی در حل این مشکل ترکیب چند پاسخ در یک پاسخ و سپس دستیابی به سطوح بهینه است. برای حل مسئله کنونی از روش تحلیل رابطه خاکستری¹ استفاده شده است. مراحل تحلیل رابطه خاکستری شامل: 1- ایجاد رابطه خاکستری 2- نرمالیزه کردن 3- محاسبه ضریب رابطه خاکستری می‌شود. در مرحله اول، نیاز است که پاسخ‌ها با استفاده از روابط بیان شده در مراحل قبل به مقادیر سیگنال به نویز تبدیل شوند که در بخش طراحی آزمایش این کار انجام شده و مقادیر آن در جدول‌های 2 و 4 آورده شده است. در مرحله بعد با توجه به هم‌وزن نبودن پاسخ‌ها پس از ایجاد رابطه خاکستری، باید نسبت به نرمال‌سازی آن‌ها اقدام نمود تا امکان ارزیابی و مقایسه از منظر همه پاسخ‌ها فراهم گردد. نرمال‌سازی با استفاده از رابطه (5) صورت می‌گیرد. با عمل نرمال‌سازی کلیه داده‌های مسئله بین صفر و یک قرار می‌گیرند.

$$Z_{ij} = \frac{Y_{ij} - \min(Y_{ij})}{\max(Y_{ij}) - \min(Y_{ij})} \quad (5)$$

در رابطه بالا مقادیر Z_{ij} ، مقادیر نرمال شده و مقادیر Y_{ij} جواب i -امین آزمایش از j -امین پاسخ می‌باشد که عددی بین 0 و 1 است. مقادیر نرمال‌سازی شده در جدول (6) آمده است.

جدول 6 مقادیر نرمال‌سازی شده خروجی‌ها

Table 6 Normalized values of outputs

شماره نمونه	ثابت دی‌الکتریک	استحکام نهایی
1	0.173	0.929
2	0.195	1.000
3	0.000	0.715
4	0.769	0.028
5	1.000	0.516
6	0.710	0.436
7	0.219	0.247
8	0.545	0.000
9	0.748	0.258

در مرحله بعد برای به دست آوردن ضریب رابطه خاکستری ابتدا باید مقادیر نرمال‌سازی شده را به انحراف از هدف² طبق رابطه (6) تغییر داد که به عنوان افت کیفیت نیز بیان می‌شود. این مقدار برابر با اختلاف هر یک از مقادیر Z_{ij} با مقدار هدف 1 (به دلیل اینکه عدد 1 بهترین حالت ممکن است) می‌باشد. پس از مشخص شدن مقادیر انحراف از هدف، ضریب GC_{ij} رابطه خاکستری طبق رابطه (7) محاسبه می‌شود. ضریب رابطه خاکستری برای بیان رابطه بین نتایج آزمایشی ایده‌آل و واقعی بصورت زیر تعریف شده است.

$$A_{ij} = 1 - Z_{ij} \quad (6)$$

$$GC_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \lambda \Delta_{\max}} \quad (7)$$

² Deviation sequence

¹ Grey

جدول 8 مقادیر G نهایی

رتبه	مقدار G	شماره نمونه
3	0.591	1
2	0.647	2
7	0.464	3
6	0.536	4
1	0.789	5
4	0.563	6
9	0.394	7
8	0.442	8
5	0.552	9

جدول 9 نتایج تحلیل سیگنال به نویز مقدار G

Table 9 Results of signal-to-noise analysis for G values

سطح	الیاف	روش ساخت	رزین
1	-5.009	-6.024	-4.772
2	-4.151	-4.307	-6.393
3	-6.778	-5.606	
Delta	2.627	1.717	1.621
رتبه	1	2	3

4- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌های سیگنال به نویز در روش تاگوچی و بهینه‌یابی چندپاسخه الیاف و رزین‌های مورد استفاده در ساخت ریدوم‌های کامپوزیتی GFRP که در این پژوهش استفاده شده، نتایج حاصله به این صورت است که برای استحکام کششی ترکیب الیاف شیشه سری E و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ بالاترین استحکام کششی مقدار 320.9 مگاپاسکال را دارد و برای ثابت دی‌الکتریک الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ با مقدار 2.85 پایین‌ترین ثابت دی‌الکتریک را داشته است. در نهایت با انجام بهینه‌یابی چندپاسخه با روش خاکستری مشخص گردید برای حالتی که پایین‌ترین ثابت دی‌الکتریک و بالاترین استحکام کششی هم‌زمان مدنظر است، پیشنهاد می‌شود که از ترکیب الیاف شیشه سری D، رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ استفاده شود.

5- تقدیر و تشکر

در انتها از زحمات اساتید محترم و کارشناسان کارگاه و آزمایشگاه دانشگاه صنعتی مالک اشتر که ما را در به ثمر رساندن این پژوهش یاری رساندن بسیار سپاس گذاریم.

6- مراجع

- [1] Rašuo, B., "Dielectric modeling of multiphase composites," Vol. 93, pp. 3209–3215, 2011.
- [2] Miracle, D. B., Donaldson, S. L., Henry, S. D., "ASM Handbook Volume 21 Composites," Eighth ed., ASM International Handbook Committee, 2017.
- [3] Blythe, T., and Bloor, D., "Electrical properties of polymers," Vol. 11, No. 3, 2005.
- [4] Sokolov, V. I., Shalgunov, S. I., Gurtovnik, I. G., Mikheeva, L. G., and Simonov-Emel'yanov, I. D., "Dielectric Characteristics of Glass Fibre Reinforced Plastics and Their Components," Int. Polym. Sci. Technol., Vol. 32, No. 7, pp. 62–67, 2004.
- [5] Akram, M., Javed, A., and Rizvi, T. Z., "Dielectric properties of industrial polymer composite materials," Turkish J. Phys., Vol. 29, No. 6, pp. 355–362, 2005.
- [6] Wang, Q., Li, X., Chang, T., Hu, Q., and Yang, X., "Terahertz spectroscopic study of aeronautical composite matrix resins with different dielectric properties," Optik (Stuttg.), Vol. 168, No. 2010, pp. 101–111, 2018.