



## اثر متیل دی فنیل دی ایزوسیانات و پلی پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید بر ریخت‌شناسی و خواص فیزیکی-مکانیکی کامپوزیت‌های چوب پلاستیک بر پایه پلی اتیلن حاوی نانوسیلیکا و نانورس

هادی علی‌یاری بروجنی<sup>1</sup>، بابک نصرتی<sup>2\*</sup>، رحیم محبی گرگری<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی صنایع چوب و فراورده‌های سلولزی، دانشگاه زابل، زابل

2- دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، زابل

3- مربی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، زابل

\* Nosrati.Babak@uoz.ac.ir, 98615- 538 صندوق پستی

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

این تحقیق، با هدف بررسی سازگارکننده متیل دی فنیل دی ایزوسیانات و مالئیک انیدرید پلی پروپیلن بر ریخت‌شناسی و خواص فیزیکی-مکانیکی کامپوزیت چوب پلاستیک حاوی نانوسیلیکا و نانورس، پلی اتیلن پرچگالی، آرد چوب انجام گردید. بدین منظور 3٪ سازگارکننده به همراه ذرات نانو در 3 سطح 0٪، 2٪، 4٪ با دستگاه مخلوط‌کن داخلی مخلوط و با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی نمونه‌های آزمونی تهیه شدند. سپس خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها نظیر جذب آب و واکنشیدگی ضخامت، مدول و استحکام‌های کششی و خمشی و استحکام ضربه بر نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ذرات نانو تأثیر مثبتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی به‌استثنای استحکام به‌ضربه داشته و باعث بهبود آن‌ها شده است. هرچند که حضور نانوسیلیکا منجر به افزایش جذب آب کامپوزیت‌ها شده است. بررسی طیف FTIR و الگوی XRD توزیع نانورس در زمینه پلیمری از نوع بین‌لایه‌ای بوده و در نانوسیلیکا تجمع و انباشتگی ذرات نانو و افزایش ابعاد بلورها در کامپوزیت می‌باشد. نتایج استحکام خمشی، کششی توسط میکروسکوپ الکترونیکی روشی مورد تأیید قرار گرفت.

دریافت: 1402/08/28

پذیرش: 1402/11/16

کلیدواژه‌ها:

متیل دی فنیل دی ایزوسیانات

مالئیک انیدرید پلی پروپیلن

نانوسیلیکا

نانورس

پلی اتیلن پرچگالی

## Effect of methylene diphenyl diisocyanate and maleic anhydride grafted polypropylene on morphology and physical-mechanical properties of polyethylene based wood-plastic composites containing nanosilica and nanoclay

Hadi Aliyari Boroujeni<sup>1</sup>, Babak Nosrati<sup>1\*</sup>, Rahim Mohebbi Gargari<sup>1</sup>

1- Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Zabol, Zabol, Iran

\* P.O.B. 98615- 538, Zabol, Iran, nosrati.babak@uoz.ac.ir

### Keywords

Methylene diphenyl diisocyanate  
Maleic anhydride Polypropylene  
Nano Silica  
Nano Clay  
High density polyethylene/HDPE

### Abstract

This research was conducted with the aim of investigating the compatibilizer of methyl diphenyl diisocyanate and maleic anhydride polypropylene on the morphology and physical-mechanical properties of wood-plastic composite containing nanosilica and nanoclay, high density polyethylene, wood flour. For this purpose, 3% compatibilizer along with nano particles at 3 levels of 0%, 2%, 4% were mixed with an internal mixer and test samples were prepared using the injection molding method. Then, the physical and mechanical properties of the samples such as water absorption and thickness swelling, modulus and tensile and bending resistances and impact resistance were performed on the samples. The results showed that the increase of nano particles had a positive effect on the physical and mechanical properties except impact resistance and improved them. However, the presence of nano-silica has led to an increase in the water absorption of composites. Examining the FTIR spectra and XRD patterns, the distribution of nanoclay in the field of polymer is of interlayer type, and in nanosilica, there is the accumulation of nano particles and the increase in the dimensions of the crystals in the composite. The results of bending and tensile strength were confirmed by scanning electric microscope.

Please cite this article using:

Aliyari Boroujeni, H., Nosrati, B., Mohebbi Gargari, R., "Effect of methylene diphenyl diisocyanate and maleic anhydride grafted polypropylene on morphology and physical-mechanical properties of polyethylene based wood-plastic composites containing nanosilica and nanoclay," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2324-2333, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2015893.1868>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

تولید چوب پلاستیک حدود چند دهه پیش تر قدمت ندارد اما قابلیت جایگزینی این محصول در موارد متعددی از کاربردهای چوب ماسیو<sup>1</sup>، تخته فیبر و تخته لایه، مصرف این کامپوزیتها را گسترده تر کرده است [1]. در ساخت این فراورده محدود و وسیعی از پلیمرها مانند پلی پروپیلن، پلی اتیلن، پلی (وینیل کلراید) و ... همراه با پرکننده های سلولز نظیر آرد چوب و الیاف چوب، مواد لیگنوسولوزی مانند کتان، کنف، بامبو و... مورد استفاده قرار می گیرد [2].

مواد مرکب چوب پلاستیک شامل چوب (از قبیل پودر چوب یا الیاف چوب) به عنوان پرکننده و پلیمر گرانم (از قبیل پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی (وینیل کلراید) به عنوان زمینه است. مواد مرکب چوب پلاستیک خانواده نسبتاً جدیدی از مواد مرکب هستند. پرکننده های طبیعی مانند چوب نسبت به پرکننده های مصنوعی دارای قیمت و چگالی کمتری هستند. اخیراً کاربردهای کامپوزیت چوب پلاستیک به دلیل مزایایی از قبیل قابلیت تجدید پذیری، استحکام و سفتی مناسب، چگالی و هزینه پایین، افزایش قابل توجهی پیدا کرده است [3].

اما بایستی توجه داشت که به دلیل قطبی بودن الیاف طبیعی در مقابل ماهیت غیرقطبی بستر پلیمری، اتصالات ایجاد شده ضعیف بوده و خواص استحکامی کامپوزیت حاصل کاهش می یابد. لذا به منظور رفع این مشکل محققان استفاده از سازگارکننده ها را برای بهبود ویژگی های سطحی کامپوزیتها توصیه کرده اند. از جمله این سازگارکننده ها که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است می توان به مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی پروپیلن و متیل دی فنیل دی ایزوسیانات اشاره نمود. عامل سازگارکننده پلی پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید با ایجاد پیوندهای شیمیایی بین دو فاز الیاف طبیعی و بستر پلیمری مانند پلی موجب تقویت اتصالات فصل مشترک بین دو فاز و در نتیجه بهبود ویژگی های کامپوزیت می گردد. در صورتی که سازگارکننده ایزوسیانات از نظر فعل و انفعالات شیمیایی تأثیرات به مراتب کمتری نسبت به مالئیک انیدرید پلی پروپیلن<sup>2</sup> بر خواص کامپوزیت دارد که این امر ممکن است در اثر تقلیل و کاهش تحرک زنجیره های پلیمری بستر باشد. گروه های NCO- در ایزوسیانات به صورت شیمیایی با گروه های هیدروکسیل سلولز و لیگین واکنش داده و موجب تشکیل پیوندهای اورتان می شود [4]. نتایج بررسی اثر استفاده از مالئیک انیدرید تقویت شده با پلی پروپیلن در کامپوزیت چوب پلاستیک توسط شهرکی و همکاران [5] نشان داد که وجود انیدرید مالئیک پلی پروپیلنی نه تنها واکنش شیمیایی داخلی را به وجود می آورد بلکه ممکن است موجب به وجود آمدن اتصالات قوی تر نیز در کامپوزیتها شود [5].

در پژوهشی شاکری و همکاران [6] در نتایج بررسی اثر همزمان جفت کننده های هگزامتیلن دی ایزوسیانات و پلی اتیلن پیوند خورده مالئیک انیدرید بر خواص مکانیکی چندسازه آرد چوب- پلی اتیلن پرچگالی ابراز داشتند که افزودن جفت کننده پلی اتیلن پیوند خورده مالئیک انیدرید به مقدار 4 درصد و جفت کننده ایزوسیانات به مقدار 2 درصد افزایش خواص خمشی و کششی کامپوزیت چوب پلاستیک گردید. همچنین استفاده ترکیبی از جفت کننده ها سبب بهبود خواص کششی، خمشی و به ویژه استحکام ضربه شد. همچنین آزاد و همکاران [7] اثر عامل سازگار کننده پلی پروپیلن جفت شده با مالئیک انیدرید بر ویژگی های فیزیکی و مکانیکی ماده مرکب آرد نی

پلی پروپیلن مورد مطالعه قرار دادند بدین نتیجه رسیدند که افزودن سازگارکننده، به طور سبب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ماده مرکب نی پلی پروپیلن گردید.

استفاده از مالئیک انیدرید تقویت شده با پلی پروپیلن به عنوان سازگارکننده در کامپوزیت توسط محققان مختلفی از جمله حق پناه و همکاران [8]، مورد بررسی قرار گرفته است؛ به طوری که نتایج بررسی ها حاکی از آن است که با افزودن سازگارکننده در ترکیب کامپوزیت، بهبود معنی داری در خواص مکانیکی و فیزیکی ایجاد می شود. علاوه بر سازگارکننده ها که می توانند سبب بهبود ویژگی های کامپوزیتها گردند، امروزه با ورود فناوری نانو در عرصه علم مواد، پلیمرهای تقویت شده با فاز نانو مورد توجه بسیاری از جوامع علمی و صنعتی قرار گرفته است. از دیدگاه صنعتی آنچه باعث جلب توجه بسیاری از صنایع به این موضوع شده، بهبود چشم گیر خواص کامپوزیتها می باشد [3]. از جمله این نانوذرات می توان به ذرات نانورس اشاره کرد که به علت ابعاد خاص و ضریب ظاهری بالا در مقایسه با سایر پرکننده ها، در مقادیر بسیار اندک موجب بهبود خواص کامپوزیتهای پلیمری می شود به عبارتی تأثیر ذرات نانورس بر خصوصیات کامپوزیتها به شکل، اندازه، ضریب ظاهری، نوع، مقدار و کیفیت پراکنده شدن ذرات و چسبندگی آنها در سطح اتصال بستگی دارد [8، 9]. علاوه بر نانوذرات رس، نانوذرات سیلیکا نیز از جمله تقویت کننده های پرمصرف در کامپوزیتهای پلیمری محسوب می شود که متشکل از ذراتی است که دارای شکل گلوله ای بوده و با قطر کمتر از 100 نانومتر به صورت ذرات پودر و یا معلق در محلول قابل انتشار می باشد. این نانوذرات با ابعاد بسیار کوچک و سطح تماس بالا کاربرد فراوانی در صنایع پلیمری و روکش های سطح داشته و به دلیل دارا بودن سختی، مدول و استحکام بالا باعث بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیتها می گردند [10]. به طوری که کامپوزیتهای حاصل از نانوسیلیکا به عنوان یک اهمیت تکنولوژیکی که در صنعت کاربردهای فراوانی دارد، شناخته شده است [11، 12]. این نانوکامپوزیتها توانایی بهبود استحکامها به خصوص استحکام ضربه و کشش را دارا می باشند [13].

حق پناه و همکاران [8] و شهرکی و همکاران [5] در نتایج تحقیقات خود اعلام داشتند که کلیه خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت چوب پلاستیک به استثنای استحکام ضربه، با افزایش مقدار نانورس بهبود یافته است. به نحوی که با افزایش مقدار ذرات نانورس، فاصله بین لایه های سیلیکاتی رس به دلیل نفوذ ماده سازگارکننده به درون لایه ها و بهبود سطح مشترک افزایش می یابد.

هان<sup>3</sup> و همکاران [14] و کرد [9] طی بررسی های خود اظهار داشتند که اضافه کردن ذرات نانورس به کامپوزیت حاصل از الیاف بامبو و پلی اتیلن پرچگالی، مدول الاستیسیته و استحکام های خمشی و کششی را به طور قابل توجهی بهبود می بخشد ولی استحکام ضربه دستخوش کاهش می شود.

اسماعیلی مقدم و همکاران [11] در نتایج بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص نانوکامپوزیت هیبریدی پلی پروپیلن-آرد چوب ابراز داشتند که افزایش ذرات نانوسیلیس تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی داشته و باعث بهبود آنها شده است. ضمن این که با افزایش مقادیر ذرات نانوسیلیس جذب آب در کامپوزیتها افزایش یافته است، در صورتی که این روند در مورد واکنشیدگی ضخامت به صورت کاهش بود.

1 Massio Wood

2 Maleic anhydride grafted- polypropylen

3 Han

پروین زاده گشتی و همکاران [10] با بررسی تأثیرات استفاده از نانوسیلیکا به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار مشخصی نانوسیلیکا مدول و استحکام کششی افزایش می‌یابد. ذرات نانوسیلیکا به عنوان یک عامل هسته‌زا از رشد بلورها عمل کرده و به تبع آن باعث افزایش بلورینگی و استحکام کامپوزیت می‌گردد.

بنابراین با توجه به اهمیت تقویت و افزایش انعطاف‌پذیری فرآورده‌های کامپوزیت چوبی در راستای توسعه پایدار و حفظ منابع طبیعی، جلوگیری از تخریب و آلودگی‌های زیست‌محیطی و کمک به اقتصاد کشور و پاسخ به مجموعه‌ای از سؤالات بنیادی در مورد خواص نانوکامپوزیت‌ها انجام این دست پژوهش‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی میزان اثرگذاری نانوذرات رس و نانوذرات سیلیکا در حضور سازگارکننده‌های متیل دی فنیل دی ایزوسیانات و مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی پروپیلن و دستیابی به بهینه‌ترین خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت چوب پلاستیک حاصل از این مواد است.

**جدول 1** درصد وزنی اجزای تشکیل دهنده ترکیبات مختلف کامپوزیت چوب پلاستیک (تیمارهای مورد مطالعه)

**Table 1** Weight percentage of components of various wood-plastic composites (studied treatments)

شماره تیمار	ماده چوبی (%)	بستر پلیمری (%)	عامل سازگارکننده		نانوذرات	
			MAPP (%)	MDI (%)	نانورس (%)	نانوسیلیکا (%)
1	50	47	3	-	-	-
2	50	45	3	-	2	-
3	50	43	3	-	4	-
4	50	45	3	-	-	2
5	50	43	3	-	-	4
6	50	45	-	3	2	-
7	50	43	-	3	4	-
8	50	45	-	3	-	2
9	50	43	-	3	-	4
10	50	47	-	3	-	-

## 2- مواد و روش‌ها

### 1-1- مواد

در این پژوهش از پلی اتیلن پرچگالی گونه HD-5218 UA با چگالی 0.95 و شاخص جریان مذاب 18 g/10 Min از محصولات شرکت پتروشیمی تبریز به عنوان بستر پلیمری و از آرد چوب نراد با اندازه ابعاد مش 30 به عنوان فاز طبیعی استفاده شد. پلی پروپیلن پیوند خورده مالئیک‌انیدرید تهیه شده از شرکت کیمیا جاوید سیاهان با شاخص جریان مذاب 10 / 60 min ، چگالی 0.902 گرم بر سانتی متر مکعب و متیل دی فنیل دی ایزوسیانات تهیه شده از شرکت مواد مهندسی مکرر با جرم مولکولی 250/25g/mol چگالی 1.23 گرم بر سانتی متر مکعب نام تجاری DESMODUR به عنوان سازگارکننده مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از ذرات نانورس، مونت موریلونیت (Sigma Aldrich K10) با اندازه ذرات 1-2 nm ، چگالی 0.7 gr/ cm<sup>3</sup> و ذرات نانوسیلیکا از نوع رسوبی، محصول شرکت آمریکایی US Research Nano با اندازه ذرات 20-30 nm چگالی 2.4 gr/ cm<sup>3</sup>، گونه KH 570- Silane coated به عنوان تقویت کننده استفاده گردید.

### 2-2- روش‌ها

#### 1-2-2- فرایند اختلاط و ساخت نمونه‌های آزمونی

فرایند اختلاط مواد مطابق با جدول 1 انجام شد. برای اختلاط بهتر و همگن در آغاز آرد چوب، پلی اتیلن پرچگالی، نانو (رس، سیلیکا) و سازگارکننده‌های (پلی پروپیلن پیوند خورده مالئیک‌انیدرید، متیل دی فنیل دی ایزوسیانات) به کمک مخلوط‌کن آزمایشگاهی با سرعت 1500 rpm و به مدت 20 دقیقه با هم مخلوط شدند. سپس وارد دستگاه مخلوط‌کن داخلی دو مار دونه ناهم‌سورگد شرکت Brabender که دمای اکسترودر در ابتدایی ترین قسمت بعد از محفظه ورودی دستگاه 140 درجه سانتی-گراد، در قسمت میانی 150 و در قسمت پایانی دستگاه به 160 درجه سانتی‌گراد می‌رسید. همچنین سرعت دورانی مارپیچ دستگاه اکسترودر 70 rpm و سرعت خروج مواد از دستگاه 2 m/min می‌باشد. مواد داغ شکل‌پذیر به دست آمده از فرایند اختلاط، پس از خارج شدن از مخلوط‌کن داخلی جمع‌آوری و پس از سرد شدن به منظور تهیه گرانول از دستگاه خردکن نیمه‌صنعتی ساخت شرکت Wieser مدل WG-LS



**Fig1** Standard test samples

شکل 1 نمونه‌های آزمونی استاندارد

## 2-2- اندازه گیری خواص فیزیکی و مکانیکی

استحکام و مدول کشسانی خمشی مطابق با استاندارد ASTM- D790 و با سرعت بارگذاری 2 mm/min و استحکام و مدول کشسانی کشش مطابق با استاندارد ASTM- D638 و با سرعت بارگذاری 5 mm/min بر نمونه ها انجام شد. برای این منظور از دستگاه HOUNS با مدل H 25 KS با ظرفیت سلول 25000 نیوتن استفاده شد. همچنین استحکام ضربه فافدار با استفاده از دستگاه Santam- sit- 20 D با ظرفیت 20 ژول طبق استاندارد ASTM- D256 اندازه گیری گردید. آزمون های فیزیکی نیز شامل جذب آب و واکنشیدگی ضخامت مطابق با آیین نامه ASTM- D7031- 04 انجام و در نهایت مقدار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت با استفاده از روابط ریاضی محاسبه شدند.

## 2-3- ریخت شناسی

## 2-3-1- طیف سنج پراش اشعه ایکس (XRD)

جهت بررسی ریخت شناسی و اطمینان از تشکیل توده بلور در نانوکامپوزیت های ساخته شده از آزمون تفرق اشعه ایکس استفاده گردید. در این تحقیق از دستگاه XRD با تشعشع لامپ CuKa تحت ولتاژ 35 KV و جریان 25MA با تیوب آهن با طول موج 1.54 آنگسترم و اندازه گام 0.02 درجه بر ثانیه و زاویه تابش برای نانورس در دامنه 7-0 و برای نانوسیلیکا بالای 20 درجه استفاده گردید.

## 2-3-2- طیفسنجی مادون قرمز (FTIR)

جهت بررسی نحوه عملکرد پلی پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید و متیل دی فنیل دی ایزوسیانات به عنوان جفت کننده در ساخت کامپوزیت های چوب پلاستیک از دستگاه طیفسنجی مادون قرمز تبدیل فوریه BRUKER، مدل TENSOR27 استفاده گردید. برای این منظور ابتدا قسمتی از خرده های گرانول تهیه شده پس از انجام مخلوط سازی توسط دستگاه اکسترودر با ماده برمیدپتاسیم مخلوط و به وسیله پرس دستی فشرده شد. سپس جهت تجزیه و تحلیل طیفسنجی از طریق شدت طیف و جذب در نواحی مختلف دیسک تولید شده در داخل سلول دستگاه تحت تابش اشعه مادون قرمز در دامنه  $4000-500 \text{ cm}^{-1}$  قرار گرفت.

## 2-3-3- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

به منظور بررسی دقیق تر مورفولوژی سطوح شکست و ناحیه بینابینی پلیمری و پرکننده ها و همچنین نحوه پراکنش و توزیع ذرات نانوسیلیکا و نانورس در بستر پلیمری، تصاویری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه گردید. در این روش از سطح شکست نمونه های آزمون خمش، مقطع گیری شد و مقاطع به دلیل جلوگیری از پدیده بار ساکن توسط لایه نازکی از طلا پوشیده شدند. مدل این دستگاه EM3200، از نوع KYKY با ولتاژ 25 کیلووات و بزرگ نمایی 0-75000 برابر است.

## 2-4- آنالیز آماری داده ها

داده های این بررسی توسط نرم افزار SPSS با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی متعادل تجزیه و تحلیل شد و در صورت معنی داری تیمارها در سطح اطمینان 95 درصد، اختلاف بین میانگین ها با استفاده از روش آزمون چند دامنه دانکن بررسی گردید.

## 3- نتایج و بحث

## 3-1- مدول و استحکام های خمشی و کششی

مقایسه بین تیمارهای مختلف در شکل 2 تا 5 نشان می دهد استفاده از 3 درصد

سازگارکننده مالئیک انیدرید پلی پروپیلن، موجب افزایش مدول و استحکام خمشی، کششی می شود همچنین اضافه کردن نانورس تا 4 درصد مدول، استحکام خمشی و کششی کامپوزیت را افزایش داد. کامپوزیت ساخته شده با 3 درصد سازگارکننده مالئیک انیدرید و نانوسیلیکا از 0 به 2 درصد مدول، استحکام خمشی و کششی افزایش و از 2 به 4 درصد افزایش نانوسیلیکا موجب کاهش مدول، استحکام خمشی و کششی شد. سازگارکننده مالئیک انیدرید پلی پروپیلن، سبب افزایش بیشتری در استحکام خمشی و کششی نسبت به سازگارکننده متیل دی فنیل دی ایزوسیانات<sup>1</sup> شده است. این موضوع را این گونه می توان بحث کرد که عوامل سازگار کننده عمدتاً دارای گروه های دو یا چند عاملی بوده که با فعالیت و واکنش قوی داخلی گروه های قطبی الیاف سلولزی به شکلی از اتصال های کووالانسی و هیدروژنی قرار می گیرند. در این میان مالئیک انیدرید پیوندخورده با پلی پروپیلن دارای گروه های عاملی (O=C(O)COO<sub>2</sub>) دارای یک ترکیب آلفا و بتا غیراشباع کربونیل با یک اتصال دوگانه کربن- کربن و دو گروه کربوکسیل می باشند. این ساختمان دارای پیوندهای دوگانه ای هستند که به طور فزاینده ای قابلیت واکنش اتصال دوگانه کربن- کربن را روی بستر پلیمر در تمام پیوندهای تحت تاثیر رادیکال های شروع کننده افزایش می دهد. زنجیره مالئیک انیدرید بسیار کوتاه تر از بستر پلیمر و الیاف سلولزی می باشد ولی در واکنش قادر به ایجاد اتصال قوی می باشد. اتصال های استری میان پلیمر مالئیکی و گروه هیدروکسیلی سلولز چسبندگی مناسب میان الیاف و بستر را به وجود آورده که باعث افزایش مدول و استحکام های خمشی و کششی می گردد [15]. از طرفی دیگر دلیل استحکام پایین کامپوزیت حاوی متیل دی فنیل دی ایزوسیانات نسبت به کامپوزیت حاوی مالئیک انیدرید پلی پروپیلن این است که سازگارکننده متیل دی فنیل دی ایزوسیانات برخلاف مالئیک انیدرید پلی پروپیلن به جای فعل و انفعالات شیمیایی و اندروالس میان ساختارهای غیرقطبی، پیوندها و اتصالات مکانیکی بین اجزا را تقویت می کند از این رو می توان نتیجه گرفت که جفت کننده متیل دی فنیل دی ایزوسیانات از نظر فعل و انفعالات شیمیایی تأثیر قابل توجهی بر خواص کامپوزیت ندارد که این امر ممکن است در اثر تقلیل و کاهش تحرک زنجیره های پلیمر بستر باشد [4].

همچنین همان طور که در شکل 2 تا 5 مشاهده می شود افزایش مقدار نانورس و وجود مورفولوژی بین لایه و لایه لایه ای در نانوکامپوزیت به دلیل تأثیر بین سطحی زنجیره های آلی و ذرات نانورس و نیز جهت یافتگی ذرات سیلیکات لایه ای موجب افزایش مدول و استحکام های خمشی و کششی در نانوکامپوزیت شده است [16] همچنین غیرهمگونی و نسبت بالای سطح به حجم نانورس با مواد آلی در قابلیت تقویت کنندگی بالای ذرات نانورس سهیم است، و به این صورت عمل می شود که ذرات نانورس به عنوان تقویت کننده موجب می شوند سطح مشترک بین دو فاز افزایش یابد [12] از طرفی با افزودن نانورس در نتیجه تورم لایه های رس و ایجاد چسبندگی قوی بین پلیمر و خاک رس، مدول و استحکام های خمشی و کششی کامپوزیت افزایش می یابد [17] بنابراین با افزایش مقدار نانورس از 0 تا 4 درصد مدول و استحکام های کششی و خمشی کامپوزیت افزایش می یابد [14].

با افزایش میزان نانوسیلیکا نیز از 0 به 2 درصد مدول و استحکام های خمشی و کششی نانوکامپوزیت افزایش یافته، ولی با افزایش این نانوذرات از 2 تا 4 درصد مقدار این مدول و استحکام ها کاهش یافته است. از این رو افزایش مدول و استحکام ها تا سطح 2 درصد نانوسیلیکا دو مکانیسم وجود دارد:

<sup>1</sup> Methylene diphenyl diisocyanate

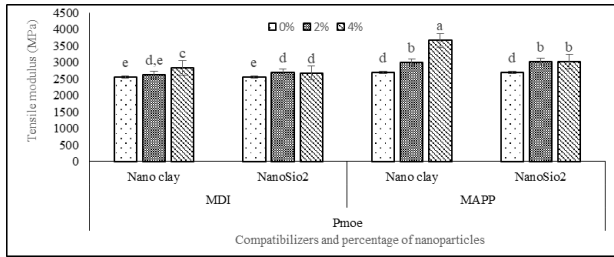


Fig 5 The mutual effect of compatibilizers and the amount of nano particles on the tensile modulus

شکل 5 تاثیر متقابل سازگارکننده‌ها و مقادیر ذرات نانو بر مدول کششی

### 3-2- استحکام ضربه فاق دار

همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود استفاده 3 درصد سازگارکننده مالئیک انیدرید پلی‌پروپیلن، استحکام ضربه فاق دار بیشتری نسبت به سازگارکننده متیل دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات داد، همچنین اضافه کردن نانورس و نانوسیلیکا از 0 به 4 درصد موجب کاهش استحکام ضربه فاق شد.

یکی از دلایل افزایش استحکام ضربه در نمونه‌های دارای سازگارکننده و فاقد ذرات نانورس را می‌توان به بهبود چسبندگی بین پلی‌پروپیلن و الیاف چوب نسبت داد. ولی مقایسه بین تیمارهای مختلف در شکل 6 نشان می‌دهد که استفاده از سازگارکننده مالئیک انیدرید پیوندخورده با پلی‌پروپیلن سبب افزایش بیش‌تری در استحکام ضربه نسبت به سازگارکننده ایزوسیانات شده است. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان بحث کرد که جفت‌کننده متیل دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات برخلاف مالئیک انیدرید پلی‌پروپیلن به‌جای فعل و انفعالات شیمیایی و اندروالس میان ساختارهای غیرقطبی، پیوندها و اتصالات مکانیکی بین اجزا را تقویت می‌کند از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که جفت‌کننده متیل دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات از نظر فعل و انفعالات شیمیایی تأثیر قابل‌توجهی بر خواص کامپوزیت ندارد که این امر ممکن است در اثر تقلیل و کاهش تحرک زنجیره‌های پلیمر بستر باشد [4]. NCO در ایزوسیانات به‌صورت شیمیایی با گروه OH سولولز و همچنین لیگین واکنش نشان داده و موجب تشکیل پیوند اورتان می‌شود. از طرفی دیگر برخلاف دیگر استحکام‌های مکانیکی افزودن ذرات نانورس و نانوسیلیکا سبب کاهش استحکام ضربه می‌گردد. کاهش این استحکام را در نمونه‌های دارای ذرات نانورس می‌توان به ساختار بلورین، مقدار پراکنش ذرات نانورس و نحوه اتصال آن‌ها با پلیمر در سطح اتصال تجمع توده‌های نانورس نسبت دادند. به‌طوری‌که تجمع و تراکم توده‌های نانورس در تشکیل مناطق با تمرکز تنش بالا از یک‌طرف و عدم تشکیل ساختار ورقه‌ای از طرف دیگر از جمله دلایل کاهش استحکام ضربه بدون فاق کامپوزیت‌ها می‌باشد. همچنین حضور نانوذرات رس انرژی جذب شده توسط کامپوزیت را افزایش می‌دهد، از این‌رو افزایش مقدار نانورس مناطقی را در بستر پلیمری به‌وجود می‌آورد که موجب تمرکز بیش‌تر تنش شده و رشد ترک را از آن ناحیه آغاز می‌کند [20]. در خصوص نانوذرات سیلیکا نیز بروز پدیده کلوخینگی سیلیکاتی می‌تواند به کاهش استحکام ضربه گردد. نانوسیلیکا کلوخ‌های بزرگی در کامپوزیت به‌وجود می‌آورد که پراکنش ذرات آن در بستر همگن نیست و نانوسیلیکا تنها نقش ناهمگنی را بازی می‌کند [21]. به‌نحوی‌که موجب کاهش خاصیت ترک‌ندگی پلیمر در اثر استفاده از مقادیر بالای نانوسیلیکا می‌گردد که منجر به اتصال نامناسب الیاف لیگنوسولولزی و بستر می‌شود [11].

مکانیسم اول مرتبط با این موضوع است که نانوسیلیکا از طریق تحمل تنش، تنش بین الیاف و بستر را بالا می‌برد [18]. مکانیسم دوم نیز بر این موضوع دلالت دارد که ذرات نانوسیلیکا به‌عنوان عامل هسته‌گذار در رشد بلورها عمل می‌کنند از این‌رو در اثر ورود این نانوذرات تعداد بلورها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر نانوذرات سیلیکا به‌علت انرژی سطحی زیاد، تمایل به تجمع و جذب یکدیگر به‌علت وجود گروه‌های آب دوست هیدروکسیل و نیروهای جاذبه سیلیس را دارند. این گروه‌ها می‌توانند با ایجاد پیوند هیدروژنی باعث ایجاد تجمع در سطح پلیمر شوند. از این‌رو کاهش مدول و استحکام‌های خمشی و کششی در اثر استفاده از 4 درصد نانوسیلیکا، به‌دلیل تجمع ذرات نانو و پراکنش نایک‌نواخت آن‌ها و ایجاد پدیده کلوخینگی ذرات در بستر نانوکامپوزیت می‌باشد [10]. موضوع دیگر مربوط به کاهش خاصیت ترشوندگی پلیمر در اثر استفاده از مقادیر بالای نانوسیلیکا است که منجر به اتصال نامناسب الیاف لیگنوسولولزی و بستر می‌شود [18]. از این‌رو می‌توان افزایش مدول و استحکام‌های خمشی و کششی نانوکامپوزیت در هنگام استفاده از 2 درصد نانوسیلیکا را به توزیع مناسب این ذرات در بستر پلیمر و همچنین کاهش تحرک زنجیره‌های پلیمر و به تبع آن کاهش تغییر طول نسبی نمونه‌ها مرتبط دانست. از طرف دیگر کاهش این خواص در مقادیر بالاتر نانوسیلیکا مربوط به انباشتگی و تجمع نانوذرات در کامپوزیت می‌باشد [19].

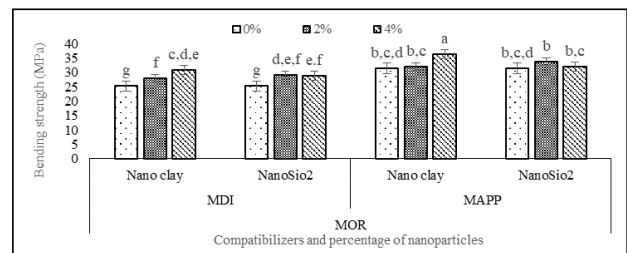


Fig 2 The mutual effect of compatibilizers and the amount of nano particles on flexural strength

شکل 2 تاثیر متقابل سازگارکننده‌ها و مقادیر ذرات نانو بر استحکام خمشی

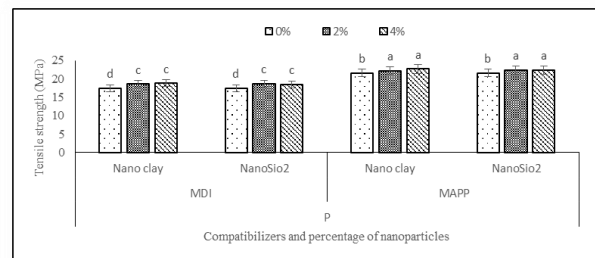


Fig 3 The mutual effect of compatibilizers and the amount of nano particles on tensile strength

شکل 3 تاثیر متقابل سازگارکننده‌ها و مقادیر ذرات نانو بر استحکام کششی

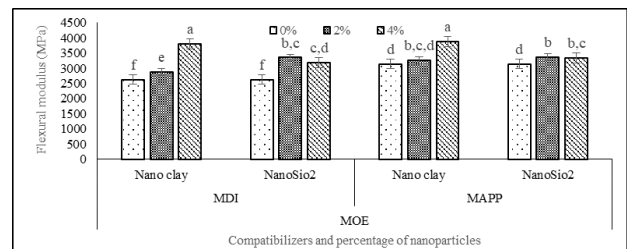


Fig 4 The mutual influence of compatibilizers and the amount of nano particles on the flexural modulus

شکل 4 تاثیر متقابل سازگارکننده‌ها و مقادیر ذرات نانو بر مدول خمشی

انیدرید داشته است. دلیل این امر این است که سازگارکننده ایزوسیانات باعث پوشش فضاهای خالی و سطح الیاف که دارای عوامل قطبی هستند، شده و در نتیجه از میزان جذب آب و در نتیجه واکنشیدگی ضخامت کامپوزیت کاسته شده است. همچنین واکنش گروه های هیدروکسیل سطح الیاف با گروه های -NCO سازگارکننده، باعث کاهش گروه های هیدروکسیل و کاهش آب دوستی سطح الیاف و کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت می شود [26]. همچنین گروه های عاملی ایزوسیانات با تشکیل پلی اوره در دمای بالا، با آب موجود در چوب واکنش داده و پوشش مناسبی روی ذرات چوب ایجاد کرده و با کاهش تعداد گروه های عاملی سبب می شود که کامپوزیت مقاومت بالایی نسبت به جذب آب و واکنشیدگی ضخامت داشته باشد. اتصال مناسب چسب ایزوسیانات با مواد معدنی از واکنش پذیری بسیار بالای گروه ایزوسیانات ناشی می شود. به طور کلی دو واکنش مهم ایزوسیانات ها یعنی واکنش با گروه های هیدروکسیل چوب و واکنش با آب به عملکرد این سازگارکننده در بهبود خواص فیزیکی کامپوزیت کمک می کند [27]. این در حالی است که سازگارکننده مالئیک انیدرید صرفاً با افزایش پیوندهای استری بین گروه های هیدروکسیل آزاد الیاف چوب و بخش انیدرید سازگارکننده مالئیک انیدرید پلی پروپیلن باعث بلوکه شدن گروه های هیدروکسیل و کاهش میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در کامپوزیت می شود [28].

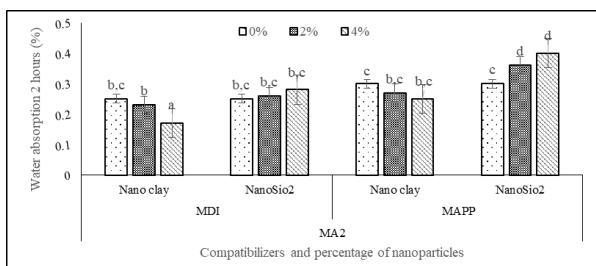


Fig 7 The mutual effect of compatibilizers and the amounts of nano particles on water absorption for 2 hours

شکل 7 تاثیر متقابل سازگارکننده ها و مقادیر ذرات نانو بر جذب آب 2 ساعت

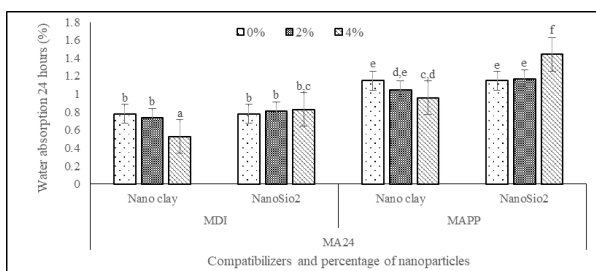


Fig 8 The mutual effect of compatibilizers and the amounts of nano particles on water absorption for 24 hours

شکل 8 تاثیر متقابل سازگارکننده ها و مقادیر ذرات نانو بر جذب آب 24 ساعت

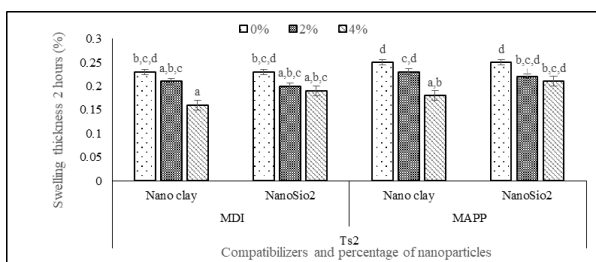


Fig 9 The mutual effect of compatibilizers and the amount of nanoparticles on the swelling of the thickness of 2 hours

شکل 9 تاثیر متقابل سازگارکننده های و مقادیر ذرات نانو بر واکنشیدگی ضخامت 2 ساعت

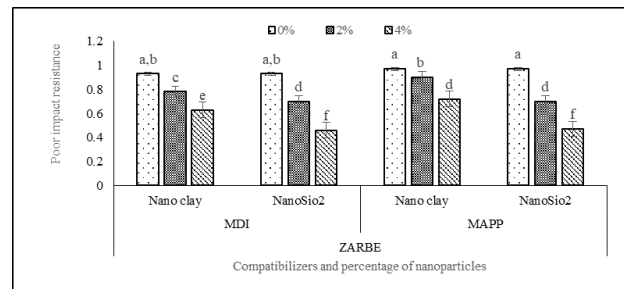


Fig 6 The mutual effect of compatibilizers and the amount of nano particles on the resistance to cleft impact

شکل 6 تاثیر متقابل سازگارکننده ها و مقادیر ذرات نانو بر استحکام ضربه فاق دار

### 3-3- جذب آب و واکنشیدگی ضخامت کوتاه مدت

همان طور که در شکل 7 تا 10 مشاهده می شود با افزایش مقدار نانوساز از 0 تا 4 درصد خواص جذب آب و واکنشیدگی ضخامت کامپوزیت بهبود یافته است ولی با افزایش نانوسیلیکا از 0 تا 4 درصد جذب آب افزایش و واکنشیدگی ضخامت کامپوزیت بهبود یافته است.

دلیل بهبود خواص فیزیکی حاوی ذرات نانوساز را می توان به طبیعت آب گریز سطح رس، ضریب لاغری بالا و همچنین خاصیت هسته زایی ذرات نانوساز نسبت داد که موجب تشکیل ساختار بلوری در کامپوزیت می گردند و این مسأله نیز خود به بهبود روند جذب آب و واکنشیدگی ضخامت کمک می کند [22]. همچنین ذرات نانوساز به واسطه اندازه کوچک خود، فواصل و شکاف های ریز بین الیاف و پلیمر و همچنین حفرات سلولی را پر نموده و مانع نفوذ آب در مواد کامپوزیت می شوند. به همین دلیل با افزایش مقدار نانوساز جذب آب و واکنشیدگی ضخامت کامپوزیت بهبود یافته است [3] که با نتایج بدست آمده توسط ضیایی، طبری و همکاران [23] مطابقت دارد. با افزایش مقدار نانوساز به تدریج فاصله بین لایه های سیلیکاتی رس کاهش یافته و پدیده کلوخه شدن اتفاق می افتد که این امر موجب درهم رفتگی و تشکیل مسیرهای طولانی تر برای عبور مولکول های آب و تعویق پدیده انتشار می شود [9].

از طرفی دیگر ذرات نانوسیلیکا با اندازه بسیار کوچک و سطح تماس زیاد دارای سه گروه شیمیایی هیدروکسی، هیدروژن متصل به گروه های هیدروکسی و گروه های سیلوکسان آب دوست می باشد [24]. بنابراین زمانی که نمونه ها در معرض آب قرار می گیرند، نانوذرات سیلیکا با سطوح جانبی فوق العاده زیاد مولکول های آب را جذب می کنند. لذا افزایش درصد جذب آب در هنگام استفاده از نانوسیلیکا را می توان به سطح ویژه بسیار بالای این ذرات و آب دوست بودن سطح آن ها مرتبط دانست. ولی برخلاف انتظار با افزایش میزان نانوسیلیکا از 0 به 4 درصد میزان واکنشیدگی ضخامت کاهش می یابد. البته قابل ذکر است که کاهش واکنشیدگی ضخامت در اثر افزایش نانوسیلیکا از 0 تا 2 درصد معنی دار بوده ولی از 2 تا 4 درصد معنی دار نمی باشد. به هر حال کاهش واکنشیدگی ضخامت در اثر افزایش نانوسیلیکا را این گونه می توان تفسیر کرد نانوسیلیکا سطح آن را با سیلان اصلاح کرده است و این سبب آنگریز شدن این نانوذره می گردد. که با افزایش نانوسیلیکا، اشغال شدن بخشی از فضاهای خالی و لوله های موئین، باعث کاهش شدید این روزه ها شده و دسترسی مولکول های آب را به الیاف لیگنوسولوزی با مشکل مواجه می کند [25]. از این رو افزایش میزان نانوسیلیکا باعث جذب کمتر مولکول های آب توسط الیاف لیگنوسولوزی می شود و در نتیجه واکنشیدگی ضخامت 2 و 24 ساعته کاهش می یابد. نتایج این تحقیق با گزارش های اسماعیلی مقدم و همکاران [11] مطابقت دارد. همچنین با بررسی اشکال مشاهده می شود که سازگارکننده ایزوسیانات تاثیر بیشتری در بهبود خواص فیزیکی کامپوزیت نسبت به سازگارکننده مالئیک

بیش‌تر شده است؛ بنابراین با توجه به نتایج آزمون اشعه ایکس این‌گونه می‌توان استدلال کرد که با افزایش ذرات نانوسیلیکا در کامپوزیت، پیک‌های نمودار از بین نرفته و صرفاً به 02های جلوتر کشیده شده است که نشان از تجمع و انباشتگی ذرات کروی سیلیس و افزایش ابعاد بلورها در کامپوزیت می‌باشد [11]. در نانوکامپوزیت‌های حاوی درصد‌های متفاوت نانوسیلیکا، با افزایش درصد نانوسیلیکا از شدت کریستالی بودن کاسته شد. همچنین مشخص شد که درجه شدت سایر قله‌های کریستالی نیز کاهش یافته است. کاهش در شدت قله‌های کریستالی به بهبود بخش آمورف در مواد مرکب ناشی از افزودن نانوذرات سیلیکا آمورف و آرد چوب نسبت داده شد. همان‌طور که در شکل 12 مشاهده شد پهنا و شدت پیک با افزایش مصرف نانوسیلیکا کاهش می‌یابد، و این موضوع نشان‌دهنده این است که در هنگام استفاده از درصد‌های بالاتر نانوذرات، پدیده کلوخینگی ذرات سیلیس را در پی خواهد داشت. دلیل این امر را می‌توان به تشکیل پیوندهای هیدروژنی ذرات سیلیس، در اثر افزایش فاصله بین لایه‌ها و نزدیک شدن آن‌ها مرتبط دانست [29].

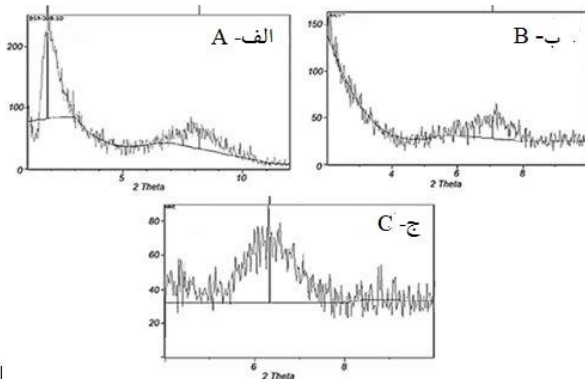


Fig 11 X-ray diffraction spectrum A) pure nanoclay; B) composite containing 2% nanoclay; C) Multistructure containing 4% nanoclay

شکل 11 طیف تفرق اشعه ایکس الف) نانورس خالص؛ ب) کامپوزیت حاوی 2 درصد نانورس؛ ج) کامپوزیت حاوی 4 درصد نانورس

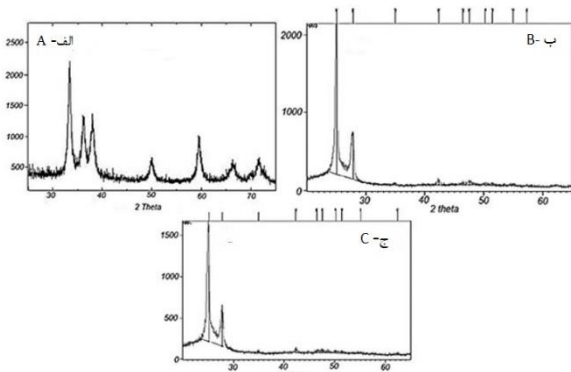


Fig 12 X-ray diffraction spectrum A) pure nanosilica; B) polystructure containing 2% nanosilica; C) Multistructure containing 4% nanosilica

شکل 12 طیف تفرق اشعه ایکس الف) نانوسیلیکا خالص؛ ب) کامپوزیت حاوی 2 درصد نانوسیلیکا؛ ج) کامپوزیت حاوی 4 درصد نانوسیلیکا

### 3-5- طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR)

همان‌طور که در شکل 13 ب-ب (نمونه فاقد سازگارکننده) قابل مشاهده است وجود پیک  $2850 \text{ cm}^{-1}$  و  $2919 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به گروه‌های آلکیل  $\text{CH}_3\text{CH}_2$  چوب و پلیمر می‌باشد. پیک  $2850 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به گروه الکیل متصل به بند

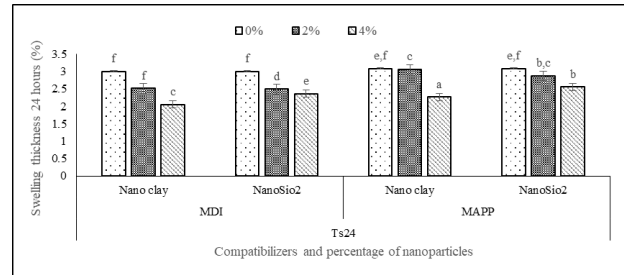


Fig 10 The mutual effect of compatibilizers and the amount of nanoparticles on the swelling of the thickness of 24 hours

شکل 10 تاثیر متقابل سازگارکننده‌ها و مقادیر ذرات نانو بر واکنش‌پذیری ضخامت 24 ساعت

### 3-4- آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD)

پراش اشعه ایکس امکان شناخت نوع ساختار بلور (ساختار لایه لایه‌ای و بین‌لایه‌ای) ذرات نانورس در نانوکامپوزیت‌های پلیمری و چگونگی توزیع خاک رس را در زمینه پلیمری فراهم می‌کند. از کاربردهای بسیار مهم این روش، محاسبه فاصله بین لایه‌ها می‌باشد، که با استفاده از معادله براگ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

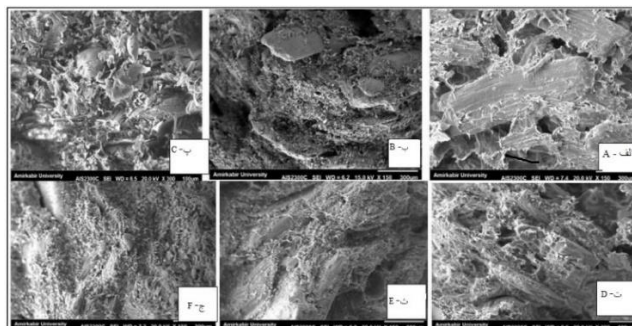
$$d_{00n} = n\lambda \sin\theta$$

در رابطه فوق، n عدد صحیح،  $\theta$  زاویه پراکنش پرتو اشعه و  $\lambda$  طول

موج اشعه می‌باشد [9].

نتایج مربوط به طیف‌سنجی اشعه ایکس نانورس در شکل 11 نشان داده شده است که با افزایش مقدار نانورس از 0 به 4 درصد فاصله بین لایه‌های سیلیکاتی افزایش یافته است. بر اساس این شکل پیک تفرق اشعه X نانورس در زاویه  $\theta_2 = 8.19$  مربوط به فاصله بین‌لایه‌ای XRD در کامپوزیت تغییر کرده و به سمت عقب حرکت می‌کند که مربوط به  $\theta_2 = 6.32$  کاهش یافته و در نتیجه فاصله بین‌لایه‌ای  $d_{001} = 16.38$  (بر طبق معادله براگ) افزایش یافته که این امر موجب جهت‌گیری منظم‌تر و مؤثرتر پلی‌اتیلن پرچگالی در بین لایه‌های سیلیکاتی رس و بهبود سطح مشترک آن با آرد چوب شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار کامپوزیت تشکیل شده از نوع بین‌لایه‌ای می‌باشد، زیرا قله مربوط به ناحیه بلوری نانورس کاملاً از بین نرفته و فقط به سمت عقب و 02های پایین‌تر کاهش یافته است به عبارتی دیگر فاصله بین لایه‌های سیلیکاتی نانورس به دلیل نفوذ زنجیره‌های پلیمری افزایش یافته ولی از هم‌گسیختگی کامل نانورس رخ نداده است. در صورتی که اگر ساختمان نانوکامپوزیت از نوع ساختار لایه لایه‌ای باشد، به دلیل متلاشی شدن ساختار بلوری رس، زاویه پیک تفرق اشعه ایکس کاملاً از بین می‌رفت به عبارت دیگر فاصله بین لایه‌های سیلیکاتی نانورس به دلیل نفوذ ماده سازگارکننده و بهبود سطح مشترک افزایش یافته، ولی از هم‌گسیختگی کامل لایه‌های نانورس رخ نداده است [5]. همچنین نتایج مربوط به طیف‌سنجی اشعه ایکس نانوسیلیکا در شکل 12 نشان داد که با افزودن نانوسیلیکا به کامپوزیت تا 2 درصد، پیک پراش اشعه ایکس در زاویه  $\theta_2 = 25.0316$  ایجاد شده است. همچنین با افزایش ذرات نانوسیلیکا تا 4 درصد، پیک پراش اشعه ایکس در زاویه  $\theta_2 = 25.1128$

همچنین با مقایسه اشکال دارای نانو مشاهده می شود که نمونه های حاوی 4 درصد نانورس و سازگار کننده دارای سطوح یکنواخت تر، پیوستگی الیاف بیشتر و بیرون زدگی و حفرات کم تر می باشد که بیان گر واکنش بهتر و عملکرد بهتر نانورس نسبت به نانوسیلیکا است.



**Fig 14** Scanning electron microscope image: A) Multistructure containing MDI compatibilizing agent and without nano B) Multistructure containing MAPP compatibilizing agent and without nano C) Multiconstruct containing MDI compatibilizing agent and 4% nanoclay D) Multiconstruct containing MDI compatibilizing agent, 4% Nano silica E) Multistructure containing MAPP compatibilizer and 4% nanoclay F) Multistructure containing MAPP compatibilizer, 4% nanosilica

**شکل 14** تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی: الف) کامپوزیت حاوی ماده سازگار کننده MDI و فاقد نانو ب) کامپوزیت حاوی ماده سازگار کننده MAPP و فاقد نانو ج) کامپوزیت حاوی ماده سازگار کننده MDI و 4 درصد نانورس ت) کامپوزیت حاوی ماده سازگار کننده MDI، 4 درصد نانوسیلیکا ث) کامپوزیت حاوی ماده سازگار کننده MAPP و 4 درصد نانورس ج) کامپوزیت حاوی ماده سازگار کننده MAPP، 4 درصد نانوسیلیکا

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر سازگار کننده ایزوسیانات، مالئیک انیدرید پلی پروپیلن و تقویت کننده های نانوسیلیکا، نانورس بر خواص ریخت شناسی و فیزیکی-مکانیکی کامپوزیت چوب پلاستیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نتیجه گیری زیر حاصل شد.

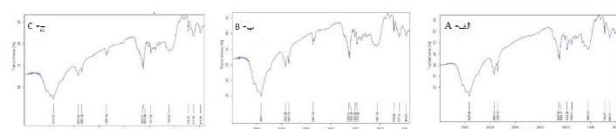
1- سازگار کننده مالئیک انیدرید پلی پروپیلن استحکام و مدول خمشی، کششی و استحکام ضربه فاقدار نسبت به سازگار کننده ایزوسیانات افزایش قابل توجهی یافته است. تصاویر SEM نمونه نیز نتایج حاضر را تأیید می کند. جذب آب و واکنش پذیری ضخامت با افزودن سازگار کننده ایزوسیانات نسبت به سازگار کننده مالئیک انیدرید پلی پروپیلن کاهش یافت.

2- افزایش نانورس تا 4 درصد استحکام و مدول کششی و خمشی، بهبود یافته است. نانوسیلیکا از 0 به 2 درصد استحکام و مدول کششی، خمشی افزایش داده سپس افزایش نانوسیلیکا از 2 به 4 درصد موجب کاهش استحکام و مدول خمشی، کششی می شود. تصاویر SEM نمونه های حاوی نانورس دارای سطوح یکنواخت تر، پیوستگی الیاف بیشتر و بیرون زدگی و حفرات کم تر می باشد که موجب افزایش استحکام کششی و خمشی نسبت به نانوسیلیکا است.

3- افزایش نانورس تا 4 درصد جذب آب و واکنش پذیری ضخامت بهبود یافته و افزایش نانوسیلیکا تا 4 درصد واکنش پذیری ضخامت کاهش و جذب آب افزایش می یابد.

4- افزایش مقدار نانورس و نانوسیلیکا از 0 به 4 درصد سبب کاهش استحکام ضربه فاقدار می گردد.

2 گانه ناخالص اتیلن می باشد که در ناحیه  $3500\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه های آمینی می باشد که این امر به علت شانه دار بودن پیک مربوط به گروه های آمین NH می باشد که با گروه هیدروکسیل فنولی ادغام گردیده است. پیک ناحیه  $1500\text{cm}^{-1}$  تا  $1600\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه بنزنی می باشد. سطوح الیاف سلولزی و انیدرید مالئیک پلیمری به عنوان شاخص واکنش اندازه گیری می شود. همان طور که در (شکل 13 الف- A) (نمونه حاوی سازگار کننده مالئیک انیدرید پلی پروپیلن) قابل مشاهده است، پیک مربوط به ناحیه  $3415\text{cm}^{-1}$  مربوط به 2 گروه کربونیک، مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی پروپیلن و گروه های هیدروکسیل OH می باشد، پیک بالاتر از  $3415\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه آمین موجود در چوب می باشد. پیک ناحیه  $620\text{cm}^{-1}$  و  $717\text{cm}^{-1}$  موجود در مالئیک انیدرید می باشد. پیک ناحیه  $1637\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه CO بند دوگانه می باشد همچنین این پیک علاوه بر حلقه فنولی گروه های استری مالئیک انیدرید هم نشان می دهد. پیک ناحیه  $1400\text{cm}^{-1}$  تا  $1600\text{cm}^{-1}$  مربوط به حضور کربوکسیلات می باشد پیک ناحیه  $1850\text{cm}^{-1}$  تا  $2919\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه آلکیل چوب و پلیمر می باشد [30]. سطوح الیاف سلولزی و ایزوسیانات به عنوان شاخص واکنش اندازه گیری می شود. همان طور که در (شکل 13 ج- C) (نمونه حاوی سازگار کننده متیل دی فنیل دی ایزوسیانات) قابل مشاهده است، پیک ناحیه  $2919\text{cm}^{-1}$  تا  $2850\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه های الکیل چوب و پلیمر می باشد. پیک ناحیه  $3415\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه های هیدروکسیل OH می باشد. در ناحیه  $3415\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه های NH<sub>2</sub> می باشد که به احتمال زیاد از تبدیل گروه های CN که به علت حذف گروه CN در ناحیه  $2200\text{cm}^{-1}$  -  $2300\text{cm}^{-1}$  واکنش گروه های NCO کامل شده و دیگر NCO آزاد وجود ندارد و زنجیره افزاینده کاملاً با ایزوسیانات واکنش داده است [31].



**Fig 13** A) FTIR spectrum of sample containing maleic anhydride compatibilizer grafted with polypropylene B) FTIR spectrum of sample without compatibilizer C) FTIR spectrum of sample containing isocyanate compatibilizer

**شکل 13** الف) طیف FTIR نمونه حاوی سازگار کننده مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی پروپیلن ب) طیف FTIR نمونه فاقد سازگار کننده ج) طیف FTIR نمونه حاوی سازگار کننده ایزوسیانات

#### 3-6- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در مقایسه (شکل 14 الف- A و ب- B)، مشاهده می شود که بستر پلیمری در حضور متیل دی فنیل دی ایزوسیانات (الف- A) دارای فضاهای خالی بیشتری نسبت به بستر پلیمری در مالئیک انیدرید پلی پروپیلن (ب- B) می باشد که نشان دهنده واکنش بهتر بین دو فاز چوب و پلیمر در نمونه های حاوی سازگار کننده مالئیک انیدرید پلی پروپیلن است. این امر به این دلیل است که مالئیک انیدرید پلی پروپیلن به دلیل داشتن گروه های عاملی بیشتر نسبت به متیل دی فنیل دی ایزوسیانات به واسطه ایجاد پیوندهای کووالانسی پلی اولفین ها با پلیمر، ترکیبی همگن تر را ایجاد می کند. این پیوند کووالانسی ناشی از اتصال گروه های هیدروژن سلولز با بخش انیدرید مالئیک انیدرید پلی پروپیلن و در نتیجه تشکیل استرسلولز و یک اسید آزاد است که به زنجیر پلیمر متصل شده است [32].

- Mechanical Properties of Wood-Plastic Nano composites by Microwave Radiation.” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Industries, Vol. 13, No. 3, pp. 261-273, 2022.
- [14] Han, G., Lei, Y., Wu, Q., Kojima, Y., and Suzuki, S., “Bamboo-filled high density polyethylene composites: effect of coupling treatment and Nano clay,” Journal of Polymer Environment, Vol. 16, No. 2, pp. 123- 130, 2008.
- [15] Maldas, D., and Kokta. B.r., “Improving Adhesion of wood fiber with polystyrene by the chemical Treatment of fiber with a coupling Agent and the Influence on the Mechanical properties of composites,” J. Adhes. Sci. Technol, Vol. 3, No. 7, pp. 529- 539, 1989.
- [16] Rahmati, M., and Farajpour Roudsari, A., “Physical and mechanical properties of nano composites obtained by mixing Lanjan rice husk flour, corn starch and nanoclay biopolymer,” In Persian, biannual journal of research on renewable natural resources, Vol. 10, No. 1, pp. 39-52, 2019.
- [17] Asif, A., Roa, L.V., and Ninan, K.N., “Hydroxyl terminated poly (ether ether keton) with pendant methyl group- toughened epoxy ternary nano composites: preparation, morphology and thermomechanical properties,” Journal Applied polymer science, Vol. 106, No. 5, pp. 3793- 3799, 2007.
- [18] Moradi Dehaghi, Sh., Kamali, H., Sooreh, M. R., Sadeghzadeh, H., Shababi, A. d., and Dolo, M., “The effect of adding PP fibers and nanosilica particles on the mechanical properties of epoxy composites,” In Persian, Pik Nur Alam, Vol. 2, No. 1, pp. 60-68, 2011.
- [19] Deka, B. K., Maji, T. K., “Effect of SiO<sub>2</sub> and nanoclay on the properties of wood polymer Nano composite,” Polym. Bull, Vol. 70, No. 2, pp. 403-417, 2012.
- [20] Nourbakhsh, A. V., Kokta, B., ashore, A., and Jahan- Latibari, A., “Effect of a Novel Coupling Agent, Polybutadiene Isocyanate, on Mechanical Properties of wood- Fiber Polypropylene Composites,” Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 27, No. 10, pp. 1679- 1687, 2008.
- [21] Zhang, Z. X., Gao, C., Xin, Z.X., and Kim, J. K., “Effects of extruder parameters and silica on physico-mechanical and foaming properties of PP/wood-fiber composites,” journal homepage, Vol. 43, No. 2, pp. 2047-2057, 2012.
- [22] Kord, B., Hemmasi, A. H., and Ghasemi, I., “Properties of PP/ wood flour/ organomodified montmorillonite nano composites,” Journal of the International Academy of Wood Science, 45(1), pp. 111- 119, 2010.
- [23] Ziaei Tabari, h., Nourbakhsh, A., and Ashore, A., “Effects of nanoclay and coupling agent on the physico- mechanical, Mechanical, Morphological, and thermal properties of Wood flour/ polypropylene composites,” J. poly. Engin. Sci. Vol. 51, No. 2, pp. 272- 277, 2011.
- [24] Xanthos, M., “Functional fillers for plastics. Wiley,” Weinheim, 488, 2005.
- [25] Hosseinzadeh, S., Ghorbani, M., and Biprva, P., “Effect of colloidal silica nanoparticles produced from rice husk on dimensional stability and water absorption of poplar wood (Populus deltoides),” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, Vol. 28, No. 4, pp. 773-763, 2013.
- [26] Rashno, A., Sepidehdam, M.J., Ahmadi, S., Jahan-Latibari, A. and Mohebi, R., 2012. Studies of the effect of isocyanate coupling agent on physical and mechanical properties of HDPE-old cartoon fiber composite,” In Persian, Journal of Applied Researches in Chemistry (JARC), Vol. 6, No. 2, pp. 15-21, 2012.
- [27] Tarmian, A., and Doosthoseini, K., “An Investigation of Practical Properties of Particleboard Produced with Methylene Diphenyl Diisocyanate (MDI),” In Persian, Iranian J. Natural Res, Vol. 58, No. 3, pp. 671-678, 2005.
- [28] Adhkary, K.B., Pang, S., and Staiger, M.P., “Long- term Moisture Absorption and Thickness Swelling Behavior of Recycled Thermoplastics Reinforced with Pinus radiata sawdust,” Journal of Chemical Engineering, Vol. 142, No. 2, pp. 190- 198, 2008.
- 5- نتایج XRD نشان داد که توزیع نانورس در زمینه پلیمری از نوع ساختار بین‌لایه‌ای بوده و با افزایش مقدار ذرات نانورس، فاصله بین‌لایه‌ها افزایش می‌یابد. ذرات نانوسیلیکا تمایل به جذب یکدیگر از طریق پیوندهای هیدروژنی دارند. بنابراین در نانوسیلیکا کروی پدیده کلوخینگی به وجود می‌آید.
- 6- نتایج حاصل از طیف‌سنجی مادون قرمز پیک گروه‌های هیدروکسیل، آمیدی، کربنیل، NCO و صحت سنتز را به خوبی نشان می‌دهد.

## 5- منابع

- [1] Khademi Eslam, H. Yousefnia, Z. Ghasemi, E. and Talaeipoor, T., “Investigating the mechanical properties of wood flour/ polypropylene/ nanoclay composite,” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, Vol. 28, No. 1, pp. 153-168, 2012.
- [2] Yari Firouzabadi, Z. Vaziri, V. Kord, B. and Jamalirad, L., “Investigation of the mechanical-dynamic and thermal properties of nanocomposites manufactured from rapeseed stalk flour/ nanographene and high-density polyethylene,” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Industries 13, No. 4, pp. 445-456, 2023.
- [3] Shahrajabian, H. and Maleki Khorasgani, A., “Investigation of the physical and mechanical properties of Wood plastic composites based on high density polyethylene/ polypropylene/recycled poly (ethylene terephthalate),” In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 127-134, 2018.
- [4] Girones, J., Pimenta, M. T. B., Vilaseca, F., Carvalho, A. J. F., Mutjea, P. and Curvelo, A. A. S., “Blocked diisocyanates as reactive coupling agents: Application to pine fiber- polypropylene composites,” Carbohydrate polymers, Vol. 74, pp. 106- 113, 2008.
- [5] Shahreki, A., Nosrati Sheshkal, B. Mohebbi Gargari, R. and Abdouss, M., “The effect of nano clay and MAPP coupling agent on physical, mechanical and natural durability of polypropylene Haloxylon wood flour composite,” In Persian, Journal of Wood & Forest Science and Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 265-283, 2016.
- [6] Shakeri, A., Safdari, V. R., Rohnia, M. and Nourbakhsh, A., “An analysis of the combined effects of isocyanate HMDI and maleic anhydride (MAPE) coupling agents on the mechanical properties of HDPE- wood flour composite,” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, Vol. 28, NO. 2, pp. 290- 300, 2013.
- [7] Azad, F., Faezipoor, M., and Tajvidi, M., “Effect of compatibilizer, MAPP, on physical and mechanical properties of reed stem flour- polypropylene composites,” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, Vol. 24, NO. 2, pp. 232- 243, 2009.
- [8] Haghpanah, M., “Nosrati Sheshkal, B., and Mohebbi Gargari, R., The effect of using the textile waste fibers and nanoclay particles on physical and mechanical properties of composite made from wood flour/ polypropylene,” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Industries, Vol. 6, No.1, pp. 1-12, 2015.
- [9] Kord, B., “Investigation on The Effects of Nanoclay Particles on Mechanical Properties of Wood Polymer Composites Made of High Density Polyethylene-Wood Flour,” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, Vol. 25, NO. 25, pp. 91-101, 2010.
- [10] Parvinzadeh Gashti, M., Moradian, S., Rashidi, A. S., and Yazdanshenas, M. A., “Effect of Nanosilica Type on Properties of Polyethylene Terephthalane/Silica Nano composite,” In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 25, No. 3, pp. 219-203, 2012.
- [11] Esmaeili Moghadam, S., Shamsian, M., Bayat Kashkoli, A., and Kord, B., 2015. Evaluation of effect of Nano SiO<sub>2</sub> on the physical, mechanical and morphological properties of hybrid Nano composite from polypropylene-wood flour,” In Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, Vol. 30, No. 2, pp. 266-277, 2015.
- [12] Wu, Q., Lei, Y., Clemons, C. M., Yao, F., Xu, Y., and Lian, K., “Properties of Nano composites, Journal of Plastic HDPE/ Clay/ Wood Technology, Vol. 27, No. 2, pp. 108- 155, 2007.
- [13] Amini, A., Farsi, M., Kiaei, M., and Maashi Sani, F. H., “Investigation on the Possibility of Modification of Physical and

- [29] Samariha, A., "Investigating the effect of nano silica and aluminum hydroxide on thermal properties and morphology of nanostructures obtained from waste polyethylene and OCC pulp," The third international research conference in science and nanotechnology, University of Tehran, April, 1- 7, 2023.
- [30] Reusch, W., "Virtual Textbook of Organic Chemistry," Libre Texts, 686, 2016.
- [31] Esmaeeli Aliabadi, A. R., Honarkar, H., Dashtian Gerami, N., and Moosavi Nadoshan S. A., "Synthesis and Investigation of Mechanical Properties of the Castable Elastomeric Polyurea for Anti-explosive Applications," In Persian, Scientific and research magazine of modern defense sciences and technologies, Vol. 9, No. 4, pp. 475-467, 2018.
- [32] Klyosov, A.A., "Wood Plastic Composites," John Wiley and Sons, New Jersey.192-193, 2007.



## ساخت و بررسی خواص مکانیکی مواد مرکب زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف کوتاه کربن به روش متالورژی پودر

علی علیزاده\*<sup>1</sup>، محسن حیدری بنی<sup>2</sup>، محمدرضا زحمتکش<sup>3</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>4</sup>

1- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

2- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

3- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

4- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

\* تهران، صندوق پستی 16846-13114، a\_alizadeh@mut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در این پژوهش به منظور ساخت ماده مرکب زمینه فلزی از الیاف کوتاه کربن به عنوان تقویت کننده با درصدهای حجمی دو، چهار، شش و هشت درصد و پودر آلومینیوم 5083 استفاده شد. از آسیاب کم انرژی برای اختلاط مواد اولیه پودری در زمانهای آسیاب کاری مختلف استفاده گردید. پودرهای مخلوط شده به روش پرس گرم، با فشار 100 مگا پاسکال، دمای 500 درجه سانتی گراد، به مدت یک ساعت و در محیط گاز آرگون تف جوشی شد. به منظور ارزیابی نمونه های تف جوشی شده چگالی و آزمون های مکانیکی از جمله سختی سنجی، آزمون کشش و آزمون خمش سه نقطه ای مورد بررسی و در نهایت مقاطع شکست نمونه های کشش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش ها همراه با نمودار تغییرات، درصد تنش ها و همچنین شکل های میکروسکوپی برای هر یک از نمونه های ساخته شده استخراج گردید. بهترین نتایج برای نمونه ای مرکب با چهار درصد حجمی تقویت کننده با چگالی نسبی 4.98 درصد در زمان اختلاط بهینه ای چهار ساعت، استحکام کششی 28.360 مگا پاسکال، استحکام خمشی 77.423 مگا پاسکال و سختی 6.101 ویکرز با سازوکار شکست بیرون کشیده شدن الیاف و پل زدن ترک از روی الیاف، به دست آمد.

دریافت: 1402/09/05

پذیرش: 1402/11/07

### کلیدواژگان

مواد مرکب زمینه فلزی، الیاف کوتاه کربن، پرس گرم، خواص مکانیکی

## Manufacturing and investigation of mechanical properties of aluminum matrix composite materials reinforced with short carbon fibers using powder metallurgy method

Ali Alizadeh\*<sup>1</sup>, Mohsen Heydari Beni<sup>1</sup>, Mohammad Reza Zahmatkesh<sup>1</sup>, Jafar Eskandari Jam<sup>1</sup>

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, a\_alizadeh@mut.ac.ir

### Keywords

Metal Matrix Composite Materials, Short Carbon Fiber Matrix, Hot Pressing, Mechanical Properties

### Abstract

In this research, short carbon fibers were used as reinforcement with volume percentages of two, four, six and eight percent and aluminum powder 5083 in order to make the metal base composite material. A low-energy mill was used to mix powder raw materials at different milling times. The mixed powders were sintered by hot press method, with a pressure of 100 MPa, a temperature of 500 degrees centigrade, for one hour and in an argon gas environment. In order to evaluate the sintered samples, the density and mechanical tests including hardness test, tensile test and three-point bending test were investigated and finally the fracture sections of the tensile samples were studied. The results of the tests were extracted along with the graph of changes, the percentage of stresses and also the microscopic shapes for each of the manufactured samples. The best results for the composite sample with four volume percent of reinforcement with a relative density of 98.4% at the optimal mixing time of four hours, tensile strength of 360.28 MPa, bending strength of 423.77 MPa and Vickers hardness of 101.6 with the failure mechanism of pulling out fibers and bridges cracking on fibers was obtained.

Please cite this article using:

Alizadeh, A., Heydari Beni, M., Zahmatkesh, M. R., Eskandari Jam, J., "Manufacturing and investigation of mechanical properties of aluminum matrix composite materials reinforced with short carbon fibers using powder metallurgy method." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2334-2347, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2015820.1871>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

شناخت و توسعه مواد جدید با قابلیت‌های بالا، یکی از نیازهای اساسی امروز بشر و از شروط لازم برای پیشرفت تکنولوژی محسوب می‌شود. در همین راستا در حال حاضر مطالعات فراوانی بر روی گسترش مواد جدید انجام می‌پذیرد که از جمله این مواد می‌توان به مواد مرکب اشاره کرد. از جمله مواد مرکب زمینه فلزی که گستره‌ی وسیعی از فلزات و آلیاژها مانند آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم، مس و نیکل را در برمی‌گیرد در این میان یکی از متداول‌ترین مواد مرکب زمینه فلزی، مواد مرکب پایه آلومینیوم و آلیاژهای آن است. علت استفاده از آلیاژهای آلومینیوم، چگالی کم، دمای ذوب نسبتاً پایین، نسبت استحکام به وزن بالا و شکل‌پذیری خوب و مقاومت به خوردگی مناسب عنوان شده است. در بین آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژ A15083 به دلیل مقاومت به خوردگی بالا، به منظور استفاده در شرایط خوردنده بسیار مورد توجه است. پس از ساخت الیاف کربن، این رشته‌ها به دلیل خواص فوق‌العاده‌شان، به عنوان تقویت کننده در ساخت مواد مرکب مورد استفاده قرار گرفتند. این الیاف به علت مزایایی همچون استحکام و مدول ویژه بالا، استحکام خستگی زیاد، ضریب انبساط حرارتی و چگالی پایین و هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، از کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف نظامی، هوافضا، ساختمانی، ورزشی و خودروسازی برخوردار هستند. تنها ایراد وارد بر این الیاف صرف‌نظر از مسئله زیست محیطی، مقاومت پایین آن‌ها در برابر ضربه و خمش است که این معایب با توجه به طریق استفاده‌ی آن‌ها به عنوان تقویت کننده در مواد مرکب به حداقل می‌رسد.

مواد مرکب زمینه فلزی را می‌توان به طرق گوناگون طبقه‌بندی کرد. این مواد مرکب دارای زمینه‌ای از یک فلز و یا آلیاژ فلزی هستند که توسط فاز دوم فلزی و یا سرامیکی تقویت شده است [1]. به منظور رسیدن به خواص مطلوب و موردنیاز، فاز زمینه می‌بایست به اندازه کافی، با الیاف اتصال داشته و همچنین از سطح آن‌ها در مقابل صدمات محافظت کند، به طوری که تنش‌های وارده، در تنش‌هایی به مراتب کمتر از تنش کاری مواد مرکب، به فاز تقویت کننده منتقل شوند [2]. به منظور انتخاب یک روش مهندسی مناسب برای تولید مواد مرکب زمینه فلزی، می‌بایست کمیت و توزیع فاز تقویت کننده (ذرات و الیاف)، آلیاژ زمینه و نیز کاربردهای مواد مرکب را مورد توجه قرار داد [3]. فرایند اصلی ساخت صنعتی مواد مرکب زمینه فلزی را می‌توان به دو دسته فرایند فاز مایع<sup>1</sup> و حالت جامد<sup>2</sup> تقسیم‌بندی کرد. فرایند فاز مایع با اتصال و تماس فاز مایع با فاز دوم و ایجاد فصل مشترک شناخته می‌شود. از این رو در این روش اتصالی محکم و قوی حاصل می‌گردد. اما از طرفی این فرایند ممکن است باعث شکل‌گیری لایه‌های مرزی ترد و شکننده شود. در روش فراوری در حالت جامد، به علت پائین تر بودن دمای فرایند، امکان تشکیل چنین لایه‌هایی بسیار کم است [4]. علاوه بر روش‌های حالت جامد و حالت مایع، دو روش حالت گازی<sup>3</sup> و درجا<sup>4</sup> نیز استفاده می‌شود. البته باید توجه داشت که بعضی از روش‌های تولید فقط مختص یکی از این دسته‌ها نبوده، بلکه وابسته و مشترک بین دو یا چند روش تولید هستند [5]. یکی از روش‌های فراوری مواد مرکب زمینه فلزی روش متالورژی پودر است که برای ساخت مواد مرکب زمینه فلزی با فاز تقویت کننده پیوسته و غیر پیوسته استفاده می‌شود. در این روش معمولاً پودر سرامیک و فلز باهم مخلوط شده و

در دمای پائین به صورت ایزو استاتیک فشرده می‌شوند، سپس توسط پرس گرم تحت فشار قرار گرفته تا به چگالی کامل برسند. قطعه متراکم به دست آمده اغلب تحت عملیات ثانویه از قبیل اکستروژن یا فورج قرار می‌گیرد [1]. روش متالورژی پودر شامل قرار دهی تحت فشار، تف جوشی و روش‌های ثانویه‌ی شکل دهی و متراکم سازی است. روش قرار دهی تحت فشار به دو دسته کلی فشردن سرد و گرم تقسیم‌بندی می‌شوند. این روش‌های فشردن می‌توانند به صورت تک محوری و یا ایزو استاتیک انجام شوند. زمانی که از روش‌های فشردن سرد استفاده می‌شود، پس از پرس قطعه مرکب، می‌بایست آن را تحت عملیات تف جوشی قرار داد تا اتصال مابین ذرات پودری محکم‌تر شود. هنگامی که از روش‌های فشردن گرم استفاده می‌شود، به دلیل تف جوشی هم زمان با فشار، دمای عملیات کاهش می‌یابد. بر این اساس روش‌های فشردن مخلوط پودری در فرایند متالورژی پودر شامل فرایندهای پرس گرم<sup>5</sup>، پرس ایزو استاتیک گرم<sup>6</sup>، پرس سرد<sup>7</sup>، پرس ایزو استاتیک سرد<sup>8</sup> و متراکم سازی از طریق شوک ناشی از انفجار<sup>9</sup> می‌باشند [7، 8، 9]. همان‌طور که اشاره شد، در صورتی که از روش‌های فشردن سرد برای شکل‌دهی مخلوط پودری استفاده شود، می‌بایست پس از عملیات پرس کاری، تف جوشی انجام شود. تف جوشی فرایند اتصال ذرات پودری در دمای بالا است که بدون اعمال فشار انجام می‌شود [10]. در بعضی موارد نیز فرایندهای مختلف تثبیت و متراکم سازی و فرایندهای ثانویه شکل‌دهی باهم ادغام شده و در نتیجه مزیت‌های جدیدی را ایجاد می‌کنند که برای رسیدن به چگالی‌هایی در حد تئوری و یا هم‌راستا و مرتب کردن اجزای فاز تقویت کننده و دستیابی به خواص کنترل‌شده‌ی جهت‌دار<sup>10</sup> کاربرد دارد [11]. در مواد مرکب زمینه فلزی همواره یک شیب پتانسیل شیمیایی در فصل مشترک زمینه-تقویت کننده وجود دارد. این بدین معناست که اگر در شرایطی، دما به قدر کافی بالا یا زمان به اندازه کافی طولانی باشد، نفوذ و یا واکنش‌های شیمیایی بین اجزا رخ می‌دهد. در پیوندهای شیمیایی، اتم و یا موکول توسط فرایندهای نفوذی انتقال می‌یابند. بنابراین در ناحیه‌ی فصل مشترک احتمال تشکیل ترکیب و یا محلول جامد وجود خواهد داشت. این اتفاق باعث تشکیل یک ناحیه فصل مشترکی حاوی یک محلول جامد و یا یک ناحیه واکنشی فصل مشترک زمینه-تقویت کننده می‌شود. در صورتی که فازهای تشکیل شده در ناحیه فصل مشترکی خواص نامطلوبی داشته باشند، بر روی خواص ماده مرکب تولیدی نیز اثر گذاشته و افت خواص آن را به همراه خواهند داشت. واکنش‌های فصل مشترک در مواد مرکب زمینه فلزی در اغلب موارد واکنش‌های مضر هستند که می‌تواند باعث ضعیف شدن پیوند زمینه و تقویت کننده شوند. با توجه به اینکه دمای تف جوشی با فشار گرم کمتر از 500 درجه سانتی‌گراد است، امکان تشکیل فاز ترد در فصل مشترک زمینه-الیاف وجود ندارد، زیرا در مورد آلومینیوم تقویت شده با الیاف کربن در حین فرایند تولید و یا تحت شرایط کاری در دمای بالای 500 درجه سانتی‌گراد فاز  $Al_4C_3$  تشکیل می‌شود.  $Al_4C_3$  فازی ترد است که اثرات مخربی از جمله افت استحکام، مقاومت به ضربه و مقاومت به خوردگی به دنبال خواهد داشت [12]. فرایند تشکیل کاربرد آلومینیوم یک فرایند نفوذی است. بنابراین نیازمند دما و زمان کافی است که با افزایش این دو مؤلفه ضخامت لایه‌ی

6- Hot isostatic pressing (HIP)  
7- Cold pressing  
8- Cold isostatic pressing (CIP)  
9- Explosive Shock Consolidation  
10- Direction-controlled properties

1- Liquid state process  
2- Solid state process  
3- Gas state  
4- In-situ  
5- Hot pressing

با وجود خواص منحصربه‌فرد الیاف کربن، از جمله چگالی پایین، استحکام و مدول بالا، این ماده می‌تواند به عنوان یک تقویت کننده‌ی مناسب در مواد مرکب زمینه آلومینیومی مورد استفاده قرار گیرند و در نتیجه مواد مرکب با نسبت استحکام به وزن بالا حاصل شود.

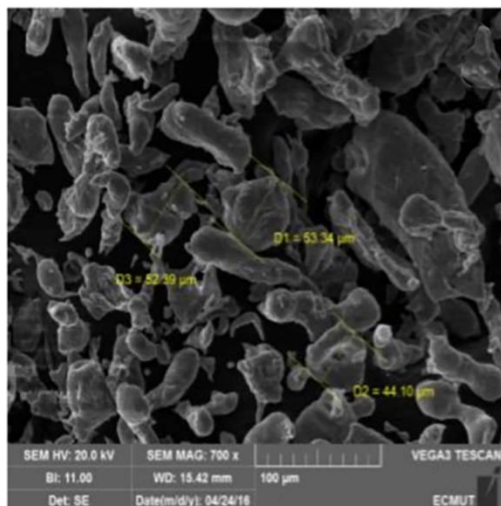
## 2- تعریف مسئله

روش‌های ذوبی به دلیل هزینه‌ی ظاهری تولید پایین‌تر نسبت به روش‌های حالت جامد، بیشتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما استفاده‌ی صنعتی از آن‌ها به دلیل فرایندهای پرهزینه و زمان بری مثل پوشش دهی و ایراداتی چون عدم توزیع یکنواخت الیاف تقویت کننده در زمینه و احتمال بالای آگلومره شدن الیاف و یا آسیب دیدن آن‌ها طی فرایند ریخته‌گری تحت دمای بالا و یا احتمال بالای اکسید شدن الیاف یا پوشش در دمای بالای فرایند، موجب کاهش ضریب اطمینان در تولید انبوه این دسته از مواد مرکب می‌شود و به نوبه‌ی خود مانعی برای توسعه‌ی کاربردی آن‌ها است. در حالی که روش‌های حالت جامد مثل متالورژی پودر علی‌رغم هزینه‌ی تجهیزات بالاتر نسبت به روش‌های ذوبی با حذف مراحل زمان بری مثل پوشش دهی و کاهش احتمال آسیب دیدن الیاف و تشکیل فازهای ناخواسته‌ی مضر مثل کاربید آلومینیوم، به دلیل دمای پایین‌تر فرایند و به تبع مصرف پایین‌تر انرژی و کاهش اتلاف آن می‌تواند آینده‌ی روشن‌تری نسبت به روش‌های ذوبی، به منظور افزایش کاربرد این دسته از مواد در صنایع مختلف داشته باشد.

در ادامه خواص مواد موردنظر و مراحل تحقیق بیان شده است.

## 1-2- خواص مواد

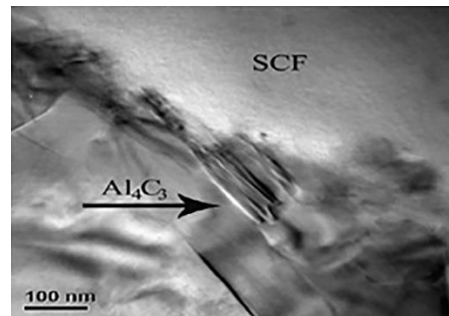
در این پژوهش از پودر آلومینیوم آلیاژی Al5083 به عنوان زمینه‌ی ماده مرکب استفاده شده است که به روش افشانش گازی<sup>5</sup> در متالورژی پودر مشهد ساخته شده بود. پودر مذکور دارای متوسط اندازه ذرات 50 میکرومتر بوده است. مورفولوژی ذرات پودر آلومینیوم 5083 مورد استفاده در این پژوهش در شکل 2 نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی پودر Al5083 استفاده شده در این پژوهش که به روش طیف‌سنجی جذب اتمی تعیین شد، در جدول 1 آمده است.



**Fig. 2** The SEM image of aluminum 5083 powder particles and their average particle size

شکل 2 تصویر SEM ذرات پودر آلومینیوم 5083 و متوسط اندازه ذرات آن

واکنشی افزایش است [13]. شکل 1 حضور فاز  $Al_4C_3$  در فصل مشترک الیاف کربن و زمینه‌ی آلومینیوم را نشان می‌دهد.



**Fig. 1** The aluminum carbide phase in the interface of aluminum and carbon fibers in the composite [13]

شکل 1 فاز کاربید آلومینیوم در فصل مشترک آلومینیوم و الیاف کربن [13]

از پژوهش‌های صورت گرفته بر روی زمینه‌های آلومینیومی تقویت شده با الیاف کوتاه کربنی می‌توان به تغییرات استحکام و سختی ماده مرکب با زمینه آلیاژ آلومینیوم 6061 تقویت شده با الیاف کربنی پوشش داده شده با مس که با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی تولید شده است اشاره کرد [14]. جعفری<sup>1</sup> [15] در پژوهشی به مطالعه‌ی تاثیر درصد الیاف کربنی و پوشش دهی نیکل-فسفر بر استحکام خمشی مواد مرکب  $Al_{2024}-C_f$  تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی پرداخته است. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش درصد الیاف کربن استحکام خمشی نیز افزایش یافته است و این افزایش برای نمونه‌های پوشش دار بیشتر است. باوسینگ<sup>2</sup> و همکارانش [14] تغییرات استحکام ماده مرکب زمینه آلیاژ 6061 تقویت شده با الیاف کربن پوشش داده شده با مس که با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی تولید شده بود را مورد ارزیابی قرار دادند. مشخص شد که مقدار استحکام به مقدار الیاف اضافه شده بستگی دارد. به طوریکه با افزایش الیاف تا 4 درصد وزنی، استحکام کششی و تسلیم افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. دشپانده<sup>3</sup> و همکاران [16] گزارش کردند که خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی ماده مرکب زمینه آلومینیوم 7075 تقویت شده با الیاف کربن تولید شده به روش پرس گرم با افزایش مقدار الیاف کربن کاهش و هدایت حرارتی افزایش قابل توجهی می‌یابد. کومار<sup>4</sup> و همکاران [17] خواص مکانیکی ماده مرکب زمینه آلومینیوم 7075 تقویت شده با الیاف کوتاه پوشش نیکل داده شده به روش الکترولس را بررسی کردند. از نتایج این پژوهش، مشخص شد که روش الکترولس پوششی را ارائه می‌دهد که ضخامت یکنواخت‌تری دارد که ضخامت و مورفولوژی لایه‌های نیکل همواره به شرایط فلزی شدن از نظر زمان، دمای حمام و pH بستگی دارد. اگرچه این یک واکنش شیمیایی کنترل شده است، اما هزینه مواد شیمیایی مورد نیاز برای فرایند بالا است. همچنین استحکام تسلیم، استحکام شکست و سختی این ماده مرکب با افزایش الیاف کوتاه کربن تا 8 درصد وزنی، افزایش می‌یابد.

با توجه به جست‌وجوهای انجام شده پژوهشی در زمینه ساخت و بررسی خواص مکانیکی مواد مرکب زمینه آلومینیوم 5083 تقویت شده با الیاف کوتاه کربن به روش متالورژی پودر یافت نشد. عمده پژوهش‌ها در زمینه مواد مرکب زمینه آلومینیومی مبتنی بر استفاده از تقویت کننده‌های ذره‌ای است.

<sup>4</sup> Kumar

<sup>5</sup> Gas atomization

<sup>1</sup> Jaafari

<sup>2</sup> Bhav Singh

<sup>3</sup> Deshpande

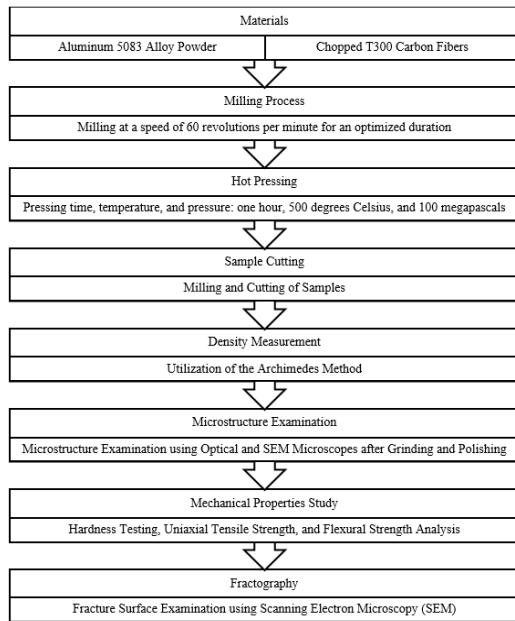


Fig. 4 Research Methodology Stages

شکل 4 مراحل انجام پژوهش

جدول 3 زمان آسیاب کاری نمونه‌ها

Table 3 Milling Time for Work Piece Samples

نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)
نمونه با صفر درصد حجمی تقویت کننده	-
نمونه با دو درصد حجمی تقویت کننده	2
نمونه با چهار درصد حجمی تقویت کننده	4
نمونه با شش درصد حجمی تقویت کننده	10
نمونه با هشت درصد حجمی تقویت کننده	28

## 3-2- فرایند پرس گرم

پس از فرایند آسیاب، به منظور متراکم سازی و تولید نمونه از روش پرس گرم<sup>1</sup> استفاده شد. برای این منظور ابتدا پودرها توسط پرس هیدرولیکی با ظرفیت 100 تن، در ماتریسی استوانه‌ای شکل به قطر نه سانتی‌متر از جنس فولاد گرم کار H13، تحت محیط گاز آرگون، فشرده شدند. زمان، دما و فشار فشردن یک ساعت، 500 درجه‌ی سانتی‌گراد و 100 مگا پاسکال در نظر گرفته شد. با توجه به عدم وجود داده‌های مناسب به منظور پرس گرم ماده مرکب زمینه آلومینیوم 5083 تقویت شده با الیاف کوتاه کربنی، شرایط پرس گرم با ثابت در نظر گرفتن دما و زمان فرایند، در سه فشار 25 و 50 و 100 مگا پاسکال به منظور تولید ماده مرکب با چهار درصد حجمی الیاف تقویت کننده آزمایش شد. تنها نمونه‌ی با فشار 100 مگا پاسکال به چگالی نسبی بالای 95 درصد رسید (به همین دلیل این فشار مورد استفاده قرار گرفت). در بدو شروع فرایند پرس گرم به منظور خروج هر چه بیشتر گازهای موجود بین ذرات پودری و کاهش فاصله نفوذی حین تفجوشی، نمونه‌ها درون قالب در فشار 100 مگا پاسکال در دمای محیط فشرده شدند. برای جلوگیری از اصطکاک پودر با جداره قالب از روان کار مخصوص و دما بالا استفاده شد. نمونه‌های پرس گرم شده دارای قطر 9 سانتی‌متر و ارتفاع 1 سانتی‌متر بودند. در نهایت مواد مرکب زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف کوتاه کربنی با ترکیب‌هایی که در جدول 4 آورده شده است، ساخته شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی پودر Al5083 استفاده شده در این پژوهش

Table 1 The chemical composition of the Al5083 powder used in this case

Zn	Cu	Ti	Fe	Mn	Si	Mg	Cr	Al	عناصر
0.25	0.1	0.15	0.4	0.4	0.7	4.5	0.23		%Wt

تقویت کننده مورد استفاده، الیاف کربن با نام تجاری T300 است که از مهم‌ترین خواص این الیاف می‌توان به استحکام کششی و سختی بالای آن‌ها و از نقاط ضعف این الیاف نیز می‌توان به قیمت بسیار بالا، استحکام برشی ضعیف و شکنندگی نسبتاً بالا اشاره نمود. در شکل 3 تصویر الیاف و در جدول 2 خواص مورد استفاده آن نشان داده شده است. مراحل انجام تحقیق در شکل 4 نشان داده شده است.

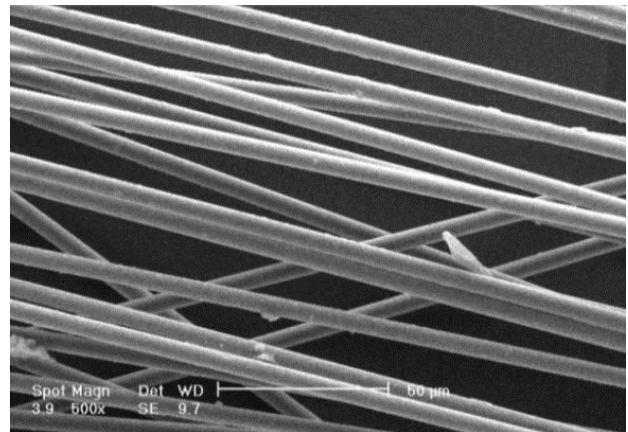


Fig. 3 SEM image of T300 carbon fibers

شکل 3 تصویر SEM از الیاف کربن T300

جدول 2 خواص الیاف کربن T300 مورد استفاده در این پژوهش

Table 2 The properties of T300 carbon fibers utilized in this case

نام تجاری	چگالی gr/cm <sup>3</sup>	قطر μm	افزایش طول %	مدول GPa	استحکام کششی MPa
T300	1.76	7	1.5	230	3530

## 3-3- ساخت نمونه تجربی

در این بخش مراحل ساخت نمونه و روند انجام پژوهش شرح داده شده است.

## 3-3-1- آسیاب کم انرژی

ابتدا دسته الیاف توزین شده در اندازه‌ی تقریبی سه الی پنج میلی‌متر بریده شد. سپس به همراه مقادیر متناسبی از پودر آلیاژی زمینه به منظور ساخت نمونه‌هایی با کسر حجمی صفر، دو، چهار، شش و هشت درصد درون محفظه آسیاب کم انرژی ریخته شد. از آسیاب کم انرژی به دلیل کاهش احتمال آسیب دیدن الیاف حین مخلوط سازی نسبت به آسیاب‌های پرانرژی استفاده گردید. از آسیاب گلوله‌ای کم انرژی در محفظه‌ای از جنس PVC با گلوله‌های آلومینیومی به قطر 18 میلی‌متر با نسبت وزنی گلوله به پودر سه به یک و سرعت چرخش 60 دور بر دقیقه به منظور اختلاط کامل الیاف کوتاه کربنی و پودر آلیاژی زمینه استفاده شد. نمونه‌ها به منظور بهینه‌سازی زمان آسیاب کاری و کاهش آسیب به الیاف کربنی در بازه‌های زمانی دو ساعته به صورت بصری بررسی شدند (جدول 3).

<sup>1</sup> - Hot press

## 6-3- شکست نگاری

به منظور مطالعه‌ی نوع شکست، نمونه‌های کشیده شده در مقطع شکست بریده و به کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی، بررسی گردید.

## 4- نتایج و بحث

در این بخش نتایج فرآیند ساخت نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

## 4-1- بررسی نتایج فرآیند آسیاب کاری

با توجه به جدول 3 با افزایش درصد الیاف تقویت کننده، زمان موردنیاز برای همگن شدن مخلوط پودری افزایش یافته است که دلیل این امر، افزایش انرژی و کار موردنیاز طی فرایند، با افزایش درصد الیاف تقویت کننده است. از طرف دیگر با توجه به هم سو بودن تمام الیاف در هر دسته، عمده نیرویی که می‌تواند باعث جدایش آن‌ها از هم شود، نیروی برشی در امتداد محور دسته الیاف خواهد بود که شرایط قرارگیری تمامی دسته الیاف در این حالت، با افزایش درصد الیاف در هر نمونه، مستلزم زمان آسیاب کاری بیشتری است. از هر نمونه 10 عدد ریز الیاف مطابق شکل 6 به صورت تصادفی از مخلوط پودری جدا، و طول آن‌ها اندازه‌گیری شد. در مواردی که الیاف دسته‌ای باقی‌مانده و به صورت کامل از یکدیگر جدا نشده بود، تعداد تقریبی الیاف به کمک میکروسکوپ نوری شمرده و نتایج در جدول 5 آورده شده است.



Fig. 6 Six Percent Volume Reinforcement Sample After Milling

شکل 6 نمونه‌ی شش درصد حجمی تقویت کننده، بعد از آسیاب کاری

جدول 5 میانگین طول و تعداد لیف‌های موجود در هر دسته الیاف بعد از آسیاب کاری  
Table 5 Average Length and Number of Fibers in Each Fiber Category After Milling

نمونه	طول میانگین الیاف (mm)	بازه تعداد الیاف
نمونه با صفر٪ حجمی تقویت کننده	-	-
نمونه با دو٪ حجمی تقویت کننده	3.4	1-5
نمونه با چهار٪ حجمی تقویت کننده	3.2	1-8
نمونه با شش٪ حجمی تقویت کننده	2.9	5-12
نمونه با هشت٪ حجمی تقویت کننده	3.8	>15

با افزایش درصد تقویت کننده تا شش درصد حجمی به دلیل افزایش زمان موردنیاز برای همگن شدن نمونه‌های پودری در آسیاب طول الیاف کوتاه‌تر شد که به دلیل شکسته شدن تعدادی از الیاف حین فرایند مخلوط سازی است. با افزایش درصد تقویت کننده تا هشت درصد حجمی علی‌رغم افزایش زمان آسیاب کاری، الیاف آسیب کمتری دیده و کمتر شکسته شده‌اند. دلیل این امر

## جدول 4 ترکیب نمونه‌های ساخته شده

Table 4 Combination of Constructed Samples

نمونه	ترکیب
1	آلومینیوم آلیاژی 5083 بدون تقویت کننده
2	آلومینیوم آلیاژی 5083 با 2 درصد حجمی الیاف کوتاه کربنی T300
3	آلومینیوم آلیاژی 5083 با 4 درصد حجمی الیاف کوتاه کربنی T300
4	آلومینیوم آلیاژی 5083 با 6 درصد حجمی الیاف کوتاه کربنی T300
5	آلومینیوم آلیاژی 5083 با 8 درصد حجمی الیاف کوتاه کربنی T300

## 3-3- ریزساختار

در این پژوهش ریزساختار نمونه‌های پرس گرم شده مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XL30 VEGA-III ساخت شرکت TESCAN مجهز به طیف‌سنج EDS و تفنگ الکترونی انتشار میدانی هگزابوراید لانتانیم، LaB6، مطابق استفاده شد. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا سطح قطعات با سمباده‌های 100 و 200 و 400 و 600 و 800 و 1200 سمباده زنی و با خمیر پولیش حاوی آلومینای 3 و 1 میکرومتر در دو مرحله پولیش شدند. سپس نمونه‌ها در محلول تجاری پنتون<sup>1</sup> به مدت 20 الی 40 ثانیه قرار داده شد.

## 4-3- چگالی سنجی

چگالی نمونه‌ها، به روش غوطه‌وری یا ارشمیدس طبق استاندارد ASTM B962 اندازه‌گیری شد.

## 5-3- خواص مکانیکی

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های پرس گرم شده از آزمون‌های کشش تک محوری، خمش سه نقطه‌ای و سختی سنجی ویکرز<sup>2</sup> استفاده شد. سختی سنجی به روش ویکرز، با نیروی پنج کیلوگرم، بعد سنباده زنی تا شماره 1200 و برای هر نمونه پنج بار انجام شد. آزمون کشش از نمونه‌های تخت مطابق استاندارد ASTM E8/E8M (شکل 5)، برای نمونه‌های اندازه‌ی کوچک با سرعت 1 mm/min انجام شد و آزمون خمش سه نقطه‌ای تحت استاندارد ASTM E90 مطابق آورده شده است، انجام شد. در آزمون خمش، نمونه‌های تسمه‌ای به طول 50 میلی‌متر و مقطع مربعی به‌اندازه ضلع پنج میلی‌متر بریده شد. سرعت حرکت فک بالایی دو میلی‌متر بر دقیقه و طول تکیه‌گاه‌ها 22 میلی‌متر در نظر گرفته شد. آزمون‌های کشش و خمش، هر دو با دستگاه Santam STM 150 ساخت کشور ایران صورت پذیرفت.

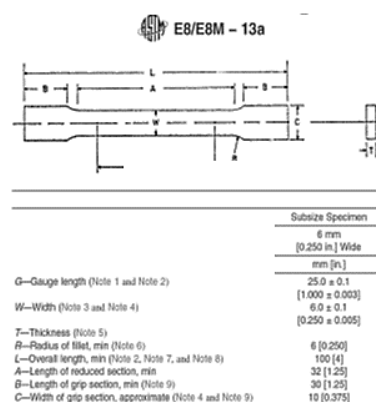
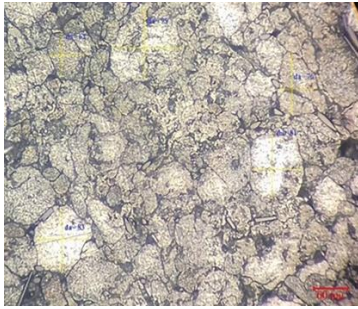


Fig. 5 Dimensions of the small tensile sample according to the ASTM E8/E8M standard

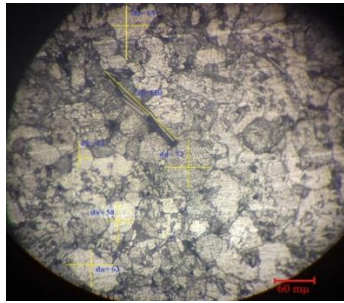
شکل 5 ابعاد نمونه کشش کوچک بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M

<sup>2</sup> - Vickers hardness

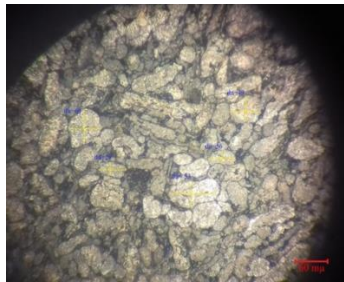
<sup>1</sup> - Pantone



**Fig. 9** Optical Microscope Image of Al 5083-4% vol C<sub>sf</sub> Sample  
شکل 9 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083-4 % vol C<sub>sf</sub>



**Fig. 10** Optical Microscope Image of Al 5083-6% vol C<sub>sf</sub> Sample  
شکل 10 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083-6 % vol C<sub>sf</sub>



**Fig. 11** Optical Microscope Image of Al 5083-8% vol C<sub>sf</sub> Sample  
شکل 11 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083-8 % vol C<sub>sf</sub>

همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ نوری قابل مشاهده است، اکثر الیاف در مرز دانه‌ها قرار گرفته‌اند که این امر را می‌توان به عدم ترشوندگی الیاف در فاز زمینه نسبت داد. البته در شکل 8 تعدادی از الیاف در نمونه‌ی با دو درصد حجمی تقویت کننده، درون یک دانه‌ی بزرگ قرار گرفته‌اند که می‌تواند به دلیل رشد دانه و حذف مرز دانه‌هایی که الیاف بین آن‌ها قرار گرفته بوده، باشد. از طرف دیگر با توجه به تصاویر، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد حجمی تقویت کننده اندازه‌ی دانه‌ها یکنواخت‌تر شده و اختلاف اندازه‌ی آن‌ها کاهش یافته است. این اختلاف اندازه‌ی دانه می‌تواند به دلیل رشد افراطی دانه‌ها در جهت‌گیری‌های مناسب رشد، باشد و با توجه به این فرض و یکنواخت‌تر شدن اندازه‌ی دانه‌ها با افزایش درصد حجمی تقویت کننده می‌توان نتیجه گرفت که الیاف کربن از رشد افراطی دانه‌ها جلوگیری کرده‌اند [19,18]. با توجه به تصاویر، در مورد نمونه‌های مرکب با افزایش درصد الیاف تقویت کننده تا چهار درصد، الیاف به صورت همگن در زمینه قرار گرفته‌اند اما با افزایش بیشتر، آگلومره<sup>1</sup> شدن الیاف کربن در زمینه افزایش یافته است که در شکل‌های 10 و 11 کاملاً قابل مشاهده است. البته نمی‌توان ادعا کرد که در نمونه‌های مرکب با درصد تقویت کننده‌ی دو و چهار درصد هیچ‌گونه مناطق

با توجه به تعداد بیشتر الیاف، در دسته الیاف همگن شده که در این مورد در هر دسته بیشتر از 15 لیف است، می‌توان نتیجه گرفت که دسته الیاف، به دلیل افزایش تعداد نسبت به نمونه‌های قبلی تحت انرژی کمتری مخلوط شده‌اند. لذا آسیب کمتری دیده و طول متوسط آن‌ها دچار کاهش کمتری شده است. همین تعبیر در مورد تعداد لیف‌های موجود در هر دسته از الیاف همگن شده نیز می‌تواند صادق باشد.

#### 2-4- بررسی نتایج ریزساختار

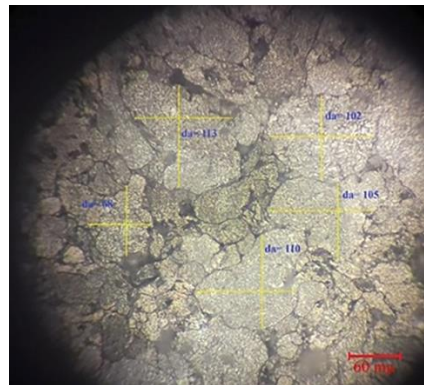
برای بررسی نتایج میکروسکوپی در هر نمونه، میانگین قطر چهل دانه اندازه‌گیری شده و نتایج در جدول 6 آورده شده است.

جدول 6 میانگین اندازه دانه نمونه‌ها

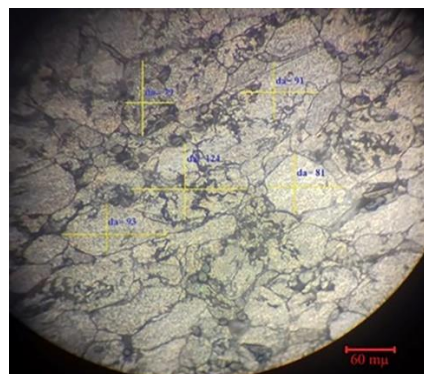
**Table 6** Average Particle Size of the Samples

Al 5083-8% C <sub>sf</sub>	Al 5083-6% C <sub>sf</sub>	Al 5083-4% C <sub>sf</sub>	Al 5083-2% C <sub>sf</sub>	Al 5083	نمونه
45.4	58.8	79.4	93.6	99.6	اندازه دانه متوسط (μm)

با توجه به داده‌های جدول 5 می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد تقویت کننده‌ی الیافی، اندازه‌ی متوسط دانه‌ها کوچک‌تر شده است دلیل این امر می‌تواند به دلیل جلوگیری الیاف از تحرک سریع مرز دانه‌ها و بلعیدن دانه‌های مجاور باشد. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها، با صفر تا هشت درصد حجمی تقویت کننده با دو بزرگ‌نمایی 300 برابر، در شکل‌های 7 تا 11 ارائه شده است.



**Fig. 7** Optical Microscope Image of Untreated Al 5083 Sample  
شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083 بدون تقویت کننده



**Fig. 8** Optical Microscope Image of Al 5083-2% vol C<sub>sf</sub> Sample  
شکل 8 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083-2 % vol C<sub>sf</sub>

<sup>1</sup> - Aggregation

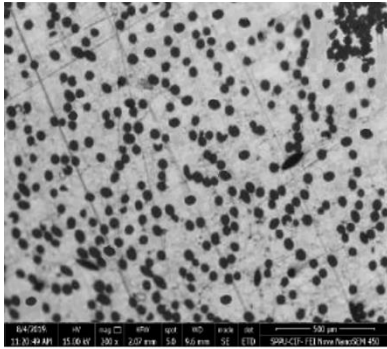


Fig. 15 SEM Image of Al 5083-8% vol Csf Sample

شکل 15 تصویر SEM نمونه‌ی Al 5083-8 % vol C<sub>sf</sub>

فصل مشترک زمینه و الیاف تقویت کننده در نمونه‌ی با چهار درصد حجمی تقویت کننده در شکل 16 آورده شده است. همان‌طور در تصویر مشخص است، نواحی با رنگ روشن‌تر از زمینه اطراف الیاف را دربر گرفته است. این نواحی می‌تواند ناحیه‌ی واکنشی باشد و یا مربوط به نواحی پر تنش باشد که دچار مقداری کرنش به دلیل تنش پسماند حاصل از اختلاف ضریب انبساط حرارتی فاز زمینه و تقویت کننده باشد. در این میان به دلیل پایین بودن دمای فرایند و احتمال پایین تشکیل فاز واکنشی فرضیه‌ی دوم معقول‌تر به نظر می‌رسد [20].

3-4- بررسی نتایج چگالی سنجی

نتایج چگالی سنجی نمونه‌ها در جدول 7 آورده شده است. چگالی تئوری که از قانون مخلوط‌ها به دست آمده، با افزایش درصد تقویت کننده کاهش می‌یابد که به دلیل پایین‌تر بودن چگالی الیاف کربن نسبت به الیاز آلومینیوم است.



Fig. 16 SEM Image of the Interface Region in Al 5083-4% vol C<sub>sf</sub> Sample

شکل 16 تصویر SEM از فصل مشترک نمونه‌ی Al 5083-4 % vol C<sub>sf</sub>

جدول 7 نتایج چگالی سنجی نمونه‌های پرس گرم شده

**Table 7** Results of Density Measurements for Hot-Pressed Samples

Al 5083-8% C <sub>sf</sub>	Al 5083-6% C <sub>sf</sub>	Al 5083-4% C <sub>sf</sub>	Al 5083-2% C <sub>sf</sub>	Al 5083	نمونه
1.83	2.93	2.62	2.01	3.01	وزن خشک (gr)
1.85	2.94	2.62	2.05	3.02	وزن اشباع (gr)
1.09	1.78	1.60	1.22	1.86	وزن غوطه‌وری (gr)
2.473	2.548	2.569	2.544	2.571	چگالی واقعی (gr/cm <sup>3</sup> )
2.56	2.63	2.61	2.578	2.595	چگالی تئوری (gr/cm <sup>3</sup> )
96.6	96.8	98.4	98.68	99.1	چگالی نسبی
3.4	3.2	1.6	1.32	0.9	درصد تخلخل

تجمع الیاف کربن وجود ندارد اما در صورت وجود، با توجه به داده‌های جدول 5، باید تعداد و مقدار الیاف تجمع کرده در آن مناطق کم‌تر باشد. در شکل 10 آسیب‌دیدگی و شکسته شدن الیاف قابل مشاهده است. این آسیب می‌تواند در دو مرحله‌ی پیش پرس یا پرس گرم و یا در مرحله‌ی سمباده زنی و پولیش اتفاق افتاده باشد، اما با توجه به اختلاف فاحش اندازه‌ی تقریبی لیف قبل از شکسته شدن که در شکل 9، 120 میکرومتر اندازه‌گیری شده است با داده‌های اندازه‌گیری طول الیاف بعد از فرایند آسیاب کاری در جدول 5، و همچنین خارج شدن تکه‌های آسیب دیده از حالت خطی می‌توان نتیجه گرفت این آسیب بیشتر طی فرایند پیش پرس و پرس گرم اتفاق افتاده باشد.

در خصوص نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی، تصاویر ریزساختار نمونه‌ها با درصد تقویت کننده‌ی دو تا هشت درصد در شکل‌های 12 تا 15 آورده شده است. این حاکی از توزیع یکنواخت الیاف در فاز زمینه در مورد نمونه‌های دو و چهار درصد است در حالی که نواحی آگلومره شده از الیاف کربن در زمینه‌ی نمونه‌های شش و هشت درصد، مشاهده می‌شود.

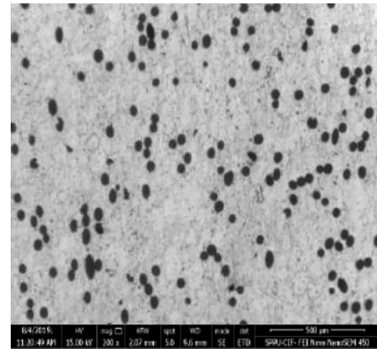


Fig. 12 SEM Image of Al 5083-2% vol C<sub>sf</sub> Sample

شکل 12 تصویر SEM نمونه‌ی Al 5083-2 % vol C<sub>sf</sub>

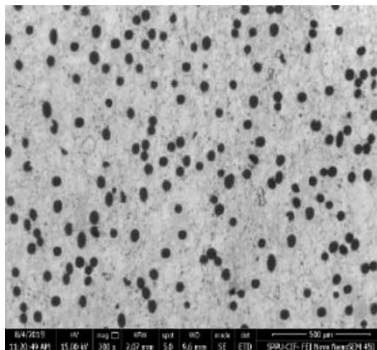


Fig. 13 SEM Image of Al 5083-4% vol C<sub>sf</sub> Sample

شکل 13 تصویر SEM نمونه‌ی Al 5083-4 % vol C<sub>sf</sub>

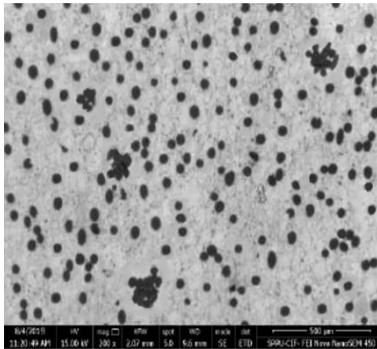
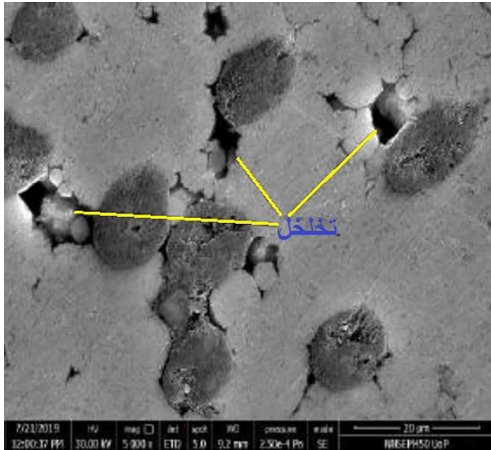


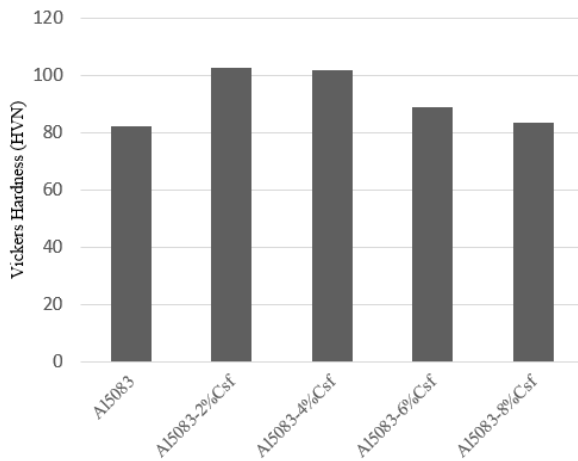
Fig. 14 SEM Image of Al 5083-6% vol C<sub>sf</sub> Sample

شکل 14 تصویر SEM نمونه‌ی Al 5083-6 % vol C<sub>sf</sub>



**Fig. 19** SEM Image of Porosities Around Carbon Fibers in Al 5083-8% vol C<sub>sf</sub> Sample

شکل 19 تصویر SEM از تخلخل‌های اطراف الیاف کربن در نمونه‌ی Al 5083-8% vol C<sub>sf</sub>



**Fig. 20** Hardness of Hot-Pressed Samples

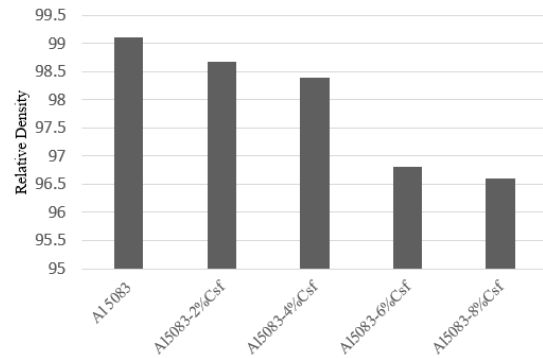
شکل 20 سختی نمونه‌های پرس گرم شده

همان‌طور در شکل 20 مشخص است، با افزایش درصد الیاف تقویت کننده تا دو درصد سختی افزایش و در مورد نمونه‌ی با چهار درصد تقویت کننده، مقدار اندکی کاهش یافته است. با افزایش درصد تقویت کننده به شش و هشت درصد حجمی، سختی به شدت افت کرده است که طبق پژوهش‌های پیشین [14]، این کاهش سختی به دلیل آگلومره شدن الیاف در زمینه است. ایجاد تخلخل در نمونه‌های با شش و هشت درصد حجمی تقویت کننده، مانع عملکرد سازوکار غلب افزایش سختی در مواد مرکب که همان انباشت نابجایی‌ها در اطراف فاز تقویت کننده است [20]، شده و سختی کاهش پیدا کرده است. میزان کم کاهش سختی در مورد نمونه‌ی با چهار درصد الیاف تقویت کننده، می‌تواند مؤید تعداد محدود مناطق آگلومره شده‌ی الیاف کربن در زمینه باشد. قابل ذکر است، کاهش سختی با افزایش درصد الیاف تقویت کننده بیش‌تر از یک درصد در روش ریخته‌گری گردابی، رخ داده است [14].

#### 2-4-4- نتایج آزمون کشش

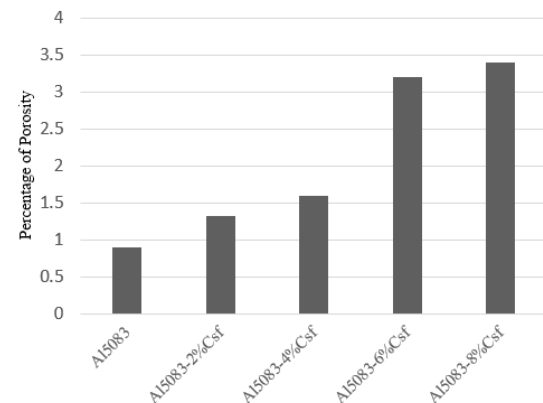
نتایج این آزمون در جدول 9 آورده شده است. نمودار تنش-درصد ازدیاد طول نمونه‌های پرس گرم شده در شکل‌های 21 تا 25 آورده شده است. داده‌های نمونه‌ی با هشت درصد حجمی تقویت کننده به دلیل شکستن در قسمت فک دستگاه کشش قابل ارائه نیست.

نتایج چگالی نسبی و درصد تخلخل به صورت نمودار در شکل‌های 17 و 18 ارائه شده است.



**Fig. 17** Relative Density of Hot-Pressed Samples

شکل 17 چگالی نسبی نمونه‌های پرس گرم شده



**Fig. 18** Percentage of Porosity in Hot-Pressed Samples

شکل 18 درصد تخلخل نمونه‌های پرس گرم شده

با توجه به شکل‌های 17 و 18، با افزایش درصد تقویت کننده‌ی الیافی چگالی نسبی کاهش یافته و در نتیجه درصد تخلخل افزایش می‌یابد. در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک الیاف و زمینه‌ی نمونه‌ی مرکب با هشت درصد حجمی الیاف تقویت کننده (شکل 19)، تخلخل‌های کوچکی در اطراف الیاف قلیل مشاهده است که می‌تواند دلیل این کاهش چگالی نسبی باشد. البته آگلومره شدن الیاف در نمونه‌های مرکب با شش و هشت درصد حجمی الیاف تقویت کننده کاهش پله‌ای و غیریکنواخت این کاهش چگالی را توجیه می‌کند. از طرف دیگر افزایش فاز تقویت کننده‌ی الیافی با توجه به غیر منعطف بودن الیاف کربن در اندازه‌ی کوچک، می‌تواند دلیل دیگر این کاهش چگالی باشد. به طوری که منجر به جذب نیروی فشاری فرایند پرس گرم توسط الیاف و مصرف شدن این نیرو برای شکستن و جابجایی الیاف در زمینه شده باشد. این نتایج مطابق نتایج پژوهش‌های پیشین است [17,15,14].

#### 4-4- بررسی نتایج خواص مکانیکی

##### 4-4-1- نتایج سختی سنجی

آزمون سختی سنجی از نمونه‌ها که به روش ویکرز انجام شده بود در جدول 8 و شکل 20 ارائه شده است.

جدول 8 نتایج سختی سنجی نمونه‌های پرس گرم شده

**Table 8** Results of Hardness Testing on Hot-Pressed Samples

Al 5083-8% vol	Al 5083-6% vol	Al 5083-4% vol	Al 5083-2% vol	Al 5083	نمونه
83.6	88.8	101.6	102.5	82.1	سختی ویکرز (HVN)

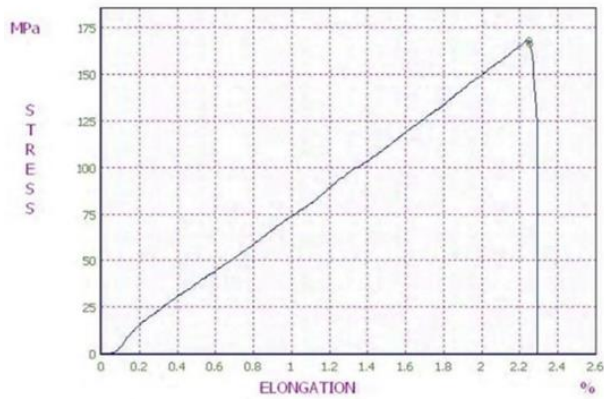


Fig. 24 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-6% vol  $C_{sf}$  Sample  
شکل 24 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083-6% vol پرس گرم

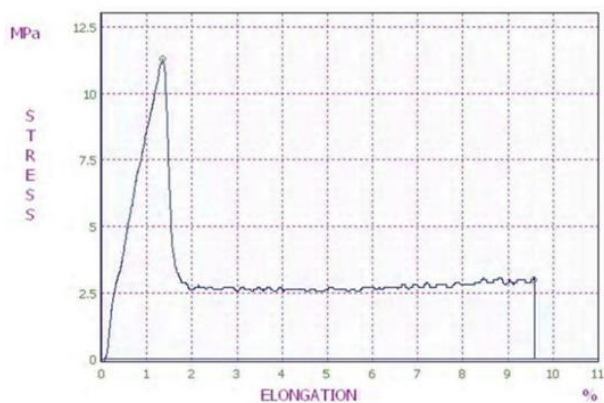


Fig. 25 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-8% vol  $C_{sf}$  Sample  
شکل 25 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083-8% vol پرس گرم

همان‌طور که در نمودارهای تنش- درصد ازدیاد طول مشخص است، با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد تنش‌های تسلیم و تنش شکست افزایش یافته و پس از آن رو به کاهش نهاده است. تغییرات تنش تسلیم و تنش شکست نمونه‌ها در شکل 26 به صورت نمودار نشان داده شده است.

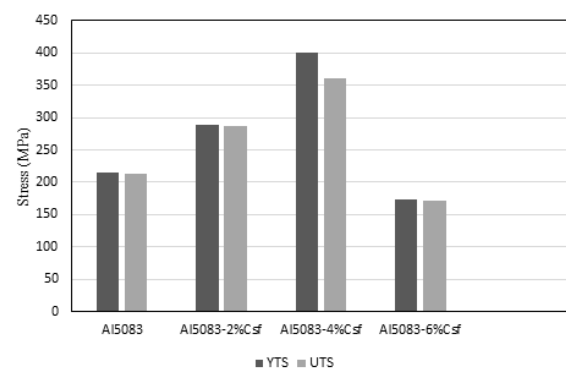


Fig. 26 Changes in Yield Stress and Fracture Stress of Hot-Pressed Samples

شکل 26 تغییرات تنش تسلیم و تنش شکست نمونه‌های پرس گرم شده

همان‌طور که در شکل 26 مشخص است، تنش‌های تسلیم و شکست نمونه‌ها با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد افزایش، و پس از آن دچار کاهش شده است. دلیل این روند افزایشی می‌تواند تأثیر حضور الیاف در زمینه و جلوگیری آن‌ها از حرکت مرز دانه‌ها و افزایش کار سختی باشد. به‌طوری که

جدول 9 نتایج کشش نمونه‌های پرس گرم شده

Table 9 Results of Tensile Testing on Hot-Pressed Samples

Al 5083-8% vol	Al 5083-6% vol	Al 5083-4% vol	Al 5083-2% vol	Al 5083	نمونه
-	173.55	400.47	288.3	214.49	تنش کششی نهایی (MPa)
-	171.21	360.28	286.3	212.15	تنش کششی تسلیم (MPa)
-	2.35	2.58	4.95	8.19	درصد ازدیاد طول

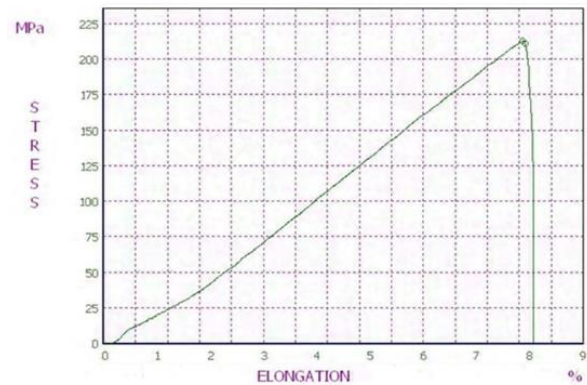


Fig. 21 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083 Sample

شکل 21 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083 پرس گرم شده

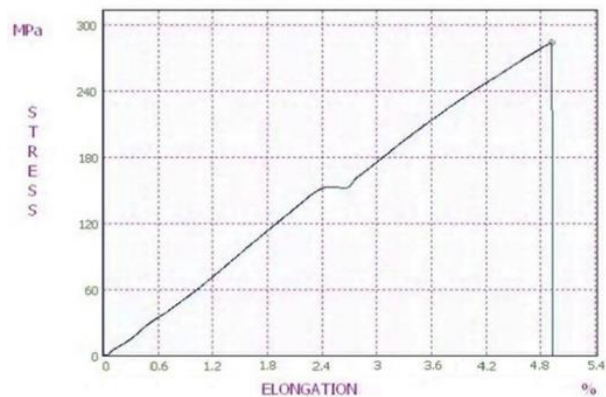


Fig. 22 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-2% vol  $C_{sf}$  Sample

شکل 22 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083-2% vol پرس گرم

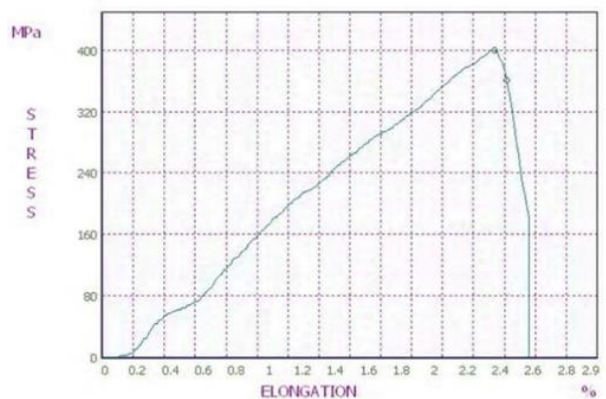


Fig. 23 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-4% vol  $C_{sf}$  Sample

شکل 23 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083-4% vol پرس گرم

زمینه است. با توجه به اثر محل قرارگیری تقویت کننده‌ها، به دلیل عدم وجود تر شونده‌گی بین الیاف و زمینه، اکثر الیاف در مرز دانه‌های زمینه قرار گرفته‌اند. قرارگیری الیاف در این مناطق به دلیل ایجاد یک منطقه تششی که پیش‌تر به آن اشاره شد، باعث افزایش بیش‌تر سطح انرژی این مناطق شده و با ایجاد یک منطقه فشاری ممکن است به قفل شدن نایجایی‌ها پشت مرز دانه کمک کند. در اثر به استفاده از روش پرس گرم، انتظار می‌رود که اکثر الیاف در جهت‌های عمود یا نزدیک به عمود بر محور پرس گرم جهت‌گیری یافته باشند که این مطلب در تصاویر میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مشهود است. در نتیجه با توجه به برش نمونه‌های کشش در جهت عمود بر محور پرس گرم، الیاف اکثراً باید در جهت‌های تصادفی در صفحات موازی با محور کشش جهت‌گیری یافته باشند. در نتیجه الیاف در زمینه‌ی تحت کشش، توسط دنیروی هم‌راستا با محور و عمود بر محور تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. در صورت اتصال مناسب زمینه و الیاف در فصل مشترک بیش‌ترین نیرو توسط الیافی که هم سو با محور کشش باشند، جذب خواهد شد و بقیه‌ی الیاف بیش‌تر تحت نیروی برشی قرار خواهند گرفت [21]. دو عامل مهم می‌تواند موجب افزایش استحکام در مواد مرکب تقویت شده با الیاف، شود. اولین عامل اتصال قوی بین الیاف و زمینه است به طوری که زمینه بتواند به خوبی بار اعمالی را به الیاف منتقل کند. عامل دوم بالاتر بودن استحکام الیاف از زمینه است. تئوری تأخیر برش بیان کننده‌ی این مطلب است که انتقال بار از زمینه به تقویت کننده به صورت عمده به شکل نیروی برشی در امتداد فصل مشترک عمل می‌کند. اما در صورت عدم اتصال مناسب بین الیاف و زمینه، الیاف کوتاه به صورت یک جای خالی عمل کرده و بعد از یک نسبت حجمی بحرانی باعث افت استحکام خواهند شد [20]. فرایند ساخت نمونه‌ها اعم از روش اختلاط، مواد اولیه مورد استفاده، روش چگالش نمونه‌ها و غیره، عواملی هستند که در فرایند ساخت مؤثر بوده و به تبع بر خواص مکانیکی نمونه‌ها از جمله خواص کششی تأثیرگذار می‌باشند. به عنوان مثال، استفاده از روش‌های حالت جامد مثل متالورژی پودر قطعاً با توزیع یکنواخت‌تر حاصل می‌کند در حالی که در روش‌های ذوبی احتمال آگلومره شدن الیاف حتی در درصد‌های بسیار پایین‌تر محتمل است که هر کدام به نوبه‌ی خود می‌توانند بر استحکام ماده مرکب حاصله تأثیرگذار باشند. با مقایسه نتایج ارائه شده در این بخش با استحکام آلیاژ 5083 کار شده می‌توان نتیجه گرفت که استحکام نهایی حدود 15 درصد افزایش یافته است.

#### 3-4-4- نتایج آزمون خمش

نتایج این آزمون در جدول 10 و نمودارهای تنش خمشی- طول تغییر شکل، در شکل‌های 27 تا 31 آورده شده است. همچنین در شکل‌های 32 و 33 تنش خمشی و طول تغییر شکل نمونه‌ها به صورت نمودار ارائه شده است. با افزایش درصد تقویت کننده میزان تغییر شکل حین خمش کاهش یافته و میزان تنش خمشی مشابه نمونه‌های کشش، با افزایش تقویت کننده تا چهار درصد حجمی افزایش و پس از آن دچار کاهش شده است. با توجه به این که رشد ترک در آزمون خمش از ناحیه‌ی تحت تنش کششی آغاز می‌شود و با توجه به تشابه روند تغییرات تنش خمشی با آزمون کشش، می‌توان تحلیل بیان شده در مورد آزمون کشش را به نتایج آزمون خمش تعمیم داد [17]. بر همین اساس تنش خمشی نمونه‌ها مشابه تنش کششی نهایی با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد حجمی از 98.354 MPa تا 97.423 MPa افزایش و پس از آن به دلیل تشکیل مناطق آگلومره شده‌ی الیاف تقویت کننده، تا 67.283 MPa کاهش یافته است. تغییر شکل نمونه‌ها تحت خمش با افزایش

نایجایی‌ها با رسیدن به الیاف قفل شده، مجبور به شکستن و یا دور زدن آن‌ها شده‌اند که این امر موجب افزایش نیروی کششی موردنیاز برای تسلیم و شکستن نمونه‌ها می‌شود [18]. این روند را می‌توان به توزیع یکنواخت الیاف در نمونه‌های با دو و چهار درصد حجمی تقویت کننده و حضور مناطق آگلومره شده‌ی الیاف در نمونه‌های با شش و هشت درصد حجمی تقویت کننده نسبت داد [21]. توزیع یکنواخت و حضور مناطق آگلومره شده در تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی تأیید شده و کاهش درصد ازدیاد طول با افزایش درصد تقویت کننده است. تغییرات درصد ازدیاد طول با درصد تقویت کننده در شکل 27 آورده شده است. دلیل این امر می‌تواند ممانعت الیاف از تحرک مرز دانه‌ها و افزایش کار سختی باشد که موجب کاهش در تغییر شکل موم‌سان در نمونه‌ها و کاهش شکل‌پذیری آن‌ها شده و درصد افزایش طول را با افزایش تقویت کننده، کاهش داده است [18].

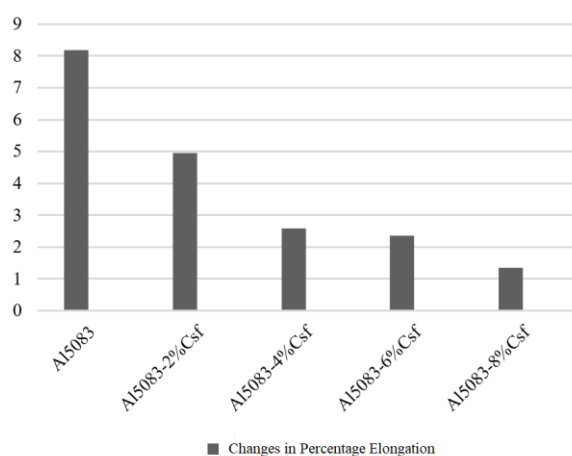
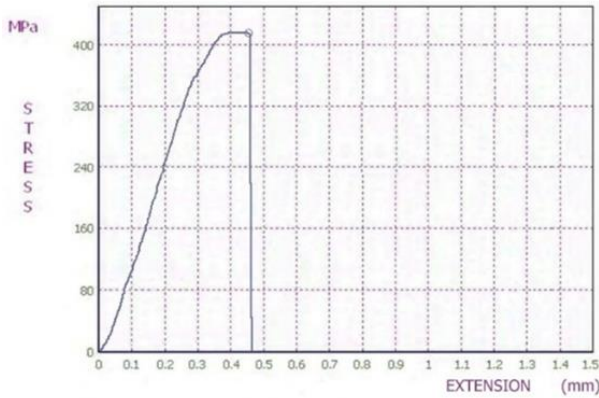


Fig. 27 Changes in Percentage Elongation of Hot-Pressed Samples

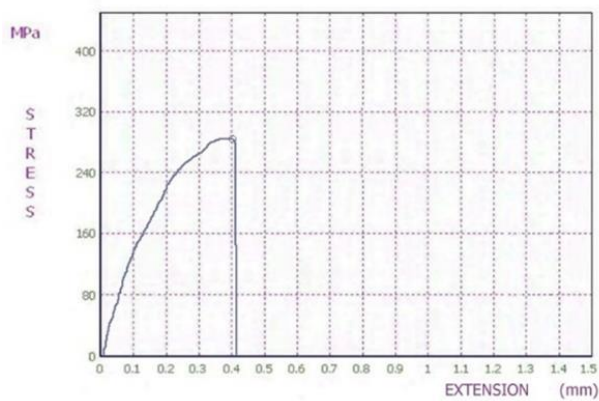
شکل 27 تغییرات درصد ازدیاد طول نمونه‌های پرس گرم شده

عوامل بسیاری می‌تواند بر استحکام کششی مواد مرکب زمینه فلزی تأثیرگذار باشد. از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکست و روند آن در مورد مواد مرکب زمینه فلزی می‌توان به ریزساختار، توزیع و مقدار تقویت کننده در زمینه، محل قرارگیری تقویت کننده، جهت‌گیری تقویت کننده، شرایط فصل مشترک و فرایند ساخت اشاره کرد [22].

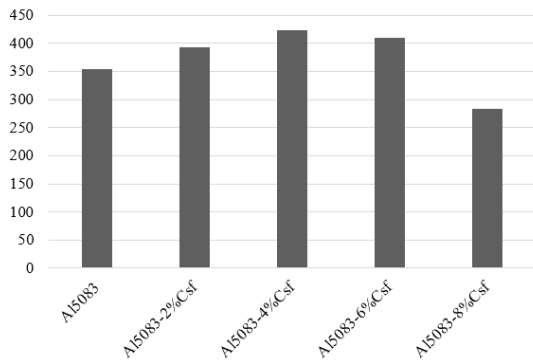
با توجه به نتایج ریزساختار با افزایش درصد تقویت کننده از رشد افراطی دانه‌ها جلوگیری شده و اندازه‌ی دانه‌ها کاهش یافته است. این روند کاهش اندازه دانه باعث محدودتر شدن تحرک نایجایی‌های حاصل از اعمال نیروی کششی شده و باعث افزایش تنش تسلیم و شکست و همچنین کاهش میزان تغییر شکل نمونه‌ها شده است. با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد حجمی، توزیع الیاف در زمینه یکنواخت و پس از آن مناطق آگلومره شده‌ی الیاف کربن در زمینه (شکل‌های 14 و 15)، تشکیل یافته است. حضور این مناطق می‌تواند به عنوان یک عیب ساختاری، نقش محل‌های شروع رشد ترک را بازی کند و تنش تسلیم و شکست نمونه‌ها را به شدت کاهش دهد که در مورد نمونه‌های با شش و هشت درصد تقویت کننده که در شکل‌های 24 و 25 قابل مشاهده است، صادق است. اثر دیگر توزیع و مقدار الیاف در زمینه، می‌تواند کاهش میزان تغییر شکل زمینه به دلیل فشردگی حضور الیاف در زمینه و در نتیجه کاهش شکل‌پذیری، ازدیاد طول و کاهش مقدار گلوبی شدن شود [20]. در نتیجه می‌توان گفت که دلیل کاهش اختلاف تنش تسلیم و شکست نمونه‌ها، کاهش مقدار شکل‌پذیری قطعه‌ها به دلیل حضور الیاف در



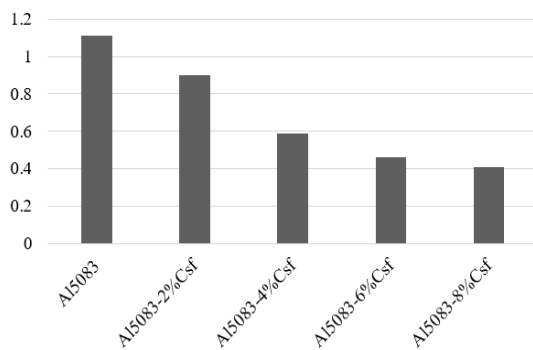
**Fig. 30** Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-6% vol C<sub>sf</sub> Sample  
 شکل 30 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083-6% vol C<sub>sf</sub> پرس گرم



**Fig. 31** Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-8% vol C<sub>sf</sub> Sample  
 شکل 31 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083-8% vol C<sub>sf</sub> پرس گرم



**Fig. 32** Changes in Bending Stress of Hot-Pressed Samples  
 شکل 32 تغییرات تنش خمشی نمونه‌های پرس گرم شده



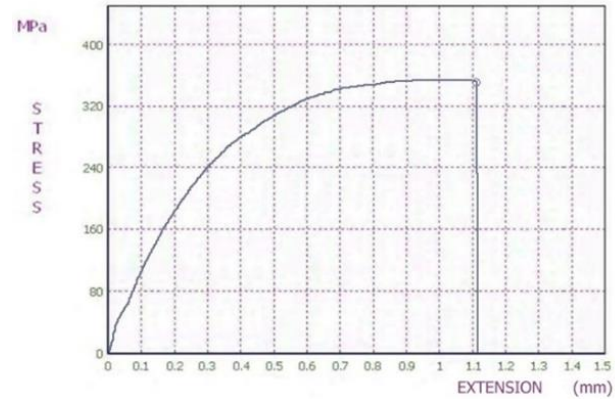
**Fig. 33** Changes in Elongation of Hot-Pressed Samples  
 شکل 33 تغییرات طول تغییر شکل نمونه‌های پرس گرم شده

درصد تقویت کننده به دلیل ممانعت الیاف از تغییر شکل مومسان زمینه، از 0.41 mm تا 1.11 mm دچار کاهش شد.

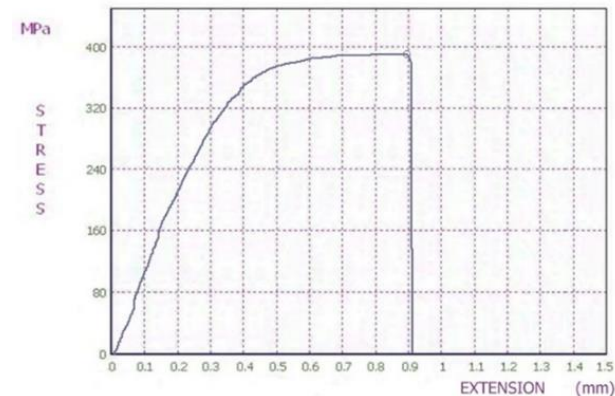
جدول 10 نتایج خمش نمونه‌های پرس گرم شده

**Table 10** Results of Flexural Testing on Hot-Pressed Samples

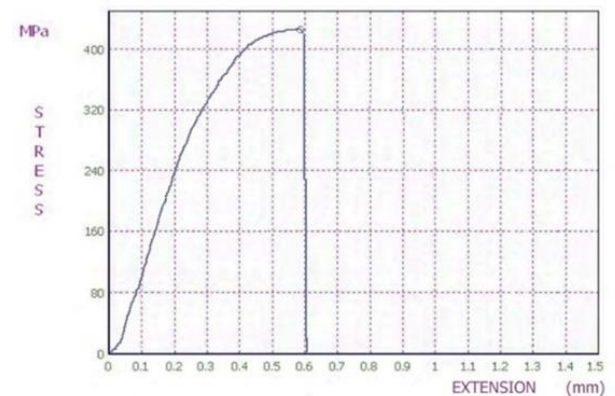
Al 5083-8% vol	Al 5083-6% vol	Al 5083-4% vol	Al 5083-2% vol	Al 5083	نمونه
283.67	409.64	423.77	392.36	354.98	تنش خمشی (MPa)
0.41	0.46	0.59	0.9	1.11	طول تغییر شکل (mm)



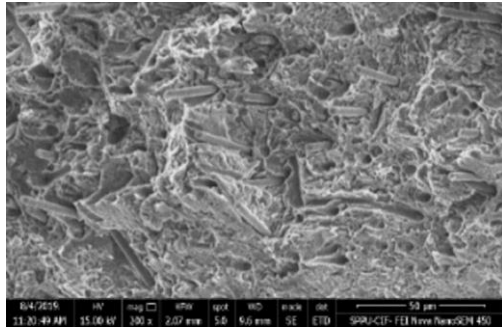
**Fig. 27** Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083 Sample  
 شکل 27 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083 پرس گرم شده



**Fig. 28** Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-2% vol C<sub>sf</sub> Sample  
 شکل 28 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083-2% vol C<sub>sf</sub> پرس گرم



**Fig. 29** Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-4% vol C<sub>sf</sub> Sample  
 شکل 29 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083-4% vol C<sub>sf</sub> پرس گرم



**Fig. 38** SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083-8% vol  $C_{sf}$  Sample

شکل 38 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083- 8% vol  $C_{sf}$

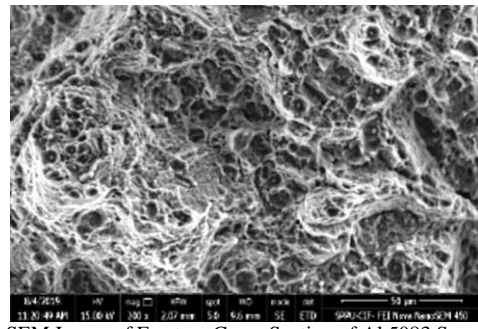
همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص است با افزایش درصد تقویت کننده، تعداد و عمق تقریبی دیمپل‌ها کاهش یافته و از شکست نرم در نمونه‌ی بدون تقویت کننده به شکست نسبتاً ترد، تبدیل شده است. دلیل این امر می‌تواند حضور الیاف کربن و ایجاد مناطق تنش حاصل از اختلاف ضریب انبساط حرارتی الیاف و فاز زمینه باشد که باعث افزایش کار سختی و کاهش شکل‌پذیری می‌شود که پیش‌تر به آن اشاره شد. باید توجه داشت که در مواد مرکب زمینه فلزی تقویت شده با الیاف، ترک اصلی ممکن است یک لیف را به سه حالت مختلف شکسته و از آن عبور کند [14].

(1) در صورت اتصال قوی بین زمینه و الیاف، ممکن است ترک پشت لیف متوقف و با افزایش انرژی ترک، لیف بریده شده و ترک از آن عبور کند.  
(2) در صورت عدم وجود اتصال بسیار قوی بین زمینه و تقویت کننده ترک ممکن است در جهت لیف انتشار یافته و نهایتاً آن را از زمینه بیرون بکشد.  
(3) در صورت عدم وجود اتصال قوی بین زمینه و تقویت کننده و اعمال بار در جهت‌های نزدیک به عمود بر محور لیف، ترک با رسیدن به یک لیف، آن را دور زده و از کنار آن عبور کند (پل زدن ترک) [23].

سازکارهای بیان شده در بالا به ترتیب بیش‌ترین انرژی جذب شده از نوک ترک را دارند. عموماً هر سه نوع این سازکارها در مقطع شکست نمونه‌های مرکب تقویت شده با الیاف مشاهده می‌شوند اما معمولاً یک یا دو تای از این آن‌ها سازوکار غالب در شکست است. سازوکار غالب توسط شرایط فصل مشترک الیاف و زمینه تعیین می‌شود که در اینجا همان‌طور که در تصاویر مشخص است، بیشتر سازوکار بیرون کشیده شدن الیاف از زمینه و انحراف ترک به همراه دور زدن الیاف است. در نمونه‌ی تقویت شده با دو درصد حجمی الیاف، سازوکار غالب بریده شدن الیاف است و تعداد کمی بیرون کشیده شدن الیاف نیز مشاهده می‌شود. در نمونه‌ی با چهار درصد تقویت کننده تعداد الیاف بیرون کشیده شده افزایش یافته و تعدادی از الیاف در جهت عمود بر محور کشش قرار گرفته‌اند که موجب پل زدن ترک از روی الیاف شده است. در نمونه‌ی با شش درصد حجمی تقویت کننده، با افزایش تعداد الیافی که در جهت عمود بر محور کشش قرار گرفته‌اند سازوکار غالب پل زدن ترک از روی الیاف بوده و تعداد کمی از الیاف نیز بیرون کشیده شده‌اند. این تغییر سازوکار، کاهش تنش شکست نمونه‌ی با شش درصد حجمی تقویت کننده را نسبت به نمونه‌ی با چهار درصد حجمی تقویت کننده توجیه می‌کند زیرا این سازوکار انرژی بسیار کم‌تری از ترک را جذب می‌نماید. در مورد نمونه‌ی با هشت درصد تقویت کننده سازوکار غالب پل زدن الیاف و بیرون کشیدگی آن‌هاست اما به دلیل وجود مناطق آگلومره شده‌ی الیاف کربن در این نمونه، افت تنش شکست بسیار بیش‌تری اتفاق افتاده است.

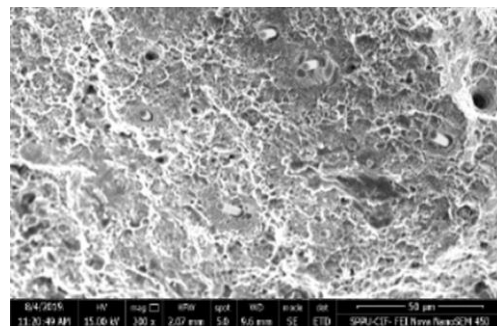
#### 5-4- نتایج شکست نگاری

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع شکست نمونه‌ها در شکل‌های 34 تا 38 آورده شده است.



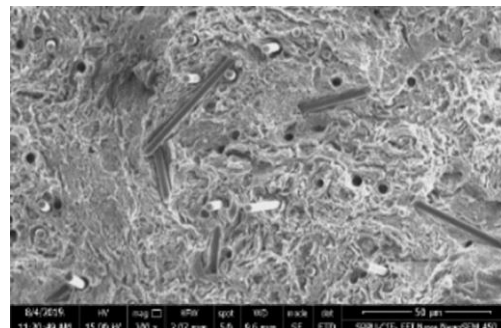
**Fig. 34** SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083 Sample

شکل 34 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083



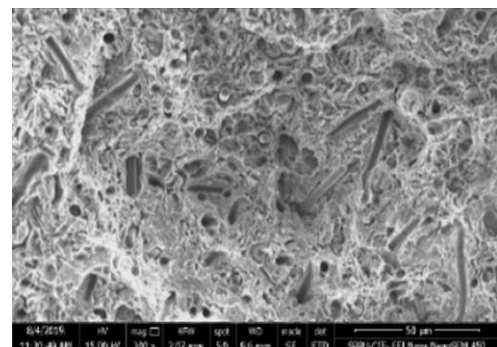
**Fig. 35** SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083-2% vol  $C_{sf}$  Sample

شکل 35 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083- 2% vol  $C_{sf}$



**Fig. 36** SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083-4% vol  $C_{sf}$  Sample

شکل 36 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083- 4% vol  $C_{sf}$



**Fig. 37** SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083-6% vol  $C_{sf}$  Sample

شکل 37 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083- 6% vol  $C_{sf}$

### 5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

1) می‌توان آسیاب‌های کم انرژی را به منظور اختلاط پودر زمینه و تقویت کننده به جای آسیاب‌های پراثرتری که در پژوهش‌های پیشین استفاده شده است، بکار برد.

2) زمان موردنیاز برای اختلاط مناسب پودر فلز زمینه با تقویت کننده‌ی الیافی با افزایش درصد تقویت کننده از دو تا هشت درصد، از دو ساعت تا 28 ساعت افزایش یافت.

3) استفاده از تقویت کننده‌ی الیافی می‌تواند از رشد افراطی دانه‌ها طی فرایند پرس گرم جلوگیری کند.

4) با استفاده از روش پرس گرم می‌توان نمونه‌های مرکب تقویت شده با الیاف را تا چهار درصد حجمی تقویت کننده با توزیع یکنواخت الیاف در زمینه تولید کرد.

5) با افزایش درصد تقویت کننده چگالی نسبی نمونه‌های مرکب به دلیل تشکیل مناطق آگلومره شده‌ی الیاف تقویت کننده، از 99.1 به 96.6 کاهش یافت.

6) با افزایش فاز تقویت کننده تا دو درصد حجمی سختی ویکرز از 82.1 به 102.5 افزایش و تا چهار درصد حجمی تقویت کننده با رسیدن به عدد 101.6 تقریباً روند خطی داشته است و با افزایش درصد تقویت کننده به بیش از چهار درصد، به دلیل تشکیل الیاف تقویت کننده آگلومره شده سختی کاهش یافته است به طوری که سختی نمونه‌ی مرکب با شش درصد حجمی تقویت کننده به 88.8 و در نمونه‌ی با هشت درصد حجمی تقویت کننده به عدد 83.6 رسید.

7) تنش کشش نهایی نمونه‌های مرکب با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد حجمی از 214.49 MPa به 400.47 MPa افزایش و پس از آن به دلیل تشکیل مناطق آگلومره شده‌ی الیاف تقویت کننده، به شدت کاهش یافت.

8) درصد ازدیاد طول نمونه‌های کشش با افزایش درصد تقویت کننده به دلیل ممانعت الیاف از تغییر شکل موم‌سان زمینه از 8.19 به 2.23 کاهش یافت.

9) تنش خمشی نمونه‌ها مشابه تنش کششی نهایی با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد حجمی از 354.98 MPa تا 423.77 MPa افزایش و پس از آن به دلیل تشکیل مناطق آگلومره شده‌ی الیاف تقویت کننده، تا 283.67 MPa کاهش یافت.

10) تغییر شکل نمونه‌ها تحت خمش با افزایش درصد تقویت کننده به دلیل ممانعت الیاف از تغییر شکل موم‌سان زمینه، از 1.11 mm به 0.41 mm کاهش یافت.

11) شکست نمونه‌ها با افزایش درصد تقویت کننده به دلیل ممانعت الیاف از تغییر شکل موم‌سان زمینه، از شکست نرم به شکست نسبتاً ترد تغییر پیدا کرد.

12) با افزایش درصد تقویت کننده عمق و تعداد دیمپل‌ها کاهش یافت.

13) سازوکار شکست در نمونه‌ی با دو درصد حجمی تقویت کننده بریده شدن الیاف و تعداد کمی بیرون کشیده شدن الیاف، در نمونه‌ی با چهار درصد حجمی تقویت کننده بیرون کشیدگی و پل زدن ترک از روی الیاف، در نمونه‌ی با شش درصد حجمی تقویت کننده پل زدن ترک از روی الیاف و تعداد کمی بیرون کشیده شدن الیاف و درمورد نمونه‌ی با هشت درصد حجمی تقویت کننده وجود مناطق گسترده‌ی آگلومره شده‌ی الیاف مشاهده و

### 6- منابع

- سازوکار شکست بیرون کشیدگی و پل زدن ترک از روی الیاف تشخیص داده شد.
- [1] Chawla, N. and Chawla, K.K., "Metal Matrix Composites," Springer Science, 1<sup>st</sup> Edition, 2006.
  - [2] Guo, X. and Derby, B., "Solid state fabrication and interfaces of fiber reinforced metal matrix composites," Progress in Materials Science, Vol. 39, p.p. 411-495, 1995.
  - [3] Kainer, K.U., "Basics of Metal Matrix Composites," Metal Matrix Composites, WILEY-VCH Verlag GmbH, 1<sup>st</sup> Edition, pp.1-54, 2006.
  - [4] Composite Materials Handbook, Department of Defense United State of America, Vol. 4, MIL-HDBK-17-3E, 2002.
  - [5] Nishida, Y., "Fabrication and recycling of aluminum metal matrix composites," Metal and Ceramic Matrix Composites, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2<sup>nd</sup> Edition, 2004.
  - [6] Miracle, D.B., "Metal matrix composites - From science to technological significance," Composites Science and Technology, Vol. 65, p.p. 2526-2540, 2005.
  - [7] Akhlaghi, F., "Composites," Booklet of M.Sc., 2005.
  - [8] German, R.M., "Powder Metallurgy Science", University of Minnesota, 2<sup>nd</sup> Edition, pp. 45- 83, 1984.
  - [9] Lenel, F.V., "Powder Metallurgy: principles and application," Metal powder industries federation, 2<sup>nd</sup> Edition, 1980.
  - [10] Mortensen, A., SanMarchi, C., Degischer, H.P., "Glossary of terms specific to Metal Matrix Composites," MMC-Assess Consortium, pp. 1-22, AC 20-107A, 2000.
  - [11] Hort, N., Kainer, K.U., "Powder Metallurgic ally Manufactured Metal Matrix Composites," Metal Matrix Composites, WILEY-VCH Verlag GmbH, 1<sup>st</sup> Edition, pp.1-54, 2006.
  - [12] Okura, A., Motoki, K., "Rate of Formation of Intermetallic Compounds in Aluminum Matrix-Carbon Fiber Composites," Composites Science and Technology, Vol. 24, pp. 243-252, 1985.
  - [13] Tang, Y., Liu, L., Li, W., Shen, B., Hu, W., "Interface characteristics and mechanical properties of short carbon fibers/Al composites with different coatings," Applied Surface Science, Vol. 255, pp. 4393-4400, 2009.
  - [14] BhavSingha, B., Balasubramanianb, M., "Processing and properties of copper-coated carbon fiber reinforced aluminum alloy composites," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 2104-2110, 2009.
  - [15] Jafari, R., "Production and Characterization of Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Alloy Composites," In Persian, Faculty of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Master's Thesis, IRAN, 2014.
  - [16] Deshpande, M., Gondil, R., Murty, S. N., & Kalal, R. K., "Studies on 7075 aluminum alloy MMCs with milled carbon fibers as reinforcements. Transactions of the Indian Institute of Metals", 71, pp. 993-1002, 2018.
  - [17] Kumar, N., Chittappa, H. C., & Vannan, S. E., "Development of aluminium-nickel coated short carbon fiber metal matrix composites", Materials Today: Proceedings, 5(5), pp. 11336-11345, 2018.
  - [18] Rams, J., Uren, A., Escalera, M.D., Sanchez M., "Electroless nickel coated short carbon fibres in aluminum matrix composites," Composites: Part A, Vol. 38, pp. 566-575, 2007.
  - [19] Sanchez, M., Rams, J., Urena, A., " Fabrication of aluminum composites reinforced with carbon fibres by a centrifugal infiltration process," Composites: Part A, Vol. 41, pp. 1605-1611, 2010.
  - [20] Tavousi, M., "Performance of Al2O3-TiB2/Fe Reinforcements in Aluminum Matrix Composites," In Persian, Scientific Research Journal of Advanced Materials in Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 23-38, 2016.
  - [21] Rezavi Tousi, S. S., "Modeling the Effect of Alumina Nanoparticle Distribution on Grain Growth in Nanostructured Composites," In Persian, 7<sup>th</sup> Congress of Iranian Ceramics, 2009.

- [22] Mandal, D., Dutta, B.K, Panichra, C.S., "Effect of copper and nickel coating on short steel fiber reinforcement on microstructure and mechanical properties of aluminum matrix composites," *Materials Science and Engineering*, Vol 492, pp. 346–352, 2008.
- [23] Matheus, R. D. and Rawlings, L. F., "Science and Engineering of Composite Materials," In Persian, 1<sup>st</sup> Edition, Translated by Shokouhfar, A., Haddad Sabzevari, M., Hayerian Ardekani A., Ferdowsi University of Mashhad Publications, 2005.



## شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تعیین ویژگی‌های محافظت پرتو گامای کامپوزیت‌های حاوی اکسیدبیس‌موت و عناصر گادمیم، تیتانیوم، تنگستن، زیرکونیم، روی و ایتريوم

محمد رضا علی‌پور<sup>1</sup>، مهدی عشقی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

2- استادیار فیزیک، مرکز علم و فناوری فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

\* تهران، صندوق پستی 16987-15461، [meshghi@ihu.ac.ir](mailto:meshghi@ihu.ac.ir)، [eshgi54@gmail.com](mailto:eshgi54@gmail.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در این پژوهش، استفاده از کامپوزیت‌های حاوی اکسید بیسموت با ناخالصی گادمیم، تیتانیوم، ایتريوم، تنگستن، زیرکونیم و روی، به عنوان ماده حفاظی برای محافظت مؤثر پرداخته شده است. در اینجا، ارزیابی محافظ‌های پرتوهای ایکس و گاما برای کامپوزیت‌های منتخب، با استفاده از ابزار شبیه‌سازی بر پایه روش مونت‌کارلو Geant4، در محدوده انرژی فوتون 15 کیلو الکترون‌ولت تا 15 مگا الکترون‌ولت پرداخته شده است. برای بررسی عملکرد این کامپوزیت‌های منتخب، کمیت‌های مؤثر در تضعیف پرتو گاما مانند: ضریب تضعیف‌های (کل، خطی و جرمی)، مسافت آزاد میانگین، لایه‌های یک‌دهم‌مقدار و نیم‌مقدار، نسبت پراکندگی کامپتون به ضریب تضعیف کل محاسبه شده است. برای تأیید نتایج شبیه‌سازی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده با داده‌های مستخرج از پایگاه داده NIST-XCOM مقایسه می‌شود، که داده‌های مستخرج از پایگاه NIST-XCOM و نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته توافق خوبی با یکدیگر دارند. همچنین، درصد انحراف (RD) بین نتایج محاسبه شده در بیشتر موارد کمتر از 2 درصد مشاهده می‌شوند. ترکیب اکسید بیسموت حاوی گادمیم به دلیل عدد اتمی بالای بیسموت و گادمیم، جذب و تضعیف فوتون‌های پرتوهای پرانرژی را با کارایی بالاتری نسبت به سرب داشته و سمیت کمتری دارند. حفاظ‌های ترکیب اکسید بیسموت با عنصر گادمیم می‌تواند به عنوان جاذب فوتون‌های پرانرژی برای مشاغل مختلف حوزه پرتو پزشکی مانند پزشکان، دندان‌پزشکان، کارکنان اتاق عمل و کارشناسان رادیولوژی استفاده شود و باعث افزایش سلامت و ایمنی کارکنان گردد.

دریافت: 1402/09/07

پذیرش: 1402/11/22

### کلیدواژگان

روش مونت‌کارلو، ابزار شبیه‌سازی Geant4، پرتو گاما، نوترون، کامپوزیت‌های بر پایه بیسموت.

## Monte Carlo simulation and determination of gamma ray protection characteristics of composites containing Bismuth Oxide and elements of Gadolinium, Titanium, Tungsten, Zirconium, Zinc and Yttrium

Mohamadreza Alipoor<sup>1</sup>, Mahdi Eshghi<sup>1\*</sup>

1- Department of Physics, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16987-15461, Tehran, Iran, [meshghi@ihu.ac.ir](mailto:meshghi@ihu.ac.ir), [eshgi54@gmail.com](mailto:eshgi54@gmail.com)

### Keywords

Monte Carlo method, Geant4 simulator, Gamma-ray, Neutron, Composites based on bismuth.

### Abstract

In this research, the use of composites based on bismuth oxide with impurities of Gadolinium, titanium, yttrium, tungsten, zirconium and zinc as a protective material for effective protection has been discussed. In here, the evaluation of X-ray and gamma ray shielding for selected composites has been done using the simulation tool based on Monte Carlo method of Geant4, in the photon energy range of 15 keV to 15 MeV. To investigate the performance of these selected composites, effective quantities in gamma ray attenuation such as: attenuation coefficients (total, linear and mass), mean free distance, one-tenth and half-value layers, the ratio of Compton scattering to the total attenuation coefficient have been calculated. To verify the simulation results, the simulation results are compared with the data extracted from the NIST-XCOM database, and the data extracted from the NIST-XCOM database and the simulation results are in good agreement with each other. Also, the percentage deviation (RD) between the calculated results is less than 2% in most cases. Due to the high atomic number of bismuth and Gadolinium, compound of bismuth oxide containing Gadolinium absorb and attenuate high-energy photons with higher efficiency than lead and are less toxic. Bismuth oxide compound shields with Gadolinium element can be used as absorbers of high-energy photons for various jobs in the field of medical radiation, such as doctors, dental hygienists, operating room workers, and radiologists, and can improve the health and safety of workers.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Alipoor, M., Eshghi, M., "Monte Carlo simulation and determination of gamma ray protection characteristics of composites containing Bismuth Oxide and elements of Gadolinium, Titanium, Tungsten, Zirconium, Zinc and Yttrium," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2348-2356, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2007267.1845>

## 1- مقدمه

الاستومر استفاده شوند. محققان با استفاده از ترکیب‌های مختلف مواد مانند کامپوزیت‌های زمینه فلزی، سیستم‌های شیشه‌ای، کامپوزیت‌های پلیمری و بسیاری موارد دیگر برای کشف کارایی مواد مجذوب شده‌اند [16-19].

محققان تلاش کرده‌اند، پُرکننده‌های مختلفی را که در کاهش شدت پرتوهای یونیزان موثر هستند، کشف کنند. کامپوزیت تنگستن، بیسموت و سرب توسط بایومی<sup>8</sup> و همکاران مورد بررسی قرار گرفتند [20]. گزارشی توسط ژو<sup>8</sup> و همکاران مبنی بر کارآمدترین کامپوزیت سه‌تایی، نانوذرات بورات و بیسموت برای محافظت در برابر پرتو گاما ارائه شد [21]. سید<sup>8</sup> و همکاران با روش تولید سلژل و کارایی بالای نانومواد با ترکیبات سرب مانند سولفات سرب، کلرید سرب، برمید سرب، یدید سرب و ترکیبات بیسموت مانند اکسید بیسموت کلرید، بیسموت بروماید، بیسموت فلوراید، یدید بیسموت را در جذب پرتوهای گاما و نوترون بررسی کردند [22]. خواص فیزیکی و کمیت‌های محافظ پرتویی شیشه‌های بیسموت بورات دوپ شده با 0.7 درصد وزنی با فلزات واسطه مانند مس، کبالت و نیکل به‌منظور بررسی کارایی محافظ توسط سلام<sup>8</sup> و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [23]. پلی دی متیل سیلوکسان<sup>8</sup> تقویت‌شده با اکسید بیسموت توسط السوا<sup>8</sup> و همکاران ساخته شد و خواص حرارتی، مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت [24]. حسن و همکاران نقش اکسید بیسموت را در افزایش توانایی محافظ گاما کامپوزیت‌های پلیمری حاوی پلی‌استر غیراشباع مطالعه کرده‌اند [25]. عملکرد محافظ فوتونی کامپوزیت‌های پلی‌استر دوپ‌شده با اکسید بیسموت با کلرید توسط راشد<sup>8</sup> و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [26]. بسیاری دیگر از ترکیبات در قالب بیسموت و اکسید بیسموت به عنوان اصلاح‌کننده مورد استفاده و از نظر حفاظت گاما مورد ارزیابی قرار گرفتند [27، 30]. کامپوزیت اکسید نیکل، آهن و باریم برای تقویت نانوکامپوزیت‌ها با چگالی بالا با استفاده از روش مذاب و ترکیب مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج حاصل از محافظ نشان داد برای پرتو گاما و نوترون عملکرد مناسبی دارند [31].

در ادامه مطالعات قبلی محققین، شبیه‌سازی و اعتبارسنجی عملکرد حفاظ پرتو گاما نمونه‌های کامپوزیتی، هدف این مطالعه بوده و بررسی عملکرد یک محافظ گاما کامپوزیت جدید متشکل از عناصر گادمیم، تنگستن، تیتانیم، زیرکونیم، روی و ایتریوم است. به این منظور، از عناصر گادمیم، تنگستن، تیتانیم، زیرکونیم، روی و ایتریوم که به‌تنهایی عملکرد مناسبی در برخی از انرژی‌ها برای جذب پرتو گاما دارند با اکسید بیسموت که عملکرد مناسبی برای تضعیف پرتو گاما دارد استفاده شده است تا موجب اصلاح کامپوزیت‌های منتخب گردد.

همچنین، این مواد با ماتریس‌های مختلفی مانند بتن، لاستیک سیلیکون، رزین اپوکسی، پلی‌وینیل کلراید<sup>8</sup>، لاستیک متیل وینیل سیلان<sup>8</sup>، پلی‌استایرن<sup>8</sup> و پلی‌اتیلن<sup>8</sup> قابلیت ترکیب شدن را دارند. ترکیب شدن با مواد اشاره‌شده سبب ایجاد خواص دیگری مانند انعطاف‌پذیری، وزن کم و کشسانی بیشتر در مواد حفاظی می‌شود که برای طراحی لباس‌های محافظ پرتو و

استفاده از فناوری هسته‌ای در زندگی روزمره به‌طور تصاعدی در حال افزایش است. کاربردهای پرتو شامل تصویربرداری، رادیوتراپی و رادیوداروها در پزشکی، تولید انرژی، کشاورزی، صنایع و غیره می‌باشد. نگرانی عمده آلودگی و نشت پرتوها به محیط است که منجر به خطر جبران‌ناپذیری بر روی انسان و محیط‌زیست می‌شود. تشعشعات هسته‌ای مختلف در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که محافظ‌ها نقش مهمی در به حداقل رساندن خطرات قرار گرفتن در معرض پرتو دارد و یکی از اصول اساسی کار با پرتو، حفاظت در برابر تشعشعات است [1].

با توجه به ماهیت یونیزه‌کننده و قدرت نفوذ بالا فوتون‌ها، قرارگرفتن در معرض پرتوهای یونیزان اثرات نامطلوب زیادی بر سلامتی دارد (مانند افزایش خطر ابتلا به سرطان‌ها و تغییر در ساختار DNA). علاوه بر این، فوتون‌ها نه‌تنها برای بیمار، بلکه برای رادیولوژیست‌ها و اپراتورهای مداخله‌ای در طول روش‌های تصویربرداری مداخله‌ای مانند فلوروسکوپی و توموگرافی کامپیوتری<sup>8</sup> به‌طور بالقوه مضر است. پیچیدگی شرایط قرار گرفتن در معرض پرتو در طی اقدامات تصویربرداری و مداخله‌ای، حفاظت در برابر پرتو را به یک کار چالش‌برانگیز تبدیل می‌کند [2-5].

در کاربردهای عملی چندین ماده به‌عنوان محافظ پرتویی مانند دیوارهای سربی یا انواع خاصی از بتن‌هایی که چگالی بالایی دارند، مورد استفاده قرار می‌گرفت. با توسعه مواد، برخی مواد دیگر که به خوبی با مواد چگالی بالا ترکیب می‌شدند، مانند: بیسموت، مس، فولاد و برخی از انواع سیستم‌های شیشه‌ای با اکسیدهای فلزات سنگین نیز مورد استفاده قرار گرفتند. با این حال، برخی از کاستی‌ها در پایداری شیمیایی، سنگینی، انعطاف‌پذیری و سمیت این مواد محافظ رایج وجود داشت. برای غلبه بر این چالش‌ها در سرب و بتن، محققان شروع به توسعه انواع جدیدی از مواد محافظ کردند، که بدون سرب، ارزان، انعطاف‌پذیر و موثر در جذب فوتون‌های گاما با ترکیب ذرات معدنی و قابل بازیافت مانند سرب یا اکسید سرب در پلیمرها باشند [6-8]. کامپوزیت‌ها می‌توانند معمولاً انتخاب مناسبی برای جایگزینی مواد معمولی باشند. کامپوزیت‌ها به‌دلیل خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به‌فرد مورد توجه پژوهشگران قرار گرفتند. گزارش‌های مختلفی مبنی بر استفاده از کامپوزیت‌ها به‌عنوان جاذب پرتو گاما منتشر شده است اما استفاده از آن با مشکلات خاصی همراه بود [9-11]. یکی از راه‌های برطرف کردن ضعف‌های این کامپوزیت‌ها، استفاده از کامپوزیت‌های اصلاح‌شده به‌وسیله ذرات می‌باشد. این کامپوزیت‌ها، با توجه به سازوکار استحکامی، به دو گروه درشت‌ذره و مستحکم‌شده با ذرات پراکنده، تقسیم می‌شوند. در کامپوزیت‌های درشت‌ذره، برهم‌کنش بین ذره و ماتریس، نمی‌تواند در مقیاس مولکولی یا اتمی رخ دهد و فاز اصلاح‌شده سفت‌تر از زمینه است. به نحوی که این ذرات، باعث توقف حرکت فاز زمینه در مجاورت خود می‌شوند. کامپوزیت‌های مستحکم‌شده با ذرات پراکنده در این کامپوزیت‌ها، اندازه ذرات بین 10 تا 100 نانومتر بوده و برهم‌کنش بین آن‌ها، در مقیاس اتمی و مولکولی اتفاق می‌افتد. در این نوع کامپوزیت‌ها، این عمل باعث افزایش استحکام می‌شود [12-15].

کامپوزیت‌های پلیمری دارای دو فاز هستند، می‌توانند به‌عنوان کامپوزیت ماتریسی، خواص آن‌ها به نوع پُرکننده، محتوای پُرکننده، پیوند بین پلیمر و ماتریس و روش‌های آماده‌سازی کامپوزیت بستگی دارد. انواع مختلفی از پلیمرها ممکن است به‌عنوان یک ماتریس مانند ترموپلاستیک، ترموست و

<sup>8</sup> Computed tomography (CT)

<sup>8</sup> Bayoumi

<sup>8</sup> Zhou

<sup>8</sup> Sayyed

<sup>8</sup> Salam

<sup>8</sup> Poly Dimethyl Siloxane

<sup>8</sup> ElSawy

<sup>8</sup> Rashad

<sup>8</sup> Polyvinyl Chloride (PVC)

<sup>8</sup> Di Methylene Thoxvinyl Silane

<sup>8</sup> Polystyrene

<sup>8</sup> Polyethylene

پوشش‌های محافظتی برای دیوارها و درب‌های اتاق‌های پرتونگاری نسبت به محافظ‌های سربی مناسب‌تر خواهد بود.

## 2- مواد و روش‌ها

برای درک بهتر خواننده، یک پیشینه نظری از رابطه‌های معمول برای محافظت در برابر پرتو گاما، برنامه Geant4 و ترکیبات کامپوزیت‌های مورد استفاده در ادامه به اختصار توضیح داده شده‌اند.

### 2-1- ابزار شبیه‌سازی Geant4<sup>8</sup>

جینت-4 اغلب در شبیه‌سازی حفاظت در برابر تشعشع برای ارزیابی و بهینه‌سازی طرح‌های محافظ، ارزیابی سطوح دُز تشعشع و مطالعه رفتار پرتو با استفاده از روش مونت کارلو در مواد مختلف استفاده می‌شود. روش‌های مونت کارلویی دسته‌ای از روش‌های محاسباتی هستند که برای به دست آوردن نتایج عددی بر نمونه‌گیری تصادفی تکیه می‌کنند. این روش‌ها به‌ویژه برای مدل‌سازی موقعیت‌هایی با رفتار پیچیده یا احتمالی مفید هستند. یک چارچوب جامع برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی برهم‌کنش ذرات با مواد آشکارساز و تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل ارائه می‌کند. این برای شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای الکترومغناطیسی، هادرونیک و نوری طراحی شده است که آن را برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مناسب می‌کند. از جمله قابلیت‌های جدید آن مدل‌های فیزیکی متنوع برای توصیف برهم‌کنش ذرات با ماده ترکیب می‌باشد. برای شبیه‌سازی حفاظت از تشعشع، فرآیندهایی مانند پراکندگی کامپتون، اثر فوتوالکتریک، تولید زوج و برهم‌کنش‌های نوترون برای پیش‌بینی دقیق انباشت انرژی و دُز تابش در مواد مختلف ضروری هستند. این ابزار شامل ابزارهای تجسم را برای ارائه طرح شبیه‌سازی شده و تجسم مسیرهای تشعشع فراهم می‌کند که کاربران می‌توانند داده‌ها را برای مطالعه توزیع دُز تشعشع، شناسایی نقاط حساس تشعشع، ارزیابی اثربخشی محافظ و بهینه‌سازی طرح‌های محافظ تجزیه و تحلیل کنند. یکی از ویژگی‌های اصلی که عبور یک فوتون از ماده را مشخص می‌کند، انرژی از دست‌رفته فوتون و دادن این انرژی به ذراتی مانند الکترون‌ها می‌باشد. این اثر نتیجه برخورد غیرکشسان با الکترون‌های اتمی ماده است. ذرات تولیدشده توسط فرآیند مرحله‌ای، باعث یونیزه شدن اتم‌های ماده هدف می‌شوند. در فرآیندهای یونیزاسیون، انتشار الکترون در پایان هر مرحله رخ می‌دهد. از این رو، اندازه گام به آستانه تولید بستگی دارد. شایان ذکر است برای نمونه‌ها می‌توان ضرایب تضعیف را با استفاده از منحنی‌های ضریب انتقال از طریق برازش قانون بیر-لامبرت به‌عنوان تابعی از ضخامت نمونه تعیین کرد [32، 33].

### 2-2- مواد

اثربخشی یک ماده به‌عنوان محافظ هنگامی که در معرض تابش گاما قرار می‌گیرد، نتیجه ساختار عنصری و چگالی آن است. در نتیجه، ویژگی‌های نمونه مورد مطالعه باید در حین انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی در نظر گرفته شود. اخیراً، از ترفندهای شبیه‌سازی مونت کارلو برای بررسی نمونه‌های کامپوزیت مونتاژ شده برای خواص محافظ آن‌ها استفاده شده است. جهت تکمیل بحث، اشاره می‌شود که اکسید بیسموت با نماد شیمیایی  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ماده‌ای زرد رنگ، کاملاً غیرسمی و در دمای اتاق جامد است. اکسید بیسموت با توجه به شرایط دمایی پلی‌آمورف‌های مختلف دارد که شامل چهار پلی‌آمورف<sup>8</sup>  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$ ،  $\delta$  می‌باشد. فاز  $\alpha$ ، که دارای ساختار مونوکلینیک<sup>8</sup> است،

از دمای محیط تا دمای 728 درجه سانتی‌گراد حالت پایدار دارد با گذر از این دما اکسید بیسموت با یک برهم‌کنش گرماگیر که موجب تشکیل بلورهایی با ساختار مکعبی با وجوه مرکزی می‌شود. این ساختار مکعبی، فاز  $\delta$  نامیده می‌شود که به‌علت رسانایی یونی زیادی که دارد مورد توجه است. این پلی‌آمورف از دمای 728 درجه سانتی‌گراد تا نقطه ذوب آن در حدود 825 درجه سانتی‌گراد پایدار است و به هنگام سرد شدن تا 650 درجه سانتی‌گراد در حالت پایدار باقی خواهد ماند. در حین فرآیند تشکیل کامپوزیت لایه نازکی با ضخامت نانو در میان الیاف و ماتریس تشکیل می‌شود. که از این فاز به‌عنوان فاز میانی و یا لایه میانی نام برده می‌شود [34، 36]. در تشکیل فاز میانی خواص از الیاف تا ماتریس تغییر می‌کند. عوامل مختلفی در تشکیل فاز میانی تأثیرگذار هستند، که در این میان می‌توان به عواملی مانند هندسه‌ی نمونه، درصد حجمی الیاف و نوع سازوکار اتصالی که ما بین الیاف و ماتریس وجود دارد اشاره نمود. ذکر این نکته بسیار حائز اهمیت است که با توجه به نوع بار اعمالی بر کامپوزیت‌ها میزان انتقال تنش در فاز میانی کامپوزیت‌ها تغییر می‌کند، و از این رو بررسی تنش انتقالی در کامپوزیت‌ها امری بسیار مهم خواهد بود. برای بررسی اثر لایه‌ی میانی بر عملکرد کلی کامپوزیت‌ها پژوهش‌های زیادی انجام شده‌است [37، 38]. اکسید ایتیریم یکی از معروف‌ترین افزودنی‌های مورد استفاده در پایدارسازی ساختار مکعبی اکسید بیسموت می‌باشد و فاز مکعبی را در دمای اتاق پایدار می‌نماید [39].

ویژگی کامپوزیت‌های منتخب در جدول 1 نشان داده شده است.

### 2-3- روابط ریاضی

در اینجا، کمیت‌های معمول مرتبط، پارامترهای محافظ پایه برای پارامترهای محافظ پرتوگاما به‌صورت معادلات زیر استنتاج می‌شوند. ضریب تضعیف کل معیاری است که نشان می‌دهد یک ماده در حین عبور از هدف، شدت پرتوی تابش را چقدر کاهش می‌دهد که حاصل جمع ضریب جذب و ضریب پراکندگی است. ضریب جذب نشان‌دهنده کسری از تابش فرودی است که توسط ماده در واحد طول جذب می‌شود. بستگی به انرژی تابش و ترکیب اتمی و مولکولی ماده دارد. ضریب پراکندگی نشان‌دهنده کسری از تابش فرودی است که توسط ماده در واحد طول پراکنده می‌شود. پراکندگی می‌تواند به روش‌های مختلفی رخ دهد، مانند پراکندگی ریلی که در آن تابش پراکنده انرژی مشابه تابش فرودی دارد و پراکندگی کامپتون که در آن تابش پراکنده انرژی کم‌تری نسبت به تابش فرودی دارد. ضریب تضعیف کل به ضخامت ماده، انرژی تابش و ترکیب مواد بستگی دارد. هنگام در نظر گرفتن پراکندگی کشسان، ضریب تضعیف کل را می‌توان به سه جزء تقسیم کرد: ضریب جذب فوتوالکتریک، ضریب پراکندگی کامپتون و ضریب پراکندگی کشسان. ضریب جذب فوتوالکتریک نشان‌دهنده احتمال جذب فوتون فرودی در ماده است و باعث می‌شود که یک الکترون از پوسته اتمی داخلی خارج شود. این فرآیند بسیار وابسته به انرژی است و در انرژی‌های فوتون پایین و برای موادی با عدد اتمی بالا بسیار مهم است. ضریب پراکندگی کامپتون نشان‌دهنده احتمال برهم‌کنش فوتون فرودی با یک الکترون لایه بیرونی است که باعث پرتاب شدن آن و پراکندگی فوتون با انرژی کم‌تری می‌شود. این فرآیند همچنین وابسته به انرژی است و در انرژی‌های فوتون بالاتر قابل توجه‌تر می‌شود. ضریب پراکندگی کشسان نشان‌دهنده این احتمال است که فوتون فرودی با الکترون‌های اتمی به‌صورت منسجم و بدون ایجاد اتلاف انرژی برهم‌کنش خواهد کرد.

<sup>8</sup> Geometry and Tracking 4

<sup>8</sup> Poly-Amorphous

<sup>8</sup> Monoclinic

جدول 1 ترکیب شیمیایی و کسر وزن عناصر برای نمونه‌ها

Table 1 Chemical composition and wt. fraction of elements for samples

کسر وزن عناصر %								چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	نمونه‌ها
Zn	Zr	Y	W	Ti	Gd	O	Bi		
-	-	-	-	-	8.51	10.76	80.72	8.89	Bi-Gd
-	-	-	-	8.51	-	10.76	80.72	8.37	Bi-Ti
-	-	-	8.51	-	-	10.76	80.72	9.62	Bi-W
-	-	8.51	-	-	-	10.76	80.72	8.36	Bi-Y
-	8.51	-	-	-	-	10.76	80.72	8.53	Bi-Zr
8.51	-	-	-	-	-	10.76	80.72	8.59	Bi-Zn

با این حال  $\mu$  برای محاسبه این کمیت‌ها به صورت زیر استفاده می‌شود [41]:

$$HVL(cm) = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (3)$$

لایه یک‌دهم مقدار (TVL) به عنوان ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو تابش به یک‌دهم مقدار اولیه آن تعریف می‌شود. لایه یک‌دهم مقدار به انرژی پرتو و خواص ماده از جمله چگالی و عدد اتمی آن بستگی دارد. لایه یک‌دهم مقدار اغلب در حفاظت در برابر تشعشع برای تعیین ضخامت مناسب مواد محافظ برای محافظت از کارگران و عموم مردم در برابر خطرات پرتویی استفاده می‌شود.

$$TVL(cm) = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (4)$$

درصد انحراف (%RD) بین نتایج حاصل از ابزار شبه‌سازی Geant4 و داده‌های مستخرج از پایگاه XCOM بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RD\% = \left(1 - \frac{\mu_{Geant4}}{\mu_{XCOM}}\right) * 100 \quad (5)$$

### 3- نتایج و بحث

همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود در انرژی‌های کمتر از 1 مگا الکترون‌ولت پدیده غالب فوتوالکتریک بوده و با افزایش انرژی فوتون‌ها میزان این پدیده نیز کاهش می‌یابد. پراکندگی کشسان در انرژی‌های کمتر از 500 کیلو الکترون‌ولت قابل توجه است و پراکندگی ناکشسان تا انرژی 10 مگا الکترون‌ولت وجود دارد و باعث کاهش انرژی فوتون‌های فرودی می‌شود. پدیده تولید زوج نیز با افزایش انرژی، به میزان انرژی آستانه تولید زوج الکترون، پوزیترون خودش را نشان می‌دهد و در انرژی‌های بالاتر از 1 مگا الکترون‌ولت پدیده غالب می‌باشد. در نهایت، ضریب تضعیف کل نیز متناسب با این پدیده‌ها تغییر می‌کند و با آن‌ها رابطه مستقیم دارد.

در این مطالعه، مقدار ضریب تضعیف جرمی در انرژی‌های مختلف برای کامپوزیت‌ها در محدوده انرژی‌های بین 15 تا 15000 کیلو الکترون‌ولت با استفاده از ابزار شبه‌سازی Geant4 محاسبه شد.

این فرآیند در انرژی‌های فوتون بسیار پایین غالب است. بنابراین، ضریب تضعیف کل با پراکندگی کشسان، مجموع این سه ضریب است و به انرژی فوتون‌های فرودی، ترکیب اتمی و مولکولی ماده و چگالی ماده بستگی دارد. هنگامی که پراکندگی کشسان در نظر گرفته نمی‌شود، ضریب تضعیف کل مجموع ضریب جذب فوتوالکتریک و ضریب پراکندگی کامپتون است. ضریب تضعیف جرمی کمیت مفیدی است زیرا به ما امکان می‌دهد خواص تضعیف مواد مختلف را بدون توجه به چگالی آن‌ها مقایسه کنیم.

در آزمایش‌های جذب پرتو باریک بدون هیچ‌گونه اثرات پراکندگی، شدت فوتون‌های فرود (I<sub>0</sub>) بسته به ضخامت ماده (t) و چگالی (g/cm<sup>3</sup>) کاهش می‌یابد.

طبق قانون بیر-لامبرت، ضریب تضعیف خطی، کمیتی است که توانایی ماده را برای مقاومت در برابر اشعه فرودی توضیح می‌دهد. می‌توان آن را برای فوتون‌های گاما که از یک نمونه عبور می‌کنند، نوشت [40]:

$$\mu(cm^{-1}) = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (1)$$

در جایی که t (cm) ضخامت نمونه‌ها است، نسبت I / I<sub>0</sub> ضریب انتقال در معادله (1) نامیده می‌شود.

ضریب تضعیف خطی که با نماد  $\mu$  نشان داده می‌شود، معیاری است که نشان می‌دهد یک ماده چقدر شدت پرتو تابش را در واحد مسافت طی شده از ماده کاهش می‌دهد. اگر با ترکیبات بسیار بیشتری سروکار داریم، آنگاه مقدار ضریب تضعیف جرمی اجزاء و مخلوط‌های بیش از یک عنصر را می‌توان به سادگی با استفاده از قانون مخلوط‌ها با استفاده از معادله زیر به دست آورد [41]:

$$\mu_m = \sum_i W_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2)$$

که در آن  $\rho$ ، چگالی ماده است، W<sub>i</sub> کسر وزنی عنصر سازنده در نمونه است و  $\mu$  ضریب تضعیف جرمی عنصر مورد استفاده در ترکیب می‌باشد.

لایه نیم‌مقدار (HVL) به عنوان ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو تابشی به نصف مقدار اولیه آن تعریف می‌شود. لایه نیم‌مقدار به انرژی پرتو و خواص ماده از جمله چگالی و عدد اتمی آن بستگی دارد. ماده‌ای با لایه نیم‌مقدار بالاتر به ضخامت بیشتری نیاز دارد تا شدت پرتو را به نصف مقدار اولیه خود کاهش دهد.

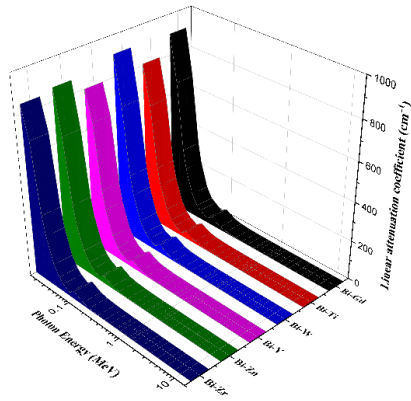


Fig. 3 Linear attenuation coefficient for samples according to energy

شکل 3 ضریب تضعیف خطی برای نمونه‌ها بر حسب انرژی

مسیر آزاد میانگین اندازه‌گیری میانگین مسافت طی شده توسط یک ذره یا فوتون بین برخوردهای متوالی با سایر ذرات یا اتم‌ها در یک ماده است. در شکل 4 مشاهده می‌شود که در انرژی‌های پایین پرتو بیشتر می‌تواند با ماده هدف برهم‌کنش کند و ترکیبات مسافت آزاد کم‌تری در این انرژی‌ها دارند. با افزایش انرژی میزان برهم‌کنش پرتو با ماده هدف کاهش یافته و مسافت آزاد میانگین نیز افزایش می‌یابد. تیتانیوم به‌طور میانگین مسافت بیشتری را در هدف طی می‌کند و نسبت به سایر ترکیبات عملکرد ضعیف‌تری برای کاهش شدت پرتوهای گاما دارد.

در شکل 5 میانگین ضخامت در طول انرژی 150 کیلو الکترون‌ولت تا 1.5 مگا الکترون‌ولت را مشاهده می‌کنید. در این بازه انرژی میزان کمترین ضخامت لایه نیم‌مقدار 5 میلی‌متر و بیشترین مقدار آن 1.2 سانتی‌متر می‌باشد. کاملاً واضح است که هر چقدر طول بازه ضخامت کم‌تر باشد، مقدار میانگین عدد کم‌تری را نسبت به دیگران خواهد داشت، که این مقدار میانگین نماد دایره بر روی هر نمودار مشخص شده است. گادیمیم و تنگستن میانگین ضخامت کم‌تری را نسبت به دیگر عناصر دارند و برای استفاده در این طیف انرژی مطلوب هستند.

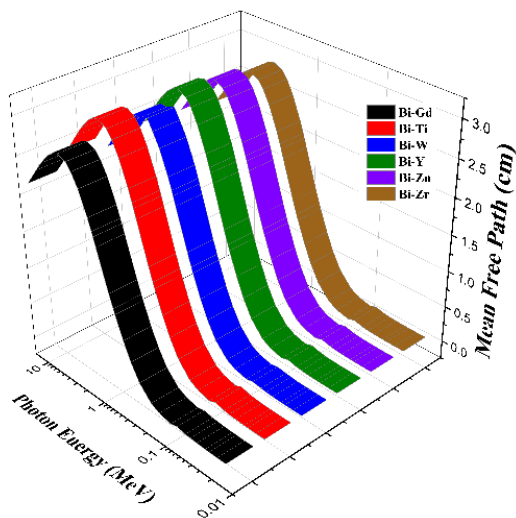


Fig. 4 Mean free path test for samples according to energy

شکل 4 مسافت آزاد میانگین بر حسب انرژی برای نمونه‌های منتخب

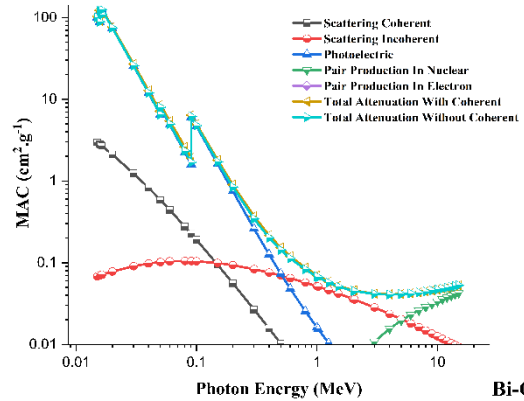


Fig. 1 Total Attenuation coefficient for samples according to energy

شکل 1 ضریب تضعیف کل برای نمونه‌ها بر حسب انرژی

همچنین داده‌های پایگاه XCOM نیز برای اعتبارسنجی داده‌های حاصل از شبه‌سازی استخراج شد. نتایج به‌دست‌آمده از رابطه 5 در جدول 2 شرح داده شده است. درصد انحراف بین نتایج حاصل از ابزار شبه‌سازی Geant4 و داده‌های مستخرج از پایگاه XCOM برای ترکیب‌های مورد بررسی در محدوده 0.04 تا 2 درصد بود. این نتایج نشان می‌دهد، مقادیر ضریب تضعیف شبه‌سازی شده توسط ابزار شبه‌سازی Geant4 برای ترکیب‌های مورد بررسی بسیار نزدیک به داده‌های تجربی برنامه XCOM است و باهم توافق دارند.

در ناحیه انرژی اول (انرژی‌های کم‌تر از 100 کیلو الکترون‌ولت)، نتایج به‌دست آمده ضریب تضعیف جرمی نمونه‌های انتخابی با افزایش انرژی فوتون بسیار سریع کاهش می‌یابد و قله‌های ناشی از اثر فوتوالکتریک اطراف لبه‌های جذب M، L و K عنصر بیسموت، گادیمیم، تیتانیوم، زیرکونیم، روی، تنگستن، ایتیریم است.

همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، گادیمیم و تنگستن وقتی با اکسید بیسموت ترکیب می‌شوند، نسبت به سایر ترکیبات ضریب تضعیف بالاتری دارند و بهتر می‌توانند پرتوهای گاما را جذب یا تضعیف کنند. در نزدیکی انرژی 100 کیلو الکترون‌ولت یک قله مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده لبه جذب K عنصر بیسموت است.

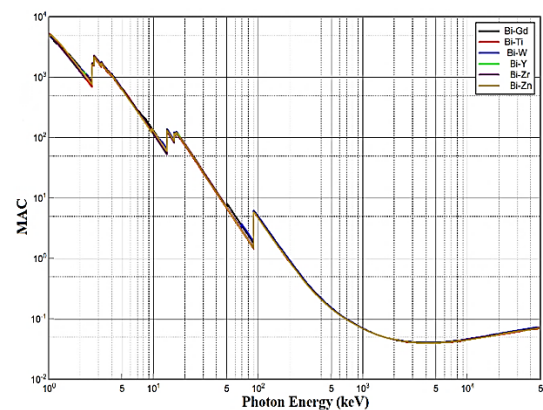


Fig. 2 Mass attenuation coefficient for samples according to energy

شکل 2 ضریب تضعیف جرمی بر حسب انرژی برای نمونه‌های منتخب

جدول 2 مقادیر محاسبه شده ضریب تضعیف جرمی برای نمونه های منتخب

Table 2 The values of calculated mass attenuation coefficient for chosen samples

Energy (MeV)	Bi-Gd			Bi-Ti			Bi-W			Bi-Y			Bi-Zn			Bi-Zr		
	Ceram4	XCoM	RD%	Ceram4	XCoM	RD%	Ceram4	XCoM	RD%	Ceram4	XCoM	RD%	Ceram4	XCoM	RD%	Ceram4	XCoM	RD%
0.015	101.678	101.753	0.07	96.768	96.863	0.09	105.488	105.627	0.13	95.6582	95.750	0.095	100.62	100.717	0.09	95.817	95.906	0.09
0.02	75.767	76.067	0.39	73.413	73.705	0.39	77.6493	77.947	0.38	77.89	78.188	0.383	75.210	75.520	0.41	78.2466	78.514	0.34
0.03	26.726	26.745	0.07	25.896	25.906	0.03	27.4002	27.417	0.06	27.4527	27.466	0.047	26.505	26.510	0.01	27.5873	27.597	0.03
0.05	7.0735	7.115	0.58	6.858	6.890	0.46	7.25829	7.293	0.47	7.24826	7.277	0.396	7.007	7.033	0.45	7.28092	7.312	0.42
0.0596	5.3198	5.345	0.46	4.363	4.310	1.21	4.61512	4.561	1.17	4.60045	4.542	1.26	4.449	4.395	1.21	4.622	4.563	1.26
0.08	2.487	2.528	1.63	2.049	2.088	1.90	2.6805	2.718	1.4	2.15306	2.191	1.74	2.0861	2.125	1.86	2.16019	2.200	1.85
0.1	4.893	4.913	0.40	4.651	4.672	0.44	5.00497	5.026	0.42	4.70463	4.725	0.44	4.6704	4.691	0.43	4.71034	4.731	0.43
0.15	1.781	1.789	0.41	1.70	1.710	0.45	1.82217	1.830	0.44	1.71872	1.726	0.44	1.708	1.716	0.44	1.72051	1.728	0.43
0.2	0.89	0.895	0.42	0.855	0.859	0.40	0.91065	0.914	0.39	0.86235	0.866	0.39	0.8577	0.861	0.40	0.8631	0.867	0.39
0.3	0.366	0.368	0.35	0.355	0.357	0.35	0.37393	0.375	0.35	0.35738	0.359	0.35	0.3561	0.357	0.35	0.35762	0.359	0.36
0.4	0.215	0.216	0.38	0.210	0.211	0.38	0.21885	0.220	0.39	0.21108	0.212	0.38	0.2106	0.211	0.38	0.21119	0.212	0.38
0.511	0.148	0.153	3.20	0.145	0.150	2.14	0.14992	0.155	3.24	0.14579	0.145	0.51	0.1456	0.144	1.48	0.14585	0.145	0.54
0.8	0.087	0.087	0.10	0.086	0.086	0.52	0.08788	0.086	1.9	0.0866	0.085	1.48	0.0866	0.085	1.59	0.08662	0.088	1.40
1.173	0.061	0.062	0.38	0.0619	0.062	0.33	0.06227	0.063	1.4	0.06182	0.063	1.68	0.0619	0.062	0.14	0.06183	0.062	0.04
1.5	0.052	0.053	0.32	0.052	0.052	1.63	0.05274	0.053	0.05	0.05247	0.052	1.47	0.0525	0.052	1.49	0.05248	0.053	0.41
2	0.045	0.045	1.62	0.0459	0.045	1.49	0.04614	0.045	1.93	0.0459	0.045	1.46	0.0459	0.045	1.60	0.0459	0.045	1.98
3	0.041	0.042	0.36	0.0412	0.041	0.38	0.04105	0.042	2.0	0.04135	0.042	0.365	0.0413	0.042	0.37	0.04137	0.042	0.36
4	0.041	0.041	0.08	0.0401	0.040	0.07	0.04173	0.041	1.71	0.04053	0.040	0.08	0.0404	0.040	0.07	0.04055	0.041	0.08
5	0.042	0.042	0.59	0.0406	0.040	0.58	0.04159	0.041	0.61	0.04093	0.041	0.58	0.0408	0.041	0.58	0.04096	0.041	0.58
6	0.042	0.042	1.00	0.0414	0.041	0.98	0.04259	0.042	1.03	0.04183	0.041	0.98	0.0416	0.041	0.98	0.04185	0.041	0.98
8	0.044	0.044	1.39	0.043	0.043	1.38	0.04503	0.044	1.43	0.04408	0.043	1.36	0.0438	0.043	1.36	0.04411	0.044	1.36
10	0.047	0.047	1.34	0.045	0.045	1.34	0.04752	0.047	1.38	0.04641	0.046	1.31	0.0461	0.046	1.32	0.04645	0.046	1.31
15	0.052	0.052	0.37	0.050	0.051	0.43	0.05299	0.053	0.41	0.05162	0.051	0.38	0.0512	0.051	0.40	0.05167	0.051	0.38

محاسبه تضعیف نوترون‌های سریع در مواد و طراحی سیستم‌های حفاظتی که حفاظت کافی در برابر نوترون‌های سریع را فراهم می‌کند، استفاده می‌شود. طبق جدول 3 کامپوزیت حاوی بیسموت با ترکیب تنگستن بهتر می‌تواند نوترون‌های سریع را حذف کند.

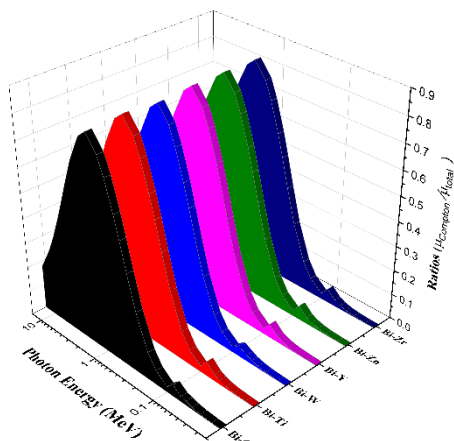


Fig. 7 Ratios ( $\mu_{\text{Compton}}/\mu_{\text{total}}$ ) for samples according to energy

شکل 7 نسبت ضریب تضعیف پراکندگی کامپتون به ضریب تضعیف کل برای نمونه‌ها برحسب انرژی

جدول 3 سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع برای نمونه‌های منتخب

Table 3 Fast neutron removal cross section for chosen samples

نمونه‌ها	سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع ( $\text{cm}^{-1}$ )
Bi-Gd	1.122
Bi-Ti	1.121
Bi-W	1.131
Bi-Y	1.114
Bi-Zn	1.122
Bi-Zr	1.122

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خواص محافظ گاما کامپوزیت‌های حاوی بیسموت، گادمیم، ایتیریم، تنگستن، تیتانیوم، روی و زیرکونیم، مانند ضریب تضعیف جرمی، ضریب تضعیف خطی، لایه نیم‌مقدار، لایه یک‌دهم مقدار، مسیر آزاد میانگین و کمیت‌های دیگر در محدوده انرژی فوتون 0.015 تا 10 مگا الکترون‌ولت بررسی گردید. نتایج با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 به‌دست آورده شد. این نتایج نشان داد که در انرژی‌های کمتر از 500 کیلو الکترون‌ولت لایه‌های جذب باعث بهتر شدن عملکرد ماده به‌عنوان حفاظ می‌شود و در انرژی‌های بالاتر اثر چگالی در کاهش تابش بهتر خودش را نشان می‌دهد. در واقع، لایه نیم‌مقدار، لایه یک‌دهم مقدار و مقادیر مسیر آزاد میانگین برای کامپوزیت‌های مورد بررسی، نشان داد که با افزایش انرژی فوتون، تضعیف کاهش یافته است. با توجه به استحکام، مقاومت در برابر خوردگی شیمیایی و فیزیکی و شکل‌دهی راحت این کامپوزیت‌ها، می‌توان آنها را در محل‌هایی که محدودیت وزنی، دمایی وجود دارد، در برابر اثرات پرتو گاما و نوترون قرار داد. در پایان، نتایج به‌دست‌آمده را در اشکال مناسب نشان داده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شد.

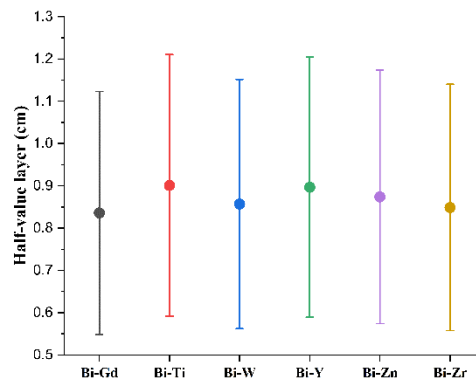


Fig. 5 Half value layer for samples according to energy

شکل 5 لایه نیم‌مقدار برای نمونه‌ها برحسب انرژی

لایه یک‌دهم مقدار که رابطه مستقیمی با میزان ضریب تضعیف خطی دارد. در انرژی‌های کمتر از 100 کیلو الکترون‌ولت ضخامت لایه یک‌دهم مقدار کمتر از 1 سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش انرژی و غالب شدن پراکندگی کامپتون (انرژی‌های بیشتر از 100 کیلو الکترون‌ولت تا انرژی 1 مگا الکترون‌ولت) و در انرژی‌های بالاتر (انرژی‌های بیشتر از 1.022 مگا الکترون‌ولت که آستانه تولید زوج است) با غالب شدن پدیده تولید زوج، ضخامت این لایه نیز به‌شدت افزایش می‌یابد (شکل 6).

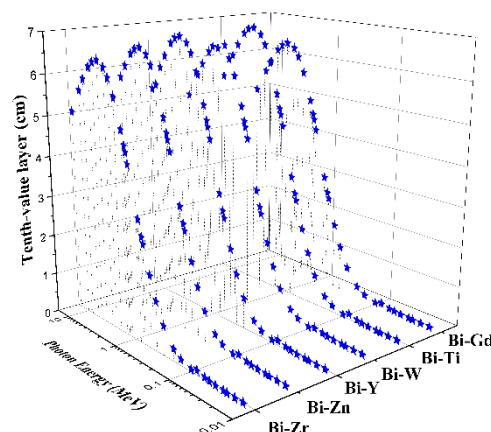


Fig. 6 Tenth value layer for samples according to energy

شکل 6 لایه یک‌دهم مقدار برای نمونه‌ها برحسب انرژی

نسبت پراکندگی کامپتون معیاری از سهم پراکندگی کامپتون در تضعیف کل یک پرتو تابشی در یک ماده است. نسبت پراکندگی کامپتون در انرژی‌های بالاتر و برای مواد با عدد اتمی پایین قابل توجه است. در انرژی‌های پایین‌تر و برای موادی با عدد اتمی بالا، انواع دیگر برهم‌کنش‌ها، مانند جذب فوتوالکتریک، بر تضعیف کل غالب است و کسر پراکندگی کامپتون نسبتاً کوچک است. شکل 7 به‌خوبی نشان می‌دهد که در انرژی 1 کیلو الکترون‌ولت تا 1 میلیون الکترون‌ولت که پراکندگی کامپتون غالب است، میزان این نسبت به‌شدت افزایش می‌یابد.

سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع اندازه‌گیری احتمال حذف یک نوترون سریع از یک ماده از طریق واکنش هسته‌ای در واحد طول ماده است. معمولاً در واحد  $\text{cm}^{-1}$  بیان می‌شود. سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع به انرژی نوترون و خواص اتمی و هسته‌ای ماده بستگی دارد. سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع یک کمیت مهم در حفاظت در برابر پرتو است. برای

## 5- مراجع

- [18]. Uthoff, H., Benenati M. J., Katzen, B. T., Peña, C., Gandhi, R., Staub, D. and Scherthner, M., "Lightweight Bilayer Barium Sulfate-Bismuth Oxide Composite thyroid collars for superior radiation protection in fluoroscopy-guided interventions: a prospective randomized controlled trial," *Radiology*, vol. 270, no. 2, pp. 601-606, 2014.
- [19]. Johansen, S., Hauge, I. H. R., Hogg, P., England, A., Lança, L., Gunn, C. and Sanderud, A., "Are Antimony-Bismuth Aprons as Efficient as Lead Rubber Aprons in Providing Shielding against Scattered Radiation," *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, vol. 49, no. 2, pp. 201-206, 2018.
- [20]. Bayoumi, E. E., El-Magied, M. O. A., Elshehy, E. A., Atia, B. M., Mahmoud, K. A., Khalil, L. H. and Mohamed, A. A., "Lead-bismuth tungstate composite as a protective barrier against gamma rays," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 275, p. 125262, 2022.
- [21]. Zhou, D., Zhang, J. P., Zheng, J., Wu, Y., Zhao, Y. and Zhou, Y., "Co-shielding of neutron and  $\gamma$ -ray with bismuth borate nanoparticles fabricated via a facile sol-gel method," *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 77, pp. 55-58, 2017.
- [22]. Sayyed, M. I., Akman, F., Kaçal, and Kumar, A., "Radiation protective qualities of some selected lead and bismuth salts in the wide gamma energy region," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 51, no. 3, pp. 860-866, 2019.
- [23]. Sallam, F. M., Madbouly, O. I., Elalaily A. M., and Ezz-Eldin, N. A., "Physical properties and radiation shielding parameters of bismuth borate glasses doped transition metals," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 843, pp. 156056, 2020.
- [24]. ElSawy, A., "Performance of Nanoparticle Materials on Radiation Shielding Properties Using Mont Carlo Method", *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 6, pp. 74-82, 2017.
- [25]. Hassan, H. E., Badran, H. M., Aydarous, A. and Sharshar, T., "Studying the effect of nano lead compounds additives on the concrete shielding properties for  $\gamma$ -rays," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 360, pp. 81-89, 2015.
- [26]. Rashad, M., Tekin, H. O., Zakaly, H. M. H., Pyshkina, M., Issa, S. A. M. and Süsoy, G., "Physical and nuclear shielding properties of newly synthesized magnesium oxide and zinc oxide nanoparticles," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 52, no. 9, pp. 2078-2084, 2020.
- [27]. Olarinoye, I. O., Alomairy, S., Sriwunkum, C. and Al-Buriah, "Effect of Ag<sub>2</sub>O/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> substitution on the radiation shielding ability of tellurite glass system via XCOM approach and FLUKA simulations," *Physica Scripta*, vol. 96, no. 6, p. 065308, 2021.
- [28]. Tekin, H. O. and Manıç, T., "Simulations of mass attenuation coefficients for shielding materials using the MCNP-X code," *Nuclear Science and Techniques*, vol. 28, no. 7, 2017.
- [29]. Akman, F., Özkan, İ., Kaçal, Polat, H., Issa, S. A. M., Tekin, H. O. and Açar, O., "Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 167, p. 109470, 2021.
- [30]. Alabsy M. T. and Elzaher M. A., "Radiation shielding performance of metal oxides/EPDM rubber composites using Geant4 simulation and computational study," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 2023.
- [31]. More, C. V., Akman, F., Dilsiz, K., Oğul, H. and Pawar, P. P., "Estimation of neutron and gamma-ray attenuation characteristics of some ferrites: Geant4, FLUKA and WinXCom studies," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 197, p. 110803, 2023.
- [32]. Taheri, A., Khandaker, M. U., Moradi, F., Bradley, D., "A review of recent advances in the modeling of nanoparticle radiosensitization with the Geant4-DNA toolkit". *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 212, pp. 111146, 2023.
- [33]. Chatzipapas, K., Tran, N. H., Dordevic, M., Zivkovic, S., Zein, S. A., Shin, W., Sakata, D., Lampe, N., Brown, J. M., Ristić-Fira, A., Petrović, I., Kyriakou, I., Emfietzoglou, D., Guatelli, S., Incerti, S., "Simulation of DNA damage using Geant4-DNA: an overview of the molecularDNA example application". *Precision Radiation Oncology*, vol. 7, no. 1, 4-14, 2023.
- [1]. Beyer, T., Bailey, D. L., Birk, U., Buvat, I., Catana, C., Cheng, Z., Fang, Q., Giove, F., Kuntner, C., Laistler, E., Moscato, F., Nekolla, S. G., Rausch, I., Ronen, I., Saarakkala, S., Thielemans, K., Van Elmpt, W. and Moser, E., "Medical Physics and Imaging—A Timely Perspective," *Frontiers in Physics*, vol. 9, pp.1-12, 2021.
- [2]. Hussain, S. T., Mubeen, I., Ullah, N., Shah, S. S. U. D., Khan, B. A., Zahoor, M., Ullah, R., Khan, F. A. and Sultan, M. A., "Modern Diagnostic Imaging Technique Applications and Risk Factors in the Medical field: A review," *BioMed Research International*, vol. 2022, pp. 1-19, 2022.
- [3]. Berger, M., Yang, Q. and Maier, A., "X-ray Imaging," in *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 119-145, 2018.
- [4]. Datta, A., Zhong, Z. and Motakef, S., "A new generation of direct X-ray detectors for medical and synchrotron imaging applications," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, 2020.
- [5]. Kovács, A., Bischoff, P., Haddad, H., Kovács, G., Schaefer, A., Zhou, W. and Pinkawa, M., "Personalized Image-Guided Therapies for Local Malignancies: Interdisciplinary options for interventional radiology and interventional radiotherapy," *Frontiers in Oncology*, vol. 11, 2021.
- [6]. Vaz, P., "Radiological protection, safety and security issues in the industrial and medical applications of radiation sources," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 116, pp. 48-55, 2015.
- [7]. Erdem, M., Baykara, O., Doğru, M. and Kuluöztürk, F., "A novel shielding material prepared from solid waste containing lead for gamma ray," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 79, no. 9, pp. 917-922, 2010.
- [8]. Nambiar, S. and Yeow, J. T. W., "Polymer-Composite materials for radiation protection," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 4, no. 11, pp. 5717-5726, 2012.
- [9]. Ahmadi, S.J., Rafiei Sarmazdeh, Z., Zahedi Dizji, S. M., Jafari, S. H., Kasesaz, Y., "Comparison of performance of composite and nanocomposites based on heavy polyethylene and boron nitride for use in neutron shielding". In Persian, *Journal of Nuclear Sciences and Techniques*, vol. 42, no. 3, pp.79-88, 2023.
- [10]. Murki, A., Qasri, M., Murki, Gh., A-Kasai, P., Ahadi, B., Rahmati, A., "Preparation of flexible gamma ray shielding composites based on SBR rubber". In Persian, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 97-106, 2019.
- [11]. Shirmardi, S.P., Adeli, R., Ahmadi, S. J., Mazinani, S., "Attenuation of high-energy secondary neutron field gamma using a lead-free reinforced composite shield". In Persian, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 23-29, 2015.
- [12]. Jiang, Y., Guo, W., Yang, H., "Numerical studies on the effective shear modulus of particle reinforced composites with an inhomogeneous inter-phase". *Computational Materials Science*, vol. 43, no. 4, pp. 724-73, 2008.
- [13]. Jiang, Y., Yang, H., Tohgo, K., "Three-phase incremental damage theory of particulate-reinforced composites with a brittle interphase". *Composite Structures*, vol. 93, no. 3, pp. 1136-1142, 2011.
- [14]. Yang, H., Chen, P., Jiang, Y., Tohgo, K., "Incremental damage theory of particulate-reinforced composites with a ductile interphase". *Composite Structures*, vol. 93, no. 10, pp. 2655-2662, 2011.
- [15]. Ye, J., Chu, C., Zhai, Z., Wang, Y., Shi, B., Qiu, Y., "The Interphase Influences on the Particle-Reinforced Composites with Periodic Particle Configuration". *Applied Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 102, 2017.
- [16]. Thumwong, A., Darachai, J. and Saenboonruang, K., "Comparative x-ray shielding properties of Single-Layered and Multi-Layered Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nr composites: simulation and numerical studies," *Polymers*, vol. 14, no. 9, p. 1788, 2022.
- [17]. Park, S.-E., Kim, H., Kim, Y., Kim, E. and Seo, Y., "Multilayer-Structured non-lead Metal/Polymer composites for enhanced x-ray shielding," *MRS Advances*, vol. 3, no. 31, pp. 1789-1797, 2018.

- [34]. Motakef Kazemi N., "Preparation and evaluation of bismuth oxide nanoparticles by thermal degradation of metal organic framework". In Persian, Medical Science Journal of Islamic Azad University, Tehran Medical Branch, vol. 31, No. 3, pp. 259-265, 2021.
- [35]. Ghorbankhan, A., Nakhaei, M.R, and Safarpour, P., "Modeling and Optimization of Mechanical Properties of PA6/NBR Nanocomposite Reinforced with Perlite Nanoparticles", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1421-1430, 2021.
- [36]. Soleymani, H., Fereidoon, A., Albooyeh, A., Nakhaei, M. R., "Effect of perlite nanoparticles addition on the mechanical and microstructure properties of PP/NR blend fabricated by melt mixing processing: Optimizing by Response Surface Approach," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2089-2098, 2023.
- [37]. Soleymani, H., Nakhaei, M. R., Naderi, Gh., "Experimental and mathematical investigation of mechanical and microstructural properties of PA6/NBR nanocomposite reinforced with silicon carbide (SiC) nanoparticles," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 4, pp.1789-1796, 2022.
- [38]. Taheri-Behrooz, Fathollah. Mahdavidzade, S. M. J. and Gholami, M. J., "Micromechanics of stress transfer through the interphase in pull out test of fiber through the resin", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 283-294, 2017.
- [39]. Watanabe, A., Phase equilibria in the system  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ : no possibility of delta- $\text{Bi}_2\text{O}_3$  stabilization. Solid State Ionics, Vol.86-88, pp. 1427-1430, 1996.
- [40]. Alipoor, M.R. and Eshghi, M., "Ionizing radiation shielding properties of ceramic fibers using Monte Carlo simulation," In Persian, Journal of The Iranian Ceramic Society, Vol.18, No. 4, pp. 48-56, 2023.
- [41]. Alipoor, M. and Eshghi, M., "Evaluation of carbon-platinum nanotubes in the performance of gamma ray shields". *Nano World*, Vol. 19, No. 72, pp. 1-9, 2023.



## تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته ساندویچی مخروطی با هسته مشبک کامپوزیتی بر مبنای روش‌های تجربی و عددی

ملیحه رهنما<sup>1</sup>، رضا حمزه لو<sup>2\*</sup>، محمد مراد شیخی<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* صندوق پستی 16846-13114، rehamzeloo@sru.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/11/07

پذیرش: 1402/12/17

### کلیدواژگان

پوسته ساندویچی مخروطی، هسته مشبک کامپوزیتی، آزمون مودال، شبیه‌سازی المان محدود

در این مطالعه، تحلیل مودال پوسته‌های ساندویچی مخروطی سه‌جزئی با یک هسته مشبک کامپوزیتی بر مبنای روش‌های تجربی و تئوری ارائه شده است. بدین منظور، دو نمونه از چنین ساندویچی متشکل از دو رویه همسان از پارچه کولار و هسته مشبک میانی با سلول‌های شش‌ضلعی منتظم و الیاف ترکیبی از شیشه - کربن ساخته شد. در ادامه، آزمون‌های مودال برای استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها بر مبنای جمع‌آوری داده‌ها از 40 نقطه بر روی سطح پوسته (پنج مقطع عرضی در راستای یال مخروط و هشت نقطه محیطی با زاویه 45° توسط دستگاه سرعت‌سنج لیزری انجام شده است. بر طبق نتایج تجربی، اختلاف فرکانس‌های طبیعی دو نمونه پوسته ساندویچی برای اولین شکل مود کمتر از 3٪ و برای دومین شکل مود تقریباً 6٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، کمترین خطا ممکن در طراحی مفهومی مراحل مختلف ساخت و در حین اجرای فرآیندها برای تولید پوسته ساندویچی مخروطی مشبک وجود داشته است. همچنین در ادامه به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از آزمون مودال، شبیه‌سازی عددی با استفاده از المان‌های سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفته است. مقایسه فرکانس‌های طبیعی مطابق با شکل مودهای مختلف بر مبنای روش‌های المان محدود آباکوس و تجربی نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد که حداکثر اختلاف در فرکانس طبیعی کمتر از 16٪ می‌باشد.

## Experiments and numerical simulations for free vibration analysis of sandwich conical shells with anisogrid composite lattice core

Malihe Rahnema<sup>1</sup>, Reza Hamzeloo<sup>1</sup>, Mohammad Morad Sheikhi<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran  
P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, rehamzeloo@sru.ac.ir

### Keywords

Sandwich conical shell,  
Composite lattice core,  
Modal test,  
Finite element method.

### Abstract

In this study, the modal analysis of sandwich conical shells with a composite lattice core was presented using experimental and numerical methods. For this purpose, samples of such sandwich were made of two identical Kevlar-fabric face sheets and a composite (glass-carbon fibers) lattice core with regular hexagonal cells. Next, modal tests were carried out to extract the natural frequencies and the mode shapes by collecting frequency responses using a laser accelerometer. Also, ABAQUS FE simulations were presented in order to validate the results obtained from modal tests using three-dimensional elements. According to the experimental results, the difference in the natural frequencies of samples is less than 3% for the first mode shape  $(m, n)=(1,2)$  and 6% for the second mode shape  $(m, n)=(1,3)$ . Therefore, it can be concluded that there is the least possible error in the conceptual design and the implementation of various manufacturing processes. In addition, there is good agreement between the results obtained from modal tests and ABAQUS finite element method, i.e. the maximum difference in natural frequencies of the first four mode shape is approximately 16%.

### 1- مقدمه

استحکام کمانشی و مقاومت به بار ضربه می‌باشند. ساختارهای مشبک با شبکه‌بندی‌های منتظم که از الیاف‌های (ریب‌ها) فلزی یا کامپوزیتی ساخته می‌شوند به عنوان یکی از پرکاربردترین هسته‌های تقویتی در ساندویچ‌ها می‌باشند [1]. به صورت کلی، هسته مشبک یک سازه مرکب شبکه‌ای با آرایش منتظم از المان‌های تیر که به یکدیگر متصل شده‌اند که یک محیط پیوسته

در بسیاری از کاربردها در صنعت هوافضا و عمران، از سازه‌های ساندویچی به دلیل استحکام بالا و قابلیت تحمل بار قابل توجه استفاده می‌شود [1-3]. به صورت متداول، ساندویچ‌ها متشکل از سه بخش مجزا شامل دو رویه بیرونی- درونی برای تحمل بارهای جانبی وارده به سازه و یک هسته سبک جهت افزایش

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Rahnema, M., Hamzeloo, R., Sheikhi, M. M., "Experiments and numerical simulations for free vibration analysis of sandwich conical shells with anisogrid composite lattice core." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2357-2362, 2024.  
https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2020606.1873

صفحه‌ای (دوبعدی) یا فضایی (سه‌بعدی) را تشکیل می‌دهند. به منظور کاهش وزن و افزایش هم‌زمان استحکام در راستای دلخواه، معمولاً از دو دسته ریب زاویه‌دار (مقاطع) با سطح مقطع و جنس ماده همسان استفاده می‌گردد. از سوی دیگر از آنجایی که در بسیاری از کاربردهای مهندسی سازه تحت‌گرداییان دمای بالا قرار می‌گیرد، استفاده از پارچه‌ها و فایبرها کامپوزیتی به ترتیب در تولید رویه‌ها و هسته‌های مشبک به سرعت در حال افزایش می‌باشد [1-3]. یک لایه مشبک با ریب‌های کامپوزیتی در مقایسه با رویه‌های همگن و کامپوزیتی پیوسته کلاسیک دارای نسبت کمتری از وزن به استحکام و قابلیت تحمل بار بیشتری می‌باشد، که علاوه بر کاهش مواد مصرفی (به تبع آن هزینه‌ها)، آن‌ها را مناسب برای استفاده در اکثر کاربردهای عملی در محیط‌های حرارتی و تحت نیروهای اینرسی می‌نمایند. علاوه بر این ویژگی‌ها، باید این نکته را ذکر کرد که ساختارهای مشبک دارای قابلیت بالای جذب انرژی و مقاوم در برابر عوامل خوردگی می‌باشند.

## 2- روش تجربی (ساخت و آزمون مودال)

در دهه‌های اخیر، بررسی رفتار مکانیکی پوسته‌های ساندویچی با یک هسته مشبک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته شده است. در این زمینه، شاتاو و همکاران [4] با استفاده از روش المان محدود و تئوری کلاسیک پوسته مقادیر کم‌انرژی و شکل مودهای پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های غیر همسانگرد مشبک که تحت فشار هیدرواستاتیک می‌باشند، ارائه دادند. زارعی و همکاران [5]، رفتار کم‌انرژی پوسته‌های مخروطی ساندویچی چندلایه با هسته تقویت‌شده مشبک را بر مبنای تئوری مرتبه اول برشی و روش سفتی معادل مطالعه کردند. یانگ و همکاران [6] با بکار بردن روش‌های تجربی و المان محدود، آسیب‌پذیری مبتنی بر رفتار ارتعاشاتی پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های مشبک کربنی موج‌دار را بررسی نمودند. شاهقلیان و همکاران [7]، به بررسی رفتار ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های مشبک بر مبنای روش تجربی و شبیه‌سازی عددی پرداخته‌اند. فلاح و همکاران حل‌های تحلیلی برای رفتار کم‌انرژی [8] و پس‌کمانشی [9] پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی غیرهمسانگرد که تحت بارگذاری ترکیبی ترمومکانیکی می‌باشند، با استفاده از تئوری مرتبه اول برشی دائل ارائه دادند. چای و همکاران [10]، رفتار کم‌انرژی حرارتی ورق‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک خرپایی چهارضلعی و تحت جریان مافوق صوت را مطالعه نمودند. نظری و همکاران [11]، بر اساس روش‌های تجربی و عددی رفتار ارتعاشاتی پوسته‌های کامپوزیتی فلز و الیاف تقویت‌شده با هسته مشبک مورد مطالعه قرار دادند. شاهقلیان و همکاران [12]، کم‌انرژی پوسته‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته ایزوگرید تحت فشار خارجی یکنواخت را به صورت تحلیلی بررسی نمودند. کارتونن و همکاران [13]، مدل‌های المان محدودی بر اساس تئوری‌های تیموشنکو و اوپلر-برنولی برای تیرهای ساندویچی با هسته مشبک پیشنهاد دادند. لی و همکاران [14]، شبیه‌سازی‌های عددی برای بدست آوردن پاسخ

دینامیکی پوسته استوانه‌ای ساندویچی با هسته مشبک لانه‌زنبوری تحت ضربه با سرعت پایین را اجرا نمودند. زارعی و رحیمی [15]، رفتار کم‌انرژی پوسته‌های چند بخشی متصل استوانه‌ای-مخروطی ساندویچی با هسته مشبک که تحت فشار خارجی می‌باشند را با استفاده از تئوری مرتبه اول برشی لایه و روش المان محدود مطالعه نمودند. مروری بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون رفتار ارتعاشات آزاد پوسته‌های ساندویچی مخروطی سه‌جزئی با هسته مشبک کامپوزیتی به صورت تجربی بررسی نشده است. همچنین فقط مطالعات بسیار محدودی برای استخراج فرکانس‌های طبیعی چنین پوسته‌هایی با استفاده از روش‌های تئوری

به صورت کلی فرآیندهای ساخت چنین پوسته ساندویچی را می‌توان طی چهار مرحله شامل: 1- تولید قالب فومی، 2- رویه درونی، 3- هسته مشبک کامپوزیتی و 4- رویه بیرونی تقسیم‌بندی نمود، که در ادامه هر یک از آن‌ها به صورت مختصر توضیح داده می‌شود. در گام اول، ابتدا یک مدل سه‌بعدی از قالب مخروطی شکل با استفاده از نرم‌افزار کتیا فراهم می‌شود و با خروجی کورل‌دراو به دستگاه ماشین‌کاری CNC منتقل می‌گردد. سرانجام با کنار هم قرار دادن بلوک‌های مختلف از جنس فوم فشرده پلی‌استایرن یک قالب مخروطی مطابق شکل 2 برای تولید رویه داخلی آماده می‌شود. در گام دوم، ابتدا بر روی قالب به صورت کامل واکس زده خواهد شد و سپس در دو مرتبه پارچه کولار با استفاده از رزین اپوکسی 50 روی سطح قالب فومی مخروطی شکل پیچانده می‌شود. با انجام پخت در به مدت یک روز در دمای محیط رویه داخلی مطابق شکل 3a ساخته می‌شود.

در ادامه روش تجربی فرآیند انجام آزمون‌های مودال برای استخراج پارامترهای ارتعاشاتی دو نمونه ساخته شده شامل: فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها، به صورت مختصر شرح داده شده است. بدین منظور، سطح پوسته مشبک مخروطی ناقص را بر مبنای پنج مقطع عرضی در راستای یال مخروط و با هشت نقطه محیطی با زاویه  $45^\circ$  تقسیم‌بندی و مطابق شکل 4 معلق می‌گردد. سپس تحریک‌کننده هارمونیک به نقطه شماره 41 چسبانده می‌شود و با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج لیزری پاسخ فرکانسی هر نقطه را ظرف مدت یک دقیقه (مدت داده‌برداری) جمع‌آوری شده و پردازش آن‌ها انجام می‌پذیرد.

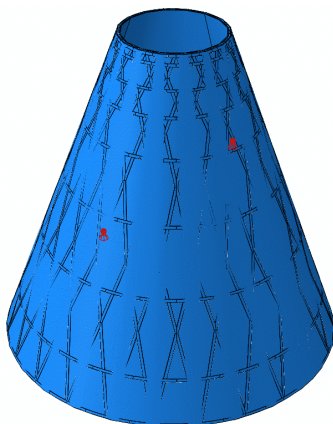


**Fig. 4** The experimental setup and equipment for modal test of anisogrid composite lattice conical shell

شکل 4 معلق‌سازی و شبکه‌بندی پوسته مخروطی، تحریک‌کننده هارمونیک و سرعت‌سنج لیزری برای انجام آزمون‌های مودال

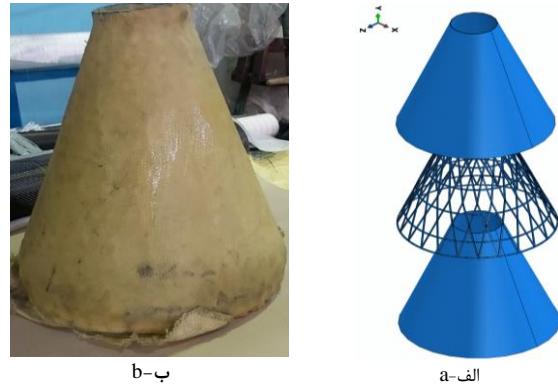
### 3- شبیه‌سازی المان محدود

در این بخش به منظور صحت‌سنجی و ارزیابی نتایج تجربی، مدل‌های المان محدودی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای رویه‌های کولار و هسته مشبک کامپوزیتی با سلول‌های شش‌ضلعی منتظم مطابق شکل 5 فراهم می‌گردد. اجزای مختلف پوسته مخروطی ناقص ساندویچی شامل: رویه‌های درونی-بیرونی و هسته مشبک کامپوزیتی با استفاده از المان‌های سه‌بعدی C3D8R مدل‌سازی شده‌اند.



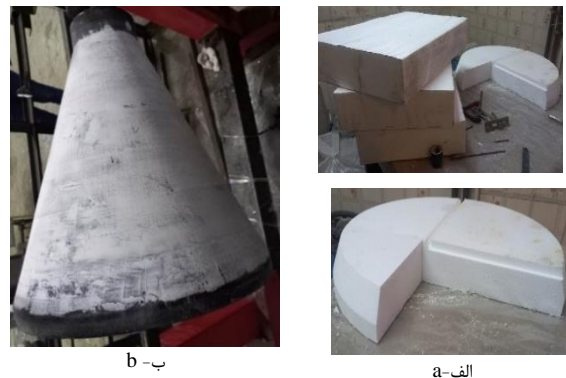
**Fig. 5** The finite element models of sandwich truncated conical shell  
شکل 5 مدل المان محدودی از پوسته مخروطی ساندویچی

دوم پارچه کولار روی سطح پیچانده می‌شود و به مدت یک روز در دمای محیط نگه داشته می‌شود. در نهایت به منظور تکمیل فرآیند ساخت پوسته ساندویچی سه‌جزئی، جداسازی قالب و استحکام بخشی، سازه به مدت 12 ساعت در دستگاه اتوکلاو در دمای 180 درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد.



**Fig. 1** (a) The schematic model and (b) specimen of three-skin truncated conical shells made of Kevlar skins and anisogrid composite lattice core

شکل 1 (الف) مدل شماتیک سه‌بعدی و (ب) یک نمونه ساخته شده پوسته مخروطی ناقص ساندویچی سه‌جزئی شامل دو رویه کولار همسان و یک هسته مشبک کامپوزیتی



**Fig. 2** (a) Several cutting block and (b) fabrication of truncated conical foam mold

شکل 2 (الف) بلوک‌های مختلف و (ب) ساخت قالب مخروطی شکل از جنس فوم پلی‌استایرن

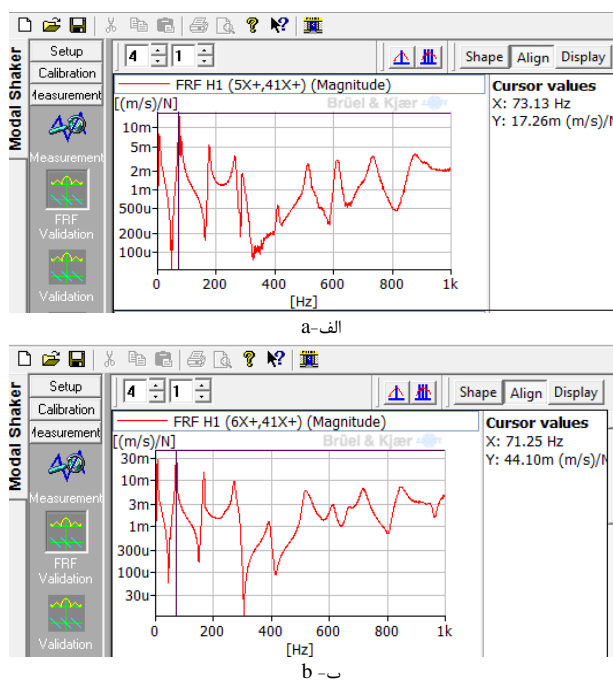


**Fig. 3** (a) The Kevlar inner skin and (b) vacuum process of anisogrid composite lattice core

شکل 3 (الف) رویه داخلی از جنس کولار و (ب) فرآیند وکیوم سازه فرآیند ساخت رویه داخلی کولار و هسته مشبک کامپوزیتی

#### 4- نتایج عددی و بحث

در بخش حاضر، به بررسی و بحث بر روی پارامترهای مودال نظیر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها حاصل از روش‌های تجربی پرداخته می‌شود و همچنین مطالعات صحت‌سنجی در مقایسه با نتایج المان محدود ارائه می‌شود. در مطالعه اول به منظور تأیید دقت طراحی و صحت‌سنجی اجرای فرآیندهای ساخت، پاسخ‌های فرکانسی، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها برای دو نمونه ساخته شده از پوسته‌های مخروطی ناقص ساندویچی با هسته مشبک با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در شکل 7، پاسخ فرکانسی مربوط به نقطه شماره یک از دو نمونه تحت تحریک هارمونیک ارائه شده‌اند.



**Fig. 7** Comparison between the frequency response function (FRF) for two samples of the anisogrid composite lattice sandwich conical shell  
شکل 7 پاسخ فرکانسی مربوط به دو نمونه ساخته شده از پوسته‌ی ساندویچی مشبک تحت تحریک هارمونیک

همان‌طور که دیده می‌شود که تطابق قابل قبولی بین رفتار رزونانسی و فرم منحنی پاسخ‌های فرکانسی دو نمونه ساخته شده از پوسته مخروطی ساندویچی مشبک وجود دارد. همچنین اولین و دومین شکل مود استخراج‌شده بر مبنای آزمون‌های مودال برای دو نمونه در شکل 8 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود که تطابق بسیار خوبی بین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای هر دو نمونه ساخته شده از پوسته مخروطی ساندویچی مشبک وجود دارد. برای مثال اختلاف فرکانس‌های طبیعی میان دو نمونه برای اولین و دومین شکل مود به ترتیب در حدود 3٪ و 6٪ می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طراحی مفهومی مراحل تولید، اجرای فرآیندهای ساخت اجزای مختلف پوسته مخروطی ساندویچی شامل رویه‌های کولار و هسته مشبک کامپوزیتی و انجام آزمون‌های مودال با کمترین خطا ممکن انجام پذیرفته است.

برای دومین مثال اعتبارسنجی، توانایی و عملکرد روش المان محدود آباکوس برای مطالعه رفتار ارتعاشاتی پوسته‌های مخروطی سه‌جزئی با یک هسته مشبک کامپوزیتی ارزیابی می‌گردد.

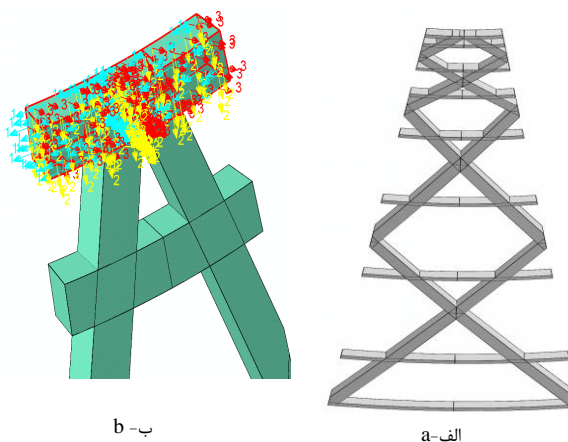
در ادامه به صورت مختصر جزئیات مدل‌سازی سه لایه پوسته ساندویچی بر روی یکدیگر شرح داده می‌شود: در ابتدا مدل‌های رویه‌های بیرونی و داخلی بصورت مخروط ناقص با استفاده از المان‌های سه‌بعدی تغییر شکل‌پذیر ایجاد شد. سپس هسته مشبک داخلی که براساس هندسه مول سلولی در شکل 6a بصورت چیدمان تکرار محوری و با مقیاس افزایشی در طول یال مخروط ایجاد شده و کنار هم قرار گرفته بودند بصورت یک مدل مخروط ناقص متقارن مدور ایجاد گردید [16]. در گام بعدی، خواص مکانیکی شامل مدول‌های الاستیسیته، مدول برشی، ضریب پواسون و چگالی مطابق با جدول 1، به مدل‌های سه‌بعدی رویه‌ها و هسته مشبک اختصاص می‌یابد.

جدول 1- خواص مکانیکی اجزای پوسته ساندویچی مخروطی شکل

**Table 1** Material properties for various components of sandwich conical shells

اجزای ساندویچ	خواص مکانیکی					
	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$\nu_{12}$	$G_{12}$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
رویه کامپوزیتی	30	30	7	0.2	5	0.34
ریبها	70	7.5	7.5	0.3	4.5	0.34

باید به این نکته اشاره گردد که با توجه به ماهیت جهت‌دار بودن ماده مورد استفاده (کامپوزیت) برای تولید ریب‌های مشبک، لازم می‌باشد که جهت مناسب برای خواص مکانیکی مورد نظر در روی ریب‌های مطابق شکل 6b انتخاب شود. لازم به اشاره می‌باشد که یکی از موارد مهم برای پیش‌بینی دقیق رفتار ارتعاشاتی سازه‌ها مطابق با نتایج تجربی، تعیین صحیح خواص مکانیکی اجزای سازنده برای استفاده در روش‌های المان محدود می‌باشد. در جدول 1، خواص مکانیکی مربوط به پارچه کولار که برای تولید رویه‌های درونی-بیرونی بکاربرده شده است، توسط شرکت سازنده با توجه به استاندارد ASTM ارائه شده است. همچنین، خواص مکانیکی ریب‌های هلیکال و محیطی هسته مشبک که ترکیبی از الیاف کربن و شیشه می‌باشند، با توجه به قانون مخلوط‌ها و درصد حجمی الیاف‌ها تعیین می‌شود. در گام پایانی، برای مونتاژ این سه رویه، از کلیرانس فاصله استفاده شد و در نهایت المان‌های آن‌ها به یکدیگر با استفاده از قید tie یکپارچه شدند.

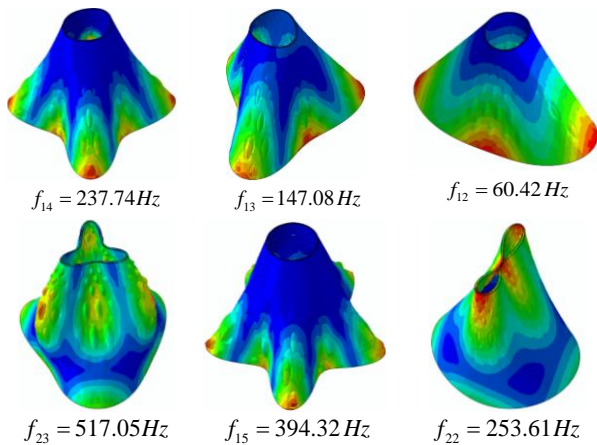


**Fig. 6** (a) The sector of lattice core and (b) material orientation in ABAQUS FE software

شکل 6 جزئیات مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس: (الف) قطاعی از مدل سه‌بعدی هسته مشبک و (ب) جهت‌دهی خواص مکانیکی

همچنین مهم‌ترین دلایل برای خطای قابل قبول در نتایج المان محدود، وجود تلورانس‌های کوچک در مدل‌سازی هندسی و تعیین دقیق خواص مکانیکی اجزای مختلف می‌باشد. به صورت کلی از مدل المان محدود پیشنهادی می‌توان برای طراحی و تحلیل رفتار مکانیکی گلوبال پوسته‌های مخروطی ساندویچی با هسته مشبک با دقت کافی استفاده نمود.

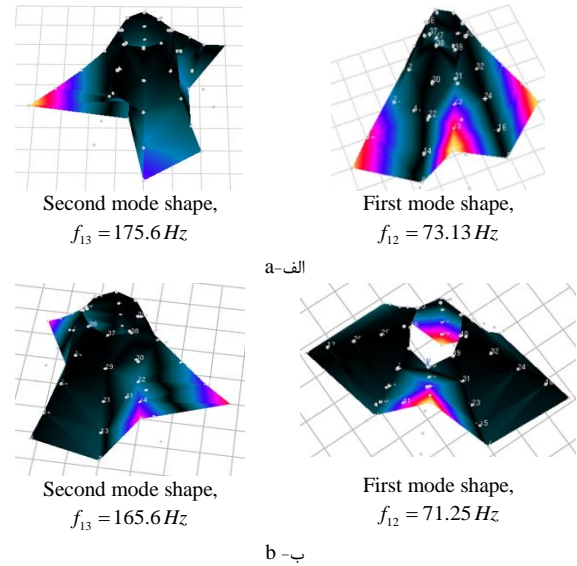
در شکل 10، شش شکل مود اول و فرکانس‌های طبیعی مطابق آن‌ها پیش‌بینی شده توسط حل المان محدود آباکوس برای چنین پوسته مخروطی ساندویچی مشبک با شرایط تکیه‌گاهی دو سر آزاد نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، برای کوچک‌ترین مقدار فرکانس طبیعی چنین سازه‌ای تنها یک نیم موج در راستای طولی یال مخروط و دو موج کامل در راستای محیطی پوسته‌های مخروطی ناقص ساندویچی ایجاد شده است. همچنین برای سه شکل مود اول مربوط به ارتعاشات پوسته مخروطی، تعداد نیم موج در راستای طولی ثابت باقی می‌ماند و فقط تعداد موج‌های در جهت محیطی افزایش می‌یابد.



**Fig. 10** The first six natural frequencies and mode shapes of the sandwich lattice conical shell predicted by the finite element method  
شکل 10 شش شکل مود اول و فرکانس‌های طبیعی مطابق به آن‌ها پوسته مخروطی ساندویچی مشبک پیش‌بینی شده توسط حل المان محدود آباکوس

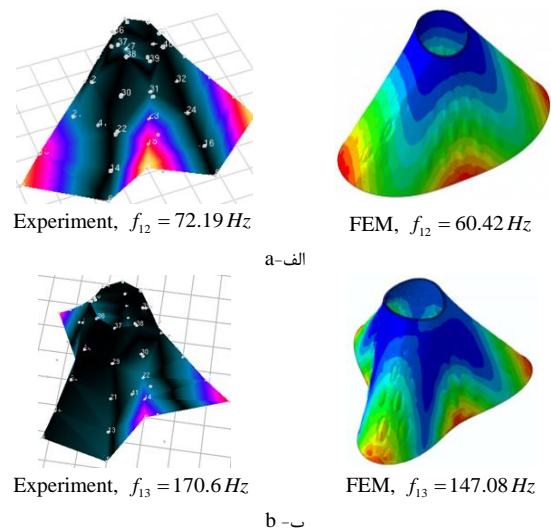
### 5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، تحلیل مودال تجربی و شبیه‌سازی المان محدود برای ارتعاشات آزاد پوسته‌های مخروطی ناقص ساندویچی سه‌جزئی ارائه شده است. بدین منظور، دو نمونه از چنین ساختار ساندویچی متشکل از رویه‌های همسان درونی و بیرونی از جنس پارچه کامپوزیتی کولار و یک هسته مشبک با سلول‌های شش‌ضلعی و ریب‌های ترکیبی از الیاف‌های کربن-شیشه ساخته شده است. ابعاد هندسی و جنس لایه نمونه‌های ساخته شده مطابق و سازگار با شرایط عملیاتی در کاربردهای صنعتی در نظر گرفته شده است. سپس آزمون‌های مودال بر روی دو نمونه برای تعیین پاسخ‌های فرکانسی، فرکانس‌های طبیعی و شکل موده‌های پوسته‌های مشبک ساندویچی تحت تحریک‌کننده هارمونیک بر مبنای جمع‌آوری داده‌ها از چهار نقطه (پنج مقطع عرضی در راستای یال و هشت نقطه در راستای محیطی در هر مقطع) توسط دستگاه سرعت‌سنج لیزری انجام می‌پذیرد. در بخش تئوری، شبیه‌سازی المان محدود متعددی برای تحلیل رفتار ارتعاشات آزاد پوسته مخروطی ساندویچی مشبک کامپوزیتی با لبه‌های آزاد با استفاده از المان‌های سه‌بعدی C3D8R در نرم‌افزار آباکوس انجام پذیرفته است. مقایسه نتایج تجربی دو نمونه از پوسته



**Fig. 8** Comparison between the modal test results predicted for samples (a) A and (b) B of the anisogrid lattice sandwich conical shell  
شکل 8 مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی و شکل موده‌های نمونه‌های (الف) اول و (ب) دوم پوسته مخروطی ساندویچی

بدین منظور در شکل 9، فرکانس‌های طبیعی مطابق اولین و دومین شکل موده‌های ارتعاشاتی حاصل از مدل المان محدود آباکوس با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود مدل المان محدود آباکوس می‌تواند فرم تغییرشکل‌ها و فرکانس‌های ارتعاشات خطی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید. مدل المان محدود بر طبق نرم‌افزار آباکوس مقادیر فرکانس‌های طبیعی برای اولین شکل مود 16٪ و برای دومین شکل مود 14٪ کمتر از نتایج آزمون مودال تخمین می‌زند. لازم به اشاره است که فرکانس‌های طبیعی بر اساس روش تجربی برای هر شکل مود میانگین نتایج حاصل از هر دو نمونه می‌باشد.



**Fig. 9** Comparison between natural frequencies and mode shapes predicted by the experimental and FE methods: (a) the first  $(m,n) = (1,2)$  and (b) second  $(m,n) = (1,3)$  mode shapes.

شکل 9 مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی و شکل موده‌های پیش‌بینی شده توسط حل المان محدود آباکوس و روش تجربی برای (الف) اولین و (ب) دومین شکل مود

[16] Barbero, E. J., "Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus," Second ed., CRC press, 2023.

ساندویچی نشان می‌دهد تطابق قابل قبولی بین رفتار رزونانسی وجود دارد و حداکثر اختلاف فرکانس‌های طبیعی برای اولین و دومین شکل‌مود به ترتیب در حدود 3٪ و 6٪ می‌باشند. همچنین مدل‌سازی المان محدود آباکوس می‌تواند شکل مودها و فرکانس‌های ارتعاشات خطی مطابق را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید، برای نمونه فرکانس‌های طبیعی مطابق با اولین و دومین شکل‌مود به ترتیب 16٪ و 14٪ کمتر از نتایج تجربی تخمین زده شده است.

## 6- مراجع

- [1] Vasiliev, V. V., and Morozov, E. V., "Advanced mechanics of composite materials and structures," Fourth ed., Elsevier, 2018.
- [2] Davies, J. M., "Lightweight sandwich construction," First ed., John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Vinson, J. R., "The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials," First ed., Routledge, New York, 1999.
- [4] Shatov, A. V., Burov, A. E., and Lopatin, A. V., "Buckling of composite sandwich cylindrical shell with lattice anisogrid core under hydrostatic pressure.," In Journal of Physics: Conference Series IOP Publishing, Vol. 1546, No. 1, pp. 01213, 2020.
- [5] Zarei, M., Rahimi, G. H., and Hemmatnezhad, M., "Global buckling analysis of laminated sandwich conical shells with reinforced lattice cores based on the first-order shear deformation theory," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 187, No. 12, pp.10587, 2020.
- [6] Yang, J. S., Liu, Z. D., Schmidt, R., Schröder, K. U., Ma, L., and Wu, L. Z., "Vibration-based damage diagnosis of composite sandwich panels with bi-directional corrugated lattice cores," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 131, No. 4, pp. 105781, 2020.
- [7] Shahgholian-Ghahfarokhi, D., Rahimi, G., Zarei, M., and Salehipour, H., "Free vibration analyses of composite sandwich cylindrical shells with grid cores: Experimental study and numerical simulation," Mechanics Based Design of Structures and Machines, Vol. 50, No. 2, pp. 687-706, 2022.
- [8] Fallah, F., Taati, E., and Asghari, M., "Decoupled stability equation for buckling analysis of FG and multilayered cylindrical shells based on the first-order shear deformation theory," Composites Part B: Engineering, Vol. 154, No. 12, pp. 225-24, 2018.
- [9] Fallah, F., and Taati, E., "On the nonlinear bending and post-buckling behavior of laminated sandwich cylindrical shells with FG or isogrid lattice cores," Acta Mechanica, Vol. 230, No. 6, pp. 2145-2169, 2019.
- [10] Chai, Y., Li, F., and Song, Z., "Nonlinear flutter suppression and thermal buckling elimination for composite lattice sandwich panels," AIAA Journal, Vol. 57, No. 11, pp. 4863-4872, 2019.
- [11] Nazari, A., Naderi, A., Malekzadefard, K., and Hatami, A., "Experimental and numerical analysis of vibration of FML-stiffened circular cylindrical shell under clamp-free boundary condition," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 9-20, 2019.
- [12] Shahgholian-Ghahfarokhi, D., and Rahimi, G., "New analytical approach for buckling of composite sandwich pipes with isogrid core under uniform external lateral pressure," Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 23, No. 1, pp. 65-93, 2021.
- [13] Karttunen, A. T., Reddy, J. N., and Romanoff, J., "Two-scale constitutive modeling of a lattice core sandwich beam," Composites Part B: Engineering, Vol. 160, No. 3, pp. 66-75, 2019.
- [14] Li, C., Shen, H. S., and Yang, J., "Low-velocity impact response of cylindrical sandwich shells with auxetic 3D double-V meta-lattice core and FG GRC facesheets," Ocean Engineering, Vol. 262, No. 10, pp. 112299, 2022.
- [15] Zarei, M., & Rahimi, G. H., "Buckling resistance of joined composite sandwich conical-cylindrical shells with lattice core under lateral pressure," Thin-Walled Structures, Vol. 174, No. 5, pp. 109027, 2022.



## بازطراحی، تحلیل مودال و تحلیل تنش تیر تقویتی داشبورد

مجید صفرآبادی<sup>1\*</sup>، محسن صداقت<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14399-57131، msafarabadi@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/12/01

پذیرش: 1403/02/29

### کلیدواژگان

تیر تقویتی داشبورد،

تشدید،

فرکانس طبیعی،

چندلایه فلز الیاف

### چکیده

در قلب داشبورد یک خودرو، یک ساختار پشتیبانی کننده با عنوان تیر تقویتی داشبورد برای تحمل بارها و پاسخ به نیروهای تصادف وجود دارد. تیر تقویتی داشبورد ستون اصلی داشبورد شناخته می‌شود. چراکه عملکرد آن شامل ایمنی، پشتیبانی سازه‌ای از مجموعه داشبورد و برآورده کردن استانداردهای صدا، لرزش و سفتی می‌باشد. اگر فرکانس‌های طبیعی ساختار تیر تقویتی داشبورد با یکی از فرکانس‌های تحریک‌کننده آن همپوشانی داشته باشند، پدیده‌ای به نام تشدید رخ می‌دهد. با توجه به پایین بودن سفتی تیر تقویتی موجود، برای جلوگیری از این پدیده مخرب، پاسخ مودال مجموعه تیر تقویتی مورد مطالعه و اصلاح قرار گرفت. در این مقاله با تغییر جنس تیر تقویتی از فلزی به کامپوزیتی پایه پلیمری، تیر مورد طراحی مجدد قرار گرفت و عملکرد ارتعاشی و تحلیل تنش آن انجام شد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد تغییر جنس تیر فلزی به کامپوزیت شیشه/اپوکسی، کربن/اپوکسی و چندلایه فلز/الیاف/اپوکسی باعث افزایش 18 درصدی فرکانس طبیعی می‌شود. به منظور جلوگیری از تشدید به مقدار بیشتری افزایش فرکانس طبیعی نیاز است لذا در کنار تغییر جنس به کامپوزیت، برای کاهش درجه آزادی تیر تعدادی تکیه‌گاه جهت اتصال تیر به بدنه خودرو، اضافه شد. اعمال هم‌زمان تغییر جنس و کاهش درجه آزادی افزایش 460 درصدی فرکانس طبیعی را در پی داشت. از آنجایی که افزایش بیش از حد فرکانس طبیعی منجر به بالا رفتن صلبیت سازه و در نتیجه تمرکز تنش خواهد شد، تحلیل عددی تنش صورت گرفت و در نهایت لایه‌چینی مناسب برای تیر تقویتی داشبورد پیشنهاد گردید.

## Redesign, modal analysis and stress analysis of cross car beam

Majid Safarabadi<sup>1\*</sup>, Mohsen Sedaghat<sup>1</sup>

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14399-57131, Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

### Keywords

Cross car beam,  
Resonance,  
Natural frequency,  
Fiber in metal laminate

### Abstract

As components of the car's dashboard, there is a support structure which is called cross-car beam (CCB). This beam bears the loads and respond to crash forces. Cross-car beam is essential, because its functions include safety, structural support of the instrument panel and passing sound, vibration and harshness (NVH) standards. If the natural frequencies of the cross-car beam overlap with one of the excitement frequencies, a phenomenon known as resonance occurs. According to the low stiffness of the cross-car beam, the modal response of the cross-car beam should be studied and modified to avoid this destructive phenomenon. In this article, by changing the material of the cross-car beam from steel to polymer-based composite, the beam was redesigned and its vibration performance and stress analysis were performed. The simulations showed that changing the material of the metal beam to glass-epoxy composite, carbon-epoxy composite and fiber in metal laminate (FML) increased the natural frequency by 18%. In order to avoid resonance, more increasing is required for natural frequency amount. Therefore, several supports were added to connect beam to car body and reduce degree of freedom. Changing the material and increasing supports at the same time resulted 460% increasing for natural frequency. Because excessive increase of natural frequency will lead to increasing structure rigidity and as a result stress concentration, so numerical stress analysis was done and finally a suitable laminated composite was suggested for cross-car beam.

## 1- مقدمه

تحلیل رفتار سازه با استفاده از نرم‌افزارهای روش اجزای محدود<sup>1</sup>، برای طراحان خودرو از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. این روزها، در میان تحلیل‌های مختلفی که بر روی خودرو انجام می‌شود، شبیه‌سازی تصادف و تحلیل صدا، لرزش و سفتی<sup>2</sup> به طور فزاینده‌ای برای برنامه توسعه وسیله نقلیه جدید ضروری است. [1]

در قلب داشبورد خودرو یک ساختار پشتیبانی با عنوان تیر تقویتی داشبورد وجود دارد که نقش کلیدی در فضای داخلی خودرو ایفا می‌کند و ستون اصلی داشبورد شناخته می‌شود. چراکه عملکرد آن شامل ایمنی، پشتیبانی سازه‌ای از مجموعه داشبورد و برآورده کردن استانداردهای صدا، لرزش و سفتی می‌باشد [2].

شکل 1 یک نمونه تیر تقویتی داشبورد را نمایش می‌دهد. عملکردهای اصلی تیر تقویتی داشبورد را می‌توان در چند نکته شرح داد [3]:

- تیر تقویتی داشبورد تحت بار گسترده است که جرم ستون فرمان را از طریق اتصالات آن با بدنه خودرو در طرفین، بالا و پایین، به بدنه منتقل می‌کند.
- این ساختار همچنین از تمام اجزا و سیستم‌های زیرمجموعه داشبورد از جمله جعبه فیوز، سیستم گرمایش و تهویه مطبوع<sup>3</sup>، ستون فرمان، سیستم صوتی، کیسه هوا، سیم‌کشی برق، سیستم ناوبری و بسیاری از اجزا و سیستم‌های دیگر پشتیبانی می‌کند.
- در صورت وقوع تصادف، مسئولیت تیر تقویتی داشبورد و جاذب-های انرژی آن است که تحت نیروی تصادف تغییر شکل دهند و از انتقال نیروی حاصل از ضربه شدید به سرنشینان جلوگیری کنند.
- تیر تقویتی داشبورد جزء اصلی اسکلت بدنه خودرو است که در یکپارچگی و سفتی کلی آن مشارکت می‌کند و بر پاسخ فرکانسی کل خودرو تأثیر می‌گذارد.

محدودیت‌های اصلی در طراحی تیر تقویتی داشبورد به عنوان صدا، ارتعاش و سفتی و همچنین عملکردهای قابلیت تصادف<sup>4</sup> شناخته می‌شوند. رعایت معیارهای خاصی که هر یک از این محدودیت‌ها را توصیف می‌کند، ضروری است. عملکرد استانداردهای صدا، لرزش و سفتی به فرکانس‌های طبیعی سازه و جدا نکه داشتن آن‌ها از فرکانس‌های منابع تحریک‌کننده، مربوط می‌شود. موتور، سیستم انتقال نیرو و سطح جاده منابع رایج برای لرزش هستند. اگر فرکانس‌های طبیعی ساختار تیر تقویتی داشبورد با یکی از فرکانس‌های تحریک‌کننده همپوشانی داشته باشند، پدیده‌ای به نام تشدید رخ می‌دهد. در تشدید، دامنه ارتعاش می‌تواند بسیار زیاد باشد (از لحاظ نظری می‌تواند تا بی‌نهایت باشد). چنین ارتعاشاتی با دامنه بالا می‌تواند صدای آزاردهنده قابل توجهی را در داخل و خارج خودرو ایجاد کند. همچنین می‌تواند به ستون فرمان منتقل شود و باعث ناراحتی و حواس‌پرتی راننده شود. برای جلوگیری از این پدیده مخرب، پاسخ مودال مجموعه تیر تقویتی داشبورد باید مورد مطالعه و اصلاح قرار گیرد [4].

## 1-1- تاریخچه

روش‌ها و مواد زیادی برای تولید، بهینه‌سازی و افزایش کارایی تیرهای تقویتی داشبورد خودرو وجود دارد. در پژوهشی توسط پیتروف و همکاران [5] استفاده از کامپوزیت پلاستیک تقویت‌شده با شیشه<sup>5</sup> در تیر تقویتی داشبورد باعث کاهش جرم خودرو شده است. به طوری که تیر کامپوزیتی طراحی شده از نظر فرکانس ارتعاشی و همچنین تحلیل خستگی می‌تواند به خوبی با تیر فولادی برابری کند. دای جیل لی و همکاران [6] در سال 2004 محور محرک<sup>6</sup> یک‌تکه کامپوزیتی را جایگزین محور محرک دوتکه فلزی به جهت آزمایش در خودروهای دیفرانسیل عقب کردند. در نتیجه 30 درصد عمر خستگی محور بهبود یافت. در مقاله‌ای دیگر [7] به طور خلاصه یک طراحی منحصر به فرد برای تیر تقویتی داشبورد منیزیمی<sup>7</sup> خودروی فورد جی تی 2005 توضیح داده شده است. ساختار تیر تقویتی منیزیمی، خودرو فورد جی تی را قادر می‌سازد تا با کاهش هزینه به عملکرد و اهداف ایمنی برسد. شانکار و همکاران [8] در سال 2006 به تحلیل و طراحی و ارائه ساخت کم‌هزینه فنر شمش<sup>8</sup> کامپوزیت با جنس پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداختند. نتایج نشان داد که فنر کامپوزیت در مقایسه با فنر فولادی دارای تنش‌های بسیار کمتر، فرکانس طبیعی بیشتر و از نظر جرمی نزدیک به 85 درصد کمتر است. درک چگونگی فرآیند طراحی و توسعه محصول برای محصولات پیچیده‌ای مانند تیر تقویتی داشبورد، هدف پایان‌نامه منتشرشده توسط آتاریتا [9] در سال 2013 است. راه‌حل‌های بسیار متنوعی در مورد طراحی و جنس پیدا شد. برای نتیجه‌گیری نهایی، تجزیه و تحلیل تیر تقویتی داشبورد با مواد مختلف مانند آلومینیوم و منیزیم، پلاستیک‌ها و در نهایت کامپوزیت‌ها برای کاهش جرم ارائه شد. یارانسون و همکاران [10] با استفاده از مواد ترکیبی جرم تیر تقویتی داشبورد را کاهش دادند. در نمونه‌ی تیر ساخته‌شده از جنس کامپوزیت کربن اپوکسی بافته‌شده، جرم تیر 5.2 کیلوگرم کاهش یافت که 30 درصد کمتر از نمونه اولیه با جنس فولاد است.

هدف از اجرای پروژه خودروی سبک‌وزن<sup>9</sup> در سال 2015 [11]، ارزیابی امکان دستیابی به سطح قابل توجهی از کاهش جرم خودرو از طریق تغییر جنس اجزا (الیازهای آلومینیوم و آلیاژهای منیزیم و کامپوزیت‌های الیاف کربن و ...) بوده است. آزمایش‌های کامل بر خودروهای توسعه‌یافته تأیید کرد که خودروهای توسعه‌یافته معادل خودروهای پایه عمل می‌کنند و در بهترین حالت جرم آن‌ها 761 کیلوگرم کاهش یافته است. در ادامه تحقیقات موجود در سال 2015، در مقاله‌ای به نوشته دوهیونگ کیم و همکاران [12]، ساخت تیر ضربه-گیر سپر کامپوزیت شیشه/کربن از طریق فرآیند بهینه‌سازی طراحی همراه با تحلیل ضربه، ارائه شده است. برای کاهش جرم تیر ضربه‌گیر، کامپوزیت ترموپلاستیک شیشه‌ای/کربن<sup>10</sup> جایگزین ترموپلاستیک شیشه‌ای معمولی<sup>11</sup> شده است. در این مقاله مشخص شده است که تیر کامپوزیت ترموپلاستیک شیشه‌ای/کربن با طراحی بهینه در مقایسه با تیر ترموپلاستیک شیشه‌ای معمولی، 33 درصد جرم کمتری دارد. در حالی که تیر کامپوزیت ترموپلاستیک شیشه‌ای/کربن عملکرد ضربه‌ای بهتری دارد. کیم‌دونگ هیون و همکاران در سال 2017 [13]، بهینه‌سازی طراحی یک درب موتور را با استفاده از ورقه‌های

<sup>7</sup> AM60B

<sup>8</sup> leaf spring

<sup>9</sup> Multi-Material Lightweight Vehicle (MMLV)

<sup>10</sup> GCMT

<sup>11</sup> GMT

<sup>1</sup> Finite element method

<sup>2</sup> Noise, vibration, and harshness (NVH)

<sup>3</sup> Heating, Ventilation, and Air Conditioning System (HVAC)

<sup>4</sup> قابلیت تصادف، توانایی یک سازه برای محافظت از سرنشینان خود در هنگام برخورد است.

<sup>5</sup> GFRP

<sup>6</sup> drive shaft

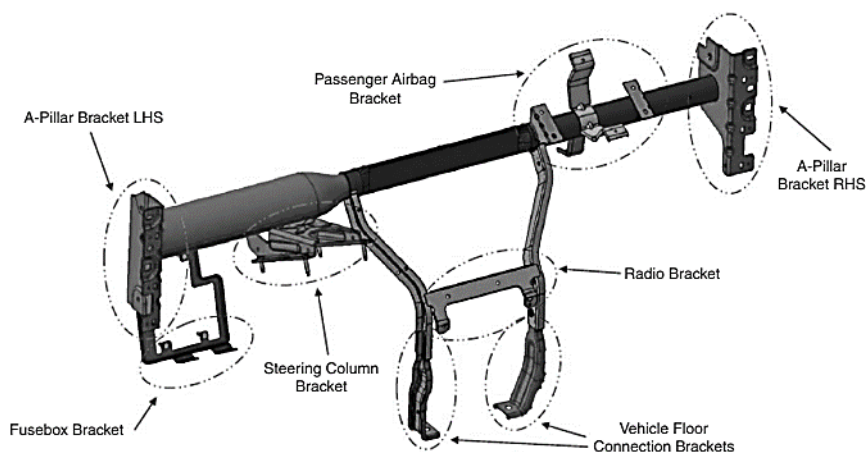


Fig. 1 Example of cross car beam [1]

شکل 1 نمونه تیر تقویتی داشبورد خودرو [1]

در سال 2021 در مقاله‌ای [18] دو نوع مجموعه ستون فرمان کامپوزیت و تیر تقویتی داشبورد تولید شده است: یکی از جنس پلی‌آمید<sup>66</sup> تقویت‌شده با الیاف کربن<sup>6</sup> با خواص مکانیکی بالا و دیگری پلی‌آمید<sup>66</sup> تقویت‌شده با الیاف شیشه<sup>7</sup> با خواص پایین‌تر. طبق آزمایش‌ها فرمان و تیر کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن می‌تواند نیاز عملکرد صدا و ارتعاش و سفتی را برآورده کند و می‌توان نتیجه گرفت الیاف کربن می‌تواند جایگزین مناسبی برای فولاد باشد. علی‌داور و همکاران [19] در مقاله‌ای در همان سال، تأثیر پارامترهای مختلف (از جمله نسبت حجمی حفره‌ها، ترتیب و شکل حفره‌ها، نسبت ضخامت به شعاع و نسبت طول به شعاع) را بر روی فرکانس‌های طبیعی یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیت یکپارچه بررسی کردند. تحلیل‌ها نشان داده است از آن-جایی که پوسته استوانه‌ای با خواص مکانیکی ارتوتروپیک<sup>8</sup> (پوسته کامپوزیتی) وزن سبک‌تری نسبت به پوسته استوانه‌ای با خواص مکانیکی ایزوتروپیک<sup>9</sup> (پوسته فلزی) دارد. در نتیجه فرکانس طبیعی 40 درصد افزایش داشته است. در پروژه‌های متعلق به سال 2022 [20]، یک تیر تقویتی داشبورد در برنامه کتیا<sup>10</sup> مدل و سپس در برنامه انسیس<sup>11</sup> با سه نوع جنس آلیاژ آهن و کربن، فولاد و آلیاژ آلومینیوم تحلیل شده است. همچنین بر روی هر سه نوع جنس، سه نیروی استاتیکی 100، 120، 150 نیوتنی اعمال شده است. طبق این مقاله، تغییر شکل‌های ایجاد شده در ساختار تیر برای فولاد بیشتر از آلیاژ آهن و کربن و آلیاژ آلومینیوم مشاهده شده است. اما میزان کرنش در آلیاژ آهن و کربن و آلیاژ آلومینیوم یکسان بوده است. با توجه به یکسان بودن نتایج، پایین بودن چگالی آلیاژ آلومینیوم مزیت قابل‌توجهی شناخته شده است. در یک مطالعه توسط کپاناتی و همکاران [21] در زمینه توسعه‌ی صفحه‌های کامپوزیتی چندلایه، رفتار ارتعاشی صفحه‌های پلیمری تقویت‌شده با گرافن<sup>12</sup>/الیاف کربن، پلیمری تقویت‌شده با گرافن و پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن مورد بررسی قرار می‌گیرد. گرافن به دلیل نازک بودن، سفتی و استحکام کششی عالی به یک نانومواد قابل توجه تبدیل شده است. بنابراین می‌توان از آن برای تقویت ماتریس پلیمری کامپوزیت‌ها، افزایش استحکام و سفتی آن‌ها استفاده کرد. در بین سه صفحه کامپوزیت مشاهده می‌شود که بالاترین فرکانس طبیعی برای

کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن<sup>1</sup> و کامپوزیت هیبریدی تقویت‌شده با الیاف شیشه<sup>2</sup>، بر اساس تحلیل اجزای محدود انجام دادند. درب‌های موتور کامپوزیتی عملکرد ضربه‌ای بهبود یافته و کاهش جرم قابل توجه را نشان دادند. همچنین درب موتور توسعه‌یافته الزامات خمشی و انحراف پیچشی را در مقایسه با درب موتور فولادی و آلومینیومی معمولی برآورده کرد. در مقاله‌ای دیگر در همین سال، پارک و همکاران [14] طراحی و تحلیل ساختاری درب موتور خودرو را با کامپوزیت‌های الیاف طبیعی کتان/وینیل استر<sup>3</sup> انجام دادند. از طریق طراحی سازه و آزمایش، تأیید شد که ساختار درب موتور طراحی شده قابل‌قبول است و در مقایسه با درب موتور فولادی، 31.7 درصد کاهش جرم را نشان می‌دهد. سوراخ و همکاران [15] در سال 2018 به‌منظور کاهش مصرف سوخت و کاهش جرم به بررسی استفاده از آلیاژ منیزیم به‌جای فولاد در تیر تقویتی داشبورد روی آوردند. پس از انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری و آزمون‌های آزمایشگاهی، مشخص شد که با استفاده از آلیاژ منیزیم، جرم تیر به 1.73 کیلوگرم کاهش می‌یابد که 73 درصد کمتر از تیر فولادی (5.8 کیلوگرم) و همچنین 34 درصد کمتر از تیر آلومینیومی می‌باشد. همچنین فرکانس اول جانبی و عمودی تیر بالای 100 هرتز بوده و قابلیت اطمینان بالایی دارد. بنابراین استفاده از منیزیم می‌تواند کاربرد بهینه‌تری نسبت به فولاد در تیر تقویتی داشبورد خودرو داشته باشد. در سال 2019 [16] یک فرمان ساخته‌شده از کامپوزیت‌های الیاف موز ارائه شد که به کاهش جرم و هزینه کمک کرده است و در نهایت باعث افزایش راندمان سوخت و ترویج سازگاری با محیط‌زیست شده است. در نتیجه این پروژه بدون ایجاد تغییری بر استحکام فرمان، جرم کل فرمان به میزان 50 درصد کاهش یافت. در مقاله‌ای دیگر [17] از کامپوزیت الیاف کربن تقویت‌شده با پلیمر<sup>4</sup> برای برآوردن نیاز افزایش ایمنی تصادف و کاهش جرم در جهت توسعه تیر تقویت‌کننده سپر استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تیر جدید نسبت به همتای یکنواخت خود در سبک‌وزنی و قابلیت تصادف برتری دارد و در نتیجه به عنوان یک رویکرد بهتر برای جایگزینی تیر فلزی معمولی توصیه شده است.

<sup>7</sup> GF  
<sup>8</sup> orthotropic  
<sup>9</sup> isotropic  
<sup>10</sup> Catia V5  
<sup>11</sup> Ansys  
<sup>12</sup> Graphene

<sup>1</sup> CFRP  
<sup>2</sup> CFRP/GFRP  
<sup>3</sup> flax/vinyl ester  
<sup>4</sup> CFRP  
<sup>5</sup> PA66  
<sup>6</sup> CF

## 2- معرفی مسئله و مدل سازی

نمونه مورد نظر از یک لوله به قطر 14 میلی متر و ضخامت 2 میلی متر تشکیل شده است که چندین براکت با جوشکاری به آن متصل شده اند. لوله و براکت های متصل به آن طبق استاندارد آمریکایی از فولاد با جنس 1010 با خواص مواد ذکر شده در جدول های 1 و 2 و 3 ساخته شده اند [25,24]. مدل کاملی که در کل کار استفاده می شود، بدون براکت ها و مجموعه ستون فرمان است.

جدول 1 خواص شیمیایی فولاد 1010 [24]

Table 1 Chemical properties of 1010 steel [24]

Element	Content (%)
Iron, Fe	99.18-99.62 %
Manganese, Mn	0.30-0.60 %
Sulfur, S	≤0.050 %
Phosphorous, P	≤0.040 %
Carbon, C	0.080-0.13 %

جدول 2 خواص فیزیکی فولاد 1010 [24]

Table 2 Physical properties of 1010 steel [24]

Properties	Metric
Density	7.87 gr/cm <sup>3</sup>

جدول 3 خواص مکانیکی فولاد 1010 [25]

Table 3 Mechanical properties of 1010 steel [25]

Young's Modulus (GPa)	200
Poisson's ratio	0.285
Total Elongation (%)	28.453
Yield Strength (MPa)	305
Tensile Strength (MPa)	395
Tensile/Yield	1.3
Uniform Elongation (%)	18.973

### 1-2- مدل طراحی شده با کامپیوتر

بر اساس ابعاد واقعی، نمونه مورد نظر با استفاده از نرم افزار کتیا توسعه داده شد و به عنوان مدل مرجع برای فرآیندهای طراحی و ارزیابی بعدی استفاده شد. شکل 2 مدل سه بعدی نمونه را نشان می دهد که برای این مقاله توسعه یافته است.

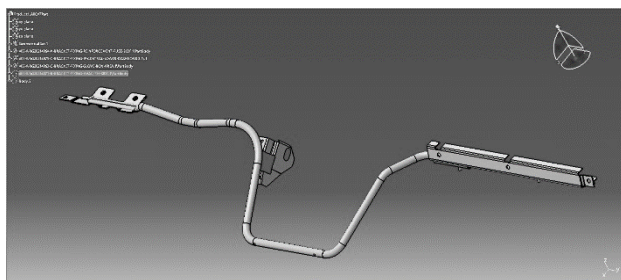


Fig. 2 3D model of the cross-car beam

شکل 2 مدل سه بعدی تیر تقویتی داشبورد

### 2-2- مدل مورد تحلیل با کامپیوتر

برای ساخت مدل المان محدود و تحلیل معیارهای صدا، لرزش و سفتی تیر تقویتی مورد نظر از نرم افزار آباکوس استفاده شد. به جهت کاهش هزینه های

صفحه کامپوزیت گرافن/ الیاف کربن برای تمام حالت های شرایط مرزی به دست می آید. همچنین نتایج نشان می دهد که فرکانس های طبیعی با افزایش نسبت حجمی گرافن افزایش می یابد. با افزودن 1 درصد گرافن به ماتریس پلیمری، فرکانس طبیعی تا 48.96 درصد افزایش می یابد.

علیرضا شوشتری و همکاران [22] در سال 2023 ارتعاشات عرضی صفحه کامپوزیتی از جنس شیشه/ اپوکسی تقویت شده با نانوذرات کربنی را مورد بررسی قرار دادند. تأثیر این نانوذرات و درصد جرمی آن ها بر روی فرکانس طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. در آخر نیز تأثیر پارامترهای هندسی شامل ضخامت و نسبت طول به عرض ورق در حالت های بدون تقویت کننده و تقویت شده توسط نانوذرات با درصد جرمی های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده با تقویت صفحه کامپوزیتی توسط نانوذرات کربنی، فرکانس طبیعی افزایش می یابد. همچنین با افزایش نسبت طول به عرض صفحه، فرکانس طبیعی افزایش می یابد.

در همین سال در مقاله ای توسط رضا آذر افزا [23] و همکاران، یک مدل فلنچ کامپوزیتی با هدف حداکثر سبک سازی ساخته شد. وظیفه ای این فلنچ اتصال پوسته های کامپوزیتی بزرگ به هم دیگر جهت ساخت یک سازی کامل می باشد. ارزیابی نتایج حاصل از آزمون ها و تحلیل عددی روی قطعات ساخته شده، نشان دهنده فرکانس ویژه بالای کامپوزیت نسبت به وزن در مقایسه با نوع فولادی و آلومینیومی می باشد. همچنین عامل تورق در تیغه فلنچ کامپوزیتی بیشتر از آن که باعث شکست ماتریس و الیاف شود، در افزایش طول سازه بر اثر نیروی کشش تأثیر داشته است.

### 2-1- بیان مسئله و نوآوری

در این مقاله با توجه به عدم تأمین معیارهای صدا، لرزش و سفتی و استحکام در طراحی تیر تقویتی داشبورد مورد نظر، راه حل تغییر جنس با هدف ایجاد استحکام قابل قبول، بهبود عملکرد ارتعاشی و افزایش فرکانس طبیعی بیان می شود. علاوه بر این، اثرات تغییرات مواد بر جرم تیر تقویتی داشبورد مورد نظر پیش بینی می شود تا هزینه های تولید بر اساس داده های هزینه موجود محاسبه شود. بنابراین نوآوری این مقاله باز طراحی و تحلیل تیر تقویتی داشبورد با رویکرد تغییر جنس، سبک سازی، کاهش درجه آزادی تیر و در نهایت افزایش فرکانس طبیعی است.

### 3-1- خلاصه مقاله

در این بخش از ابتدا به معرفی تیر تقویتی داشبورد و اهمیت و کاربردهای آن در خودرو پرداخته شد. سپس با بررسی تاریخچه پژوهش و بیان مشکل موجود در مورد تیر تقویتی داشبورد مورد نظر به طور خلاصه، راه حل تغییر جنس به جهت بهبود مسئله مطرح گردید. بخش دوم این مقاله به شرح مدل سازی (طراحی<sup>1</sup> و تحلیل مهندسی<sup>2</sup> به کمک کامپیوتر) می پردازد. سپس در بخش سوم روش تغییر جنس و افزایش تکیه گاه به جهت بهبود عملکرد داشبورد ارائه می گردد. همچنین در بخش چهارم به روش های تحلیلی تیر تقویتی یعنی تحلیل تنش و مودال به صورت کامل اشاره می شود. از آن جایی که تمام تمرکز این مقاله بر روی تحلیل های عددی و المان محدود است، تمام اقدامات لازم به جهت اعتبار سنجی<sup>3</sup> داده ها و راستی آزمایی<sup>4</sup> در بخش پنجم شرح داده می شود. در همین بخش نتایج حاصل از مدل سازی های عددی روش معرفی شده بیان می شود. در نهایت به عنوان آخرین بخش نتیجه گیری کلی مقاله بیان می گردد.

<sup>3</sup> validation  
<sup>4</sup> verification

<sup>1</sup> Computer-aided design (CAD)  
<sup>2</sup> Computer-aided engineering (CAE)

جدول 5 خواص فیزیکی و مکانیکی شیشه اپوکسی و کربن اپوکسی [26]

Table 5 Physical and mechanical properties of glass/epoxy and carbon epoxy [26]

Mechanical Properties	Glass/Epoxy	Carbon/Epoxy
Elastic Modulus (MPa)		
E <sub>1</sub>	45000	121000
E <sub>2</sub>	10000	8600
E <sub>3</sub>	10000	8600
Shear Modulus (MPa)		
G <sub>12</sub>	5000	4700
G <sub>13</sub>	5000	4700
G <sub>23</sub>	3846.2	3100
Poisson's ratio		
ν <sub>12</sub>	0.3	0.27
ν <sub>13</sub>	0.3	0.27
ν <sub>23</sub>	0.4	0.40
Density(kg/m <sup>3</sup> )		
	2000	1490
Tensile Strength (MPa)		
TS <sub>1</sub>	1100	2231
TS <sub>2</sub>	35	29
TS <sub>3</sub>	35	29

محاسباتی از المان شل<sup>1</sup> برای مدل سازی استفاده شده است. شرایط مرزی تیر تقویتی با توجه به شکل 3 از نوع کاملاً محصور<sup>2</sup> هستند و در شبیه سازی اجازه هیچ گونه جابجایی و دوران به مدل داده نمی شود. همچنین برای مش بندی مدل از شکل المان مربعی<sup>3</sup> با روش سوئیپ<sup>4</sup> و اندازه<sup>5</sup> 7.5 میلی متر استفاده شد.

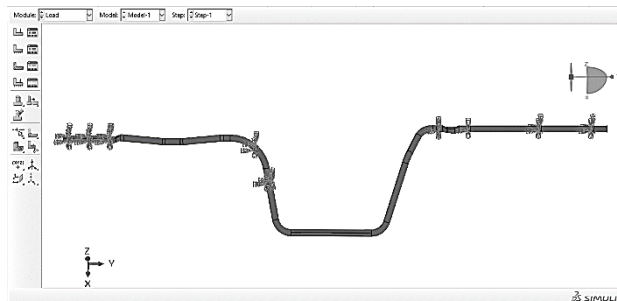


Fig. 3 Boundary conditions in simulation

شکل 3 شرایط مرزی در شبیه سازی

### 3- بهبود طراحی

به جهت بهبود طراحی، افزایش استحکام و تأمین استانداردهای صدا، لرزش و سفتی دو روش بررسی گردید: تغییر جنس و افزایش تکیه گاه. تغییر جنس با هدف سبک سازی و افزایش فرکانس طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت. اضافه کردن تکیه گاه نیز در راستای کاهش درجه آزادی تیر و افزایش فرکانس طبیعی، انجام شد. در نهایت برای رسیدن به بهترین پاسخ هر دو روش به صورت ترکیبی اعمال گردید.

### 1-3- تغییر جنس

از روش های افزایش فرکانس طبیعی استفاده از موادی است که کاهش جرم و یا در بعضی از آن ها به صورت هم زمان کاهش جرم و افزایش سفتی را سبب می شود. در این مقاله از آلومینیوم و کامپوزیت های کربن/ اپوکسی<sup>6</sup> و شیشه/ اپوکسی<sup>7</sup> و ترکیب های این کامپوزیت ها با آلومینیوم<sup>8</sup> استفاده می شود. جدول 4-5 نشان دهنده خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت ها و آلومینیوم می باشند. در این بخش کامپوزیت ها و چند لایه فلز الیاف با لایه چینی های متفاوتی از نظر ضخامت لایه ها و زاویه لایه ها و ترتیب چیدمان لایه ها ارائه و مقایسه می شوند. تمام لایه چینی ها در پیوست 1 ارائه شده اند. انتخاب این لایه چینی ها براساس لایه چینی های پر استفاده و مرسوم که پر کاربرد هستند، بوده است. لازم به ذکر است تمامی ضخامت های ذکر شده در جدول های معرفی لایه چینی ها، مربوط به لایه های قبل از تقارن می باشند.

جدول 4 خواص فیزیکی و مکانیکی الیاژ آلومینیوم 2024-T3

Table 4 Physical and mechanical properties of aluminum alloy 2024-T3

E <sub>x</sub> (GPa)	E <sub>y</sub> (GPa)	E <sub>s</sub> (GPa)	Poisson's ratio	Density(kg/m <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)
72.4	72.4	28	0.33	2700	465

- 1 shell
- 2 clamp
- 3 Quad
- 4 Sweep

### 2-3- تغییر جنس و اضافه کردن تکیه گاه به صورت هم زمان

طبق بررسی ها می توان به تیر تقویتی در سه مختصات بیشتر نسبت به مکان هایی که در حال حاضر تکیه گاه دارند، تکیه گاه اضافه کرد (شکل 4). بنابراین شرایطی بررسی می شود که جنس ها و لایه چینی های منتخب و تکیه گاه های اضافه شده، به صورت هم زمان اعمال شوند و مورد مطالعه قرار گیرند. این امر باعث افزایش سفتی مجموعه و در نهایت افزایش فرکانس طبیعی می شود.

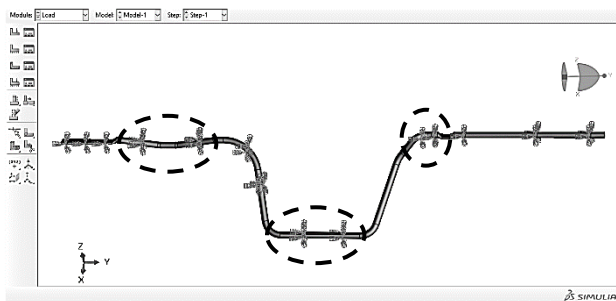


Fig. 4 Boundary conditions added in simulation

شکل 4 شرایط مرزی اضافه شده در شبیه سازی

### 4- تحلیل مودال و تحلیل تنش

تحلیل مودال روشی است که برای محاسبه مدهای ارتعاشی و فرکانس های مرتبطی که یک سازه نشان می دهد، استفاده می شود. معادله تعادل برای سازه ای که ارتعاش آزاد انجام می دهد به عنوان مسئله مقدار ویژه ظاهر می شود [27]:

$$[K - \lambda M]x = 0 \quad (1)$$

که در آن K ماتریس سفتی سازه و M ماتریس جرم است. میرایی در این محاسبه نادیده گرفته شده است. حل مسئله مقدار ویژه، n مقدار ویژه λ را به

- 5 Global seed
- 6 Carbon epoxy
- 7 Glass epoxy
- 8 Fiber in metal

مش ریزتر شبیه‌سازی کرده و نتایج با هم مقایسه می‌شود. اگر این دو مش اساساً نتیجه یکسانی داشته باشند، می‌توان اطمینان داشت که مدل یک راه‌حل دقیق ریاضی تولید می‌کند. با توجه به مقایسه‌های انجام شده و نتایج بدست آمده طبق شکل 6، مش بندی با سایز 7.5 میلی‌متر و تعداد المان 2054 مناسب است.

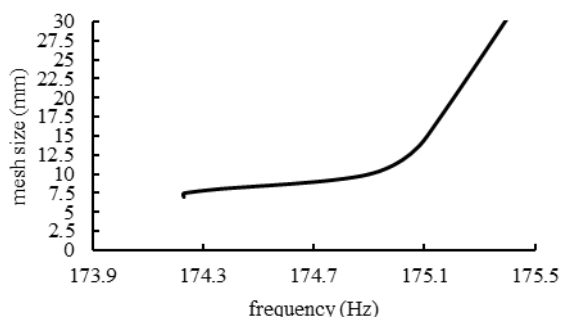


Fig. 6 Meshing convergence

شکل 6 همگرایی مش بندی

### 2-5- راستی آزمایی

الف) در پایان‌نامه منتشر شده در سال 2020 [28]، تحلیل ارتعاشی یک لوله مستقیم با انواع شرایط مرزی و مواد با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود از طریق نرم‌افزار انسیس ترسیم شده است. هدف این پایان‌نامه ایجاد بستری برای مطالعات آتی در تحلیل طیف پاسخ، تحلیل هارمونیک یا تحلیل ساختاری به‌منظور مطالعه بیشتر در مورد رفتار ارتعاشی و انحراف ساختاری است. تحلیل مودال این لوله به جهت راستی آزمایی در نرم‌افزار آباکوس انجام شد و نتایج با یک دیگر مقایسه شدند. جدول 6 نتایج مقایسه شده را ارائه می‌دهد.

جدول 6 مقایسه فرکانس طبیعی اول (برحسب هرتز) حاصل از تحقیق حاضر و مرجع [28]

Table 6 Comparison of the natural frequency (Hz) between the current research and the reference [28]

Length(m)	Ref [28]	First natural frequency (present study)	Percentage Difference (%)
1	732.430	681.70	7
2	220.705	203.97	7.5
4	58.338	53.985	7.46
6	26.311	22.980	12.66
8	14.859	12.977	12.66
10	9.527	8.783	7.8

ب) در این مقاله [29] برای تعیین کانتور تنش نوعی آلومینیوم، آزمایش کشش و تحلیل اجزای محدود انجام شده است. برای راستی آزمایی فرایند تحلیل تنش، مقاله فوق در نرم‌افزار آباکوس مورد راستی آزمایی قرار گرفت. در این مدل‌سازی پس از اعمال هندسه مورد نظر و اعمال ویژگی‌های مکانیکی<sup>۱</sup>، تحلیل دینامیکی تعریف شد. در نهایت نتیجه بدست آمده در شکل 7 با نتیجه ارائه شده در مرجع [29] مقایسه گردید. قابل ذکر است که در این مقاله با صرف‌نظر از معیارهای آسیب به همین روش برای تحلیل تنش عمل گردید.

دست می‌دهد که در آن  $n$  تعداد درجه‌های آزادی است. فرکانس طبیعی  $f_i$  مستقیماً از مقدار ویژه پیروی می‌کند [27]:

$$f_i = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \quad (2)$$

بنابراین با افزایش سفتی سازه و کاهش جرم آن، افزایش فرکانس طبیعی سازه محقق می‌شود. بدین جهت تحلیل مودال بر روی تیر تقویتی موجود انجام می‌شود.

همچنین برای انتخاب بهترین لایه‌چینی، بر روی نمونه‌های بخش 3-2 تحلیل عددی تنش در حالات الاستیک خطی و پلاستیک همسانگرد با صرف‌نظر از تعریف معیارهای آسیب صورت می‌گیرد. ویژگی ناحیه‌ی پلاستیک نمودار تنش/ کرنش تمام مواد استفاده شده در پیوست 2 آمده است. به جهت تحلیل تنش، سطوح در تماس با داشبورد طبق شکل 5 تحت بار استاتیکی گسترده 15 مگاپاسکالی قرار می‌گیرند. بارگذاری در این مقاله ناشی از وزن داشبورد و اجزای آن می‌باشد و تعیین میزان آن تخمینی است. چراکه اطلاعات دقیقی نسبت به وزن اعمالی از طرف داشبورد به تیر در دسترس نیست و قصد از بارگذاری مقایسه طراحی‌ها و انتخاب بهترین حالت می‌باشد.

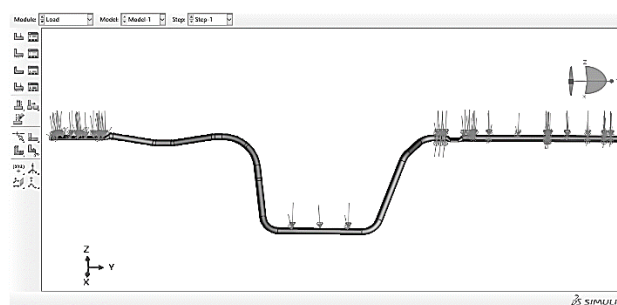


Fig. 5 Static loading in modeling

شکل 5 بارگذاری استاتیکی در مدل سازی

### 5- تحلیل نتایج و بحث

به جهت تأمین معیارهای صدا، لرزش و سفتی و افزایش استحکام تیر، تیری که جنس آن تغییر یافته مورد تحلیل عددی قرار گرفت. از آن جایی که تمام تمرکز این مقاله بر روی تحلیل‌های عددی و المان محدود بوده است، تمام اقدامات لازم به جهت اعتبار سنجی داده‌ها و راستی آزمایی صورت گرفت.

تحلیل مودال‌های متعددی برای مطالعه فرکانس‌های طبیعی و مودهای متناظر با آن‌ها انجام شد. همچنین از آن جایی که پیش‌بینی می‌شد با افزایش فرکانس طبیعی افزایش تنش در سازه رخ دهد، تحلیل تنش نیز انجام شد که در ادامه تمامی نتایج به صورت کامل بیان می‌شود.

### 1-5- بررسی استقلال پاسخ از سایز مش

در تحلیل‌های عددی مهم است که از یک مش به اندازه کافی اصلاح شده استفاده کرد تا اطمینان حاصل شود که نتایج شبیه‌سازی کافی است. مش‌های درشت می‌توانند نتایج نادرستی در تجزیه و تحلیل ارائه دهند. زمانی که اصلاح مش بیشتر تغییر ناچیزی در پاسخ ایجاد می‌کند، مش همگرا می‌شود. انجام یک مطالعه همگرایی مش همیشه لازم است، جایی که همان مسئله را با یک

1 معیارهای آسیب ductile و MSFLD و shear، الاستیک خطی، پلاستیک همسانگرد و چگالی

طبق شکل 8، لایه‌چینی شماره 11 از آن جهت انتخاب گردید که در بین لایه‌چینی‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی دارای میانگین جرمی است و در میان لایه‌چینی‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی با جرم مشابه، بهترین فرکانس طبیعی را دارد. همچنین جرم سازه نسبت به مدل فلزی 49 درصد کاهش می‌یابد. تمام لایه‌چینی‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی نتوانستند فرکانس طبیعی مورد نظر را تأمین کنند. به همین علت ترکیب آن‌ها با آلومینیوم نیز بررسی شد. طبق شکل 9 مشاهده می‌شود که از طریق لایه‌چینی شماره 156، فرکانس طبیعی نسبت به سازه فلزی 2.5 درصد و نسبت به لایه‌چینی شماره 11، افزایش 49 درصدی داشته است. اما لازم به ذکر است لایه‌چینی شماره 156 باعث افزایش 80 درصدی جرم نسبت به سازه فلزی و افزایش 253 درصدی نسبت به لایه‌چینی شماره 11 شده است. همچنین لایه‌چینی شماره 46 از آن جهت انتخاب شد که فرکانس طبیعی سازه را نسبت به لایه‌چینی شماره 11، 38 درصد افزایش داد. این لایه‌چینی همچنین باعث کاهش 66 درصدی جرم سازه نسبت به حالت فلزی و کاهش 35 درصدی نسبت به لایه‌چینی شماره 11 شد.

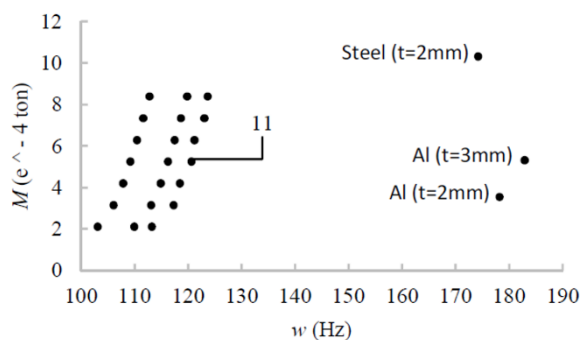


Fig. 8 Mass-natural frequency diagram of glass epoxy and comparison with aluminum and steel 1010 (All 21 points on the left side correspond to the layers of composite with code 1 to 21)

شکل 8 نمودار جرم - فرکانس طبیعی کامپوزیت شیشه/اپوکسی و مقایسه با آلومینیوم و آهن 1010 (تمام 21 نقطه‌ی سمت چپ مربوط به لایه‌چینی‌های شماره 1 تا 21 کامپوزیت می‌باشد)

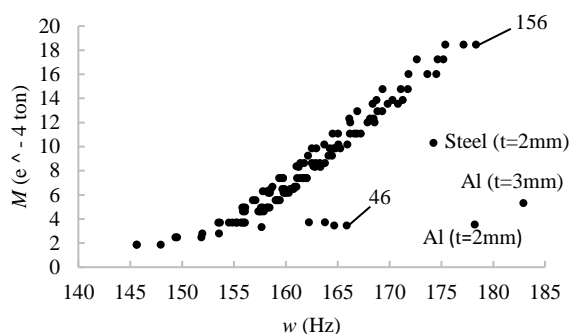


Fig. 9 Mass-natural frequency diagram of glass epoxy-aluminum and comparison with aluminum and steel 1010

شکل 9 نمودار جرم - فرکانس طبیعی شیشه/اپوکسی/آلومینیوم و مقایسه با آلومینیوم و آهن 1010

طبق شکل 10، لایه‌چینی شماره 32 از آن جهت انتخاب گردید که در بین لایه‌چینی‌های کامپوزیت کربن/اپوکسی دارای میانگین جرمی است و در میان لایه‌چینی‌های کامپوزیت کربن/اپوکسی با جرم مشابه، بهترین فرکانس

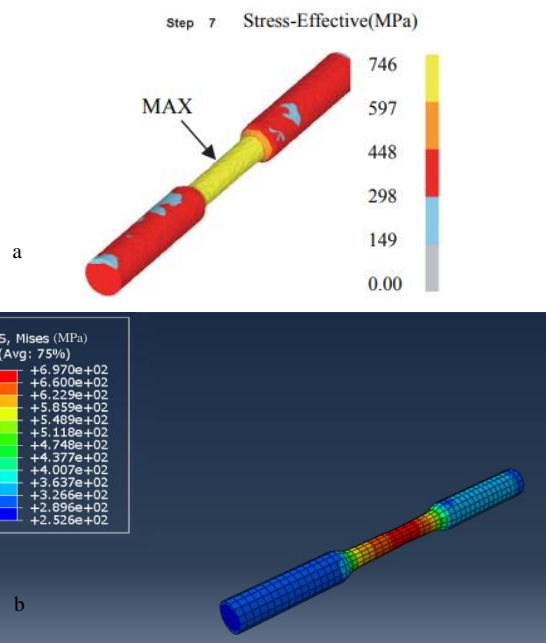


Fig. 7 Comparison of results: a) according to Ref [29] b) according to the current modeling (present study)

شکل 7 مقایسه نتایج: الف) مطابق مقاله [29] و ب) مطابق با مدل سازی

### 3-5- نتایج تحلیل مودال

در ابتدا لازم به ذکر است که طبق مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس، فرکانس طبیعی تیر فعلی مطابق جدول 7 می‌باشد.

جدول 7 فرکانس‌های طبیعی برای تیر تقویتی داشبورده موجود

Table 7 Natural frequencies for existing cross car beam

num.	frequencies
1	174.23
2	454
3	509.61
4	680.56
5	732.81

همان‌طور که در بخش‌های قبیل بیان شد، در این بخش از آلومینیوم و کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی و ترکیب‌های این کامپوزیت‌ها با آلومینیوم استفاده شد. استفاده از این مواد فرکانس طبیعی را افزایش می‌دهد چراکه این مواد کاهش جرم و یا در بعضی از آن‌ها به صورت هم‌زمان کاهش جرم و افزایش سفتی را سبب می‌شود. شکل‌های 8 تا 11 تمام لایه‌چینی‌ها را در شرایط تکیه‌گاه پیش‌فرض با هم مقایسه کرده و بهترین آن‌ها را از نظر فرکانس طبیعی و جرم ارائه می‌دهد.

طبق نتایج، استفاده از آلومینیوم به تنهایی به علت چگالی کمی که دارد باعث کاهش جرم و در نتیجه افزایش فرکانس طبیعی می‌شود. کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی به علت ماهیتشان دارای سفتی بالا و چگالی کم هستند. در نتیجه افزایش سفتی و کاهش جرم در این حالت باعث افزایش فرکانس طبیعی می‌شود. با توجه به نتایج، شیشه/اپوکسی به تنهایی نتوانست سفتی مورد نظر را تأمین کند، بنابراین از ترکیب آن با آلومینیوم استفاده شد تا سفتی سازه افزایش یابد و در نتیجه‌ی آن فرکانس طبیعی نیز افزایش پیدا کند.

اپوکسی/ آلومینیوم بهترین فرکانس طبیعی را دارد. بنابراین این لایه چینی نیز انتخاب گردید. هرچند این لایه چینی جرم را نسبت به سازه فلزی 60 درصد افزایش می‌دهد.

#### 4-5- نتایج تحلیل تنش

شکل 12 یک نمونه از تحلیل تنش‌های صورت گرفته در نرم‌افزار آباکوس را برای تیر فلزی با جنس 1010 نشان می‌دهد.

جدول 8 نتایج حاصل از تحلیل مودال و تحلیل تنش را برای لایه چینی-های منتخب در شرایط اضافه شدن تکیه‌گاه‌ها، نشان می‌دهد. استحکام کشش نهایی فلز 1010 طبق جدول 3، 395 مگاپاسکال و آلومینیوم طبق جدول 5، 465 مگاپاسکال می‌باشد. همچنین طبق جدول 4 استحکام کشش نهایی کامپوزیت شیشه/اپوکسی و کامپوزیت کربن/اپوکسی به ترتیب 1100 و 2231 مگاپاسکال می‌باشند. استحکام کشش نهایی مربوط به شیشه اپوکسی/آلومینیوم و کربن اپوکسی/آلومینیوم نیز در پیوست 2 آمده است. همان‌طور که در جدول‌ها و منابع معرفی ویژگی‌های مکانیکی چندلایه فلز الیاف مشاهده می‌شود، استحکام کشش نهایی نسبت به نوع و نحوه لایه چینی‌ها متفاوت است. طبق جدول 8 که چندین تکیه‌گاه به سازه اضافه شده است و با توجه به اعمال نیروی گسترده استاتیکی 15 مگاپاسکالی در تحلیل تنش، تنها لایه چینی‌های 11 و 32 و 41 و 156 و 256 و 270 و 284 قابل قبول هستند. چراکه در لایه چینی‌ها و جنس‌های دیگر ماکزیمم تنش از استحکام کشش نهایی یا بیشتر شده است و یا برابری می‌کند. یعنی سازه تحت شرایط مرزی تکیه‌گاه اضافه شده و نیروی گسترده 15 مگاپاسکالی در جنس‌های فلز، آلومینیوم و لایه چینی‌های 46 و 193 دچار شکست می‌شود. بنابراین با اعمال دو شرط اضافه کردن تکیه‌گاه و تغییر جنس، فرکانس طبیعی تا 460 درصد افزایش یافته است.

طبیعی را دارد. همچنین نسبت به مدل فلزی، جرم آن 62 درصد کمتر و فرکانس طبیعی آن 13 درصد بیشتر می‌باشد. لایه چینی شماره 41 نیز جزو لایه چینی‌های منتخب کامپوزیت کربن/اپوکسی است چون نسبت به همه لایه چینی‌های کامپوزیت کربن/اپوکسی بهترین فرکانس طبیعی را دارد. لایه چینی شماره 41، فرکانس طبیعی را نسبت به مدل فلزی 16 درصد افزایش داد. این لایه چینی جرم را نیز نسبت به مدل فلزی 39 درصد کاهش داد.

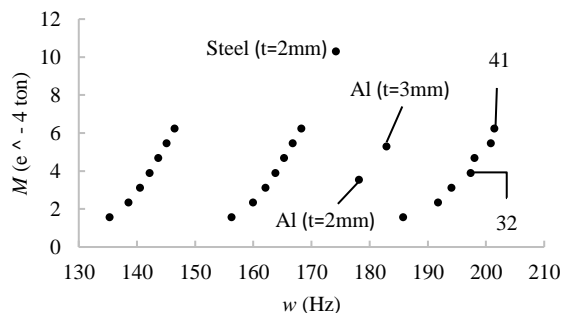


Fig. 10 Mass-natural frequency diagram of carbon epoxy and comparison with aluminum and steel 1010

شکل 10 نمودار جرم - فرکانس طبیعی کامپوزیت کربن/اپوکسی و مقایسه با آلومینیوم و آهن 1010

طبق شکل 11، لایه چینی‌های 193 و 256 و 270 انتخاب شدند. سازه با این لایه چینی‌ها درحالی‌که جرمی معادل با سازه آلومینیومی به ضخامت 2 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر و سازه فلزی دارد، فرکانس طبیعی بیشتری را ارائه می‌دهد. لایه چینی‌های 193 و 256 و 270 به ترتیب فرکانس طبیعی را نسبت به سازه فلزی 5 درصد و 8 درصد و 12 درصد افزایش می‌دهد. همچنین لایه چینی 284 نسبت به همه‌ی لایه چینی‌های چندلایه فلز الیاف کربن/

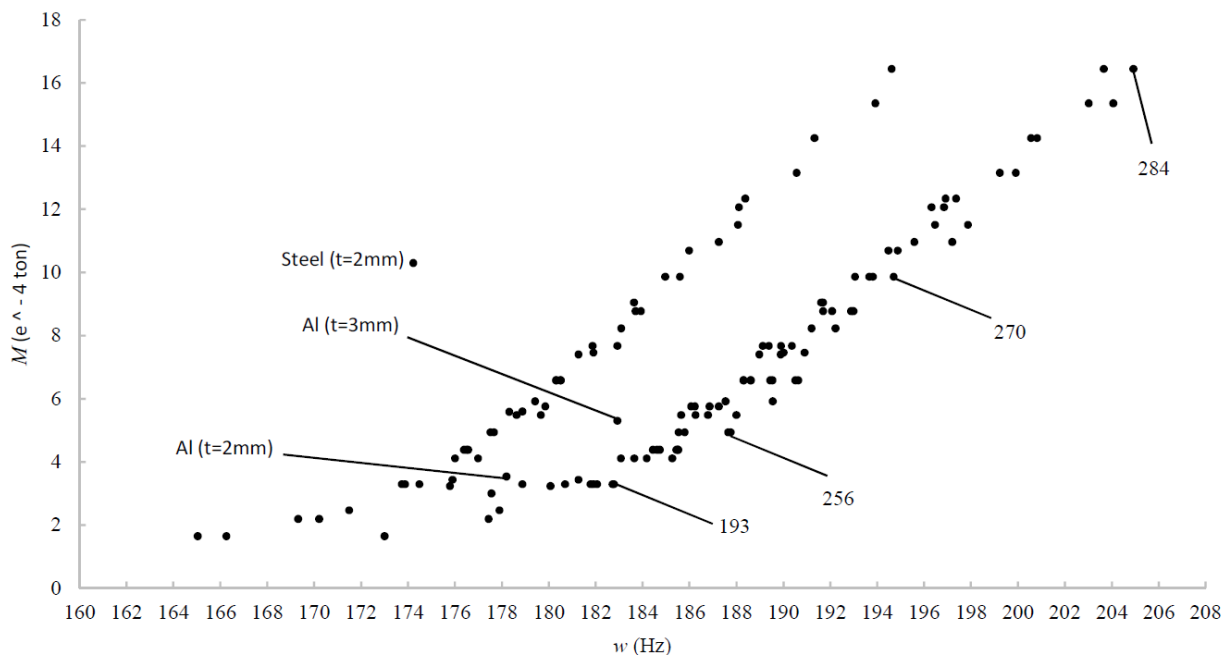


Fig. 11 Mass-natural frequency diagram of carbon epoxy-aluminum and comparison with aluminum and steel 1010

شکل 11 نمودار جرم - فرکانس طبیعی کربن/اپوکسی/آلومینیوم و مقایسه با آلومینیوم و آهن 1010

هم (چندلایه فلز الیاف) بررسی شدند. در هر کدام از لایه‌چینی‌ها، سه ترکیب زاویه‌ای 45/45 و 90/0 و 45/45- بررسی شدند. همچنین برای هر لایه‌چینی، تعداد 8 لایه تا 32 لایه در نظر گرفته شد. هدف افزایش لایه‌ها بررسی کاهش جرم و افزایش فرکانس طبیعی بود. در تمامی حالات لایه‌چینی چندلایه فلز الیاف، ضخامت آلومینیوم در مجموع نصف کامپوزیت بود. در این مرحله سازه‌هایی با 9 لایه‌چینی متفاوت و سازه آلومینیومی با ضخامت‌های 2 و 3 میلی‌متر که از نظر جرم و فرکانس طبیعی برتری داشتند، انتخاب شدند. تغییر جنس در بهترین حالت باعث افزایش 18 درصدی فرکانس طبیعی شد. البته قابل ذکر است که کاهش جرم قابل توجهی در بعضی از لایه‌چینی‌ها رخ داد.

سپس به‌منظور کاهش درجه آزادی سازه و افزایش فرکانس طبیعی آن سه تکیه‌گاه اضافه شد و لایه‌چینی‌های منتخب مجدد مورد تحلیل مودال قرار گرفتند. تمرکز تنش حاصل از افزایش بیش از حد فرکانس طبیعی باعث شد که در این مرحله تحلیل تنش نیز از طریق اعمال نیروی گسترده 15 مگاپاسکالی صورت بگیرد و نشان داده شد که سازه پیش‌فرض و سازه آلومینیومی استحکام لازم را ندارند. همچنین از بین 9 لایه‌چینی انتخاب شده در مرحله قبل 7 لایه‌چینی استحکام لازم را تأمین کردند. در نهایت با توجه به تغییرات طراحی و نتایج ارائه شده در جدول 8، لایه‌چینی شماره 11 در شرایطی که تمامی تکیه‌گاه‌های مورد نظر اضافه شده باشد، بهترین حالت است. چراکه نسبت به چندلایه فلز الیاف و کامپوزیت کربن/اپوکسی دارای هزینه کمتر است. این لایه‌چینی نسبت به حالت پیش‌فرض، دارای فرکانس طبیعی 3 برابری است. همچنین جرم آن نصف حالت پیش‌فرض است. طبق تحلیل تنش رخ داده نیز استحکام سازه را تأمین می‌کند. لایه‌چینی‌های شماره 32 و 41 و 256 و 270 در همه‌ی پارامترهای فرکانس طبیعی و جرم و استحکام بسیار مناسب هستند، اما بسیار پرهزینه می‌باشند. لایه‌چینی 156 در پارامترهای فرکانس طبیعی و استحکام مناسب است، اما جرم آن نزدیک به دو برابر حالت پیش‌فرض است. لایه‌چینی 284 نیز دارای جرمی بیش از حالت پیش‌فرض می‌باشد. استفاده از این لایه‌چینی هم بسیار پرهزینه می‌باشد.

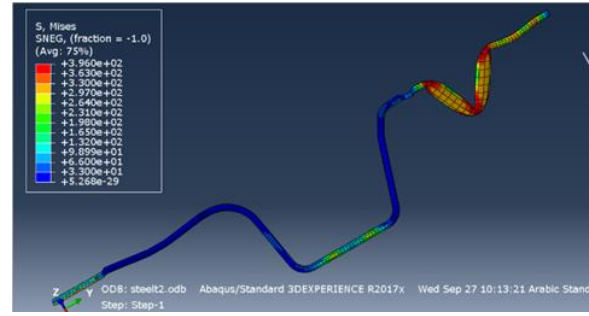


Fig. 12 Stress analysis of beam with 1010 material in the all-additional supports' mode

شکل 12 تحلیل تنش تیر با جنس 1010 در حالت همه تکیه‌گاه‌های اضافه شده

### 7- نتیجه‌گیری

داشبورد خودرو مجموعه‌ای از بخش‌های مختلف است که هر کدام مسئول جنبه‌ای از عملکرد، کنترل و ایمنی خودرو را به عهده دارند. در قلب داشبورد یک ساختار پشتیبانی فلزی به نام تیر تقویتی داشبورد وجود دارد که وظیفه تحمل بارها و تا حدی پاسخ به نیروهای تصادف را برعهده دارد. محدودیت‌های اصلی در طراحی تیر تقویتی داشبورد به عنوان صدا، ارتعاش و سفتی و همچنین عملکردهای قابلیت تصادف شناخته می‌شوند. عملکرد صدا، ارتعاش و سفتی به فرکانس‌های طبیعی سازه و جدا نگه داشتن آن‌ها از فرکانس‌های منابع تحریک‌کننده، مربوط می‌شود. موتور، سیستم انتقال نیرو و سطح جاده منابع رایج برای لرزش هستند. اگر فرکانس‌های طبیعی ساختار تیر تقویتی داشبورد با یکی از فرکانس‌های تحریک‌کننده همپوشانی داشته باشند، پدیده‌ای به نام تشدید رخ می‌دهد. چنین ارتعاشاتی می‌تواند صدای آزاردهنده قابل توجهی را در داخل و خارج خودرو ایجاد کند. همچنین می‌تواند به ستون فرمان منتقل شود و باعث ناراحتی و حواس‌پرتی راننده شود. با توجه به وجود این ارتعاشات آزاردهنده در داشبورد مورد نظر، برای جلوگیری از این پدیده مخرب، پاسخ مودال مجموعه تیر تقویتی داشبورد مورد مطالعه و اصلاح قرار گرفت. در این مقاله راه‌حل تغییر جنس بیان شد که هدف آن بهبود عملکرد ارتعاشی و افزایش فرکانس طبیعی بود. سه نوع جنس آلومینیوم و کامپوزیت-های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی به صورت جداگانه و به صورت ترکیب با

جدول 8 مقایسه تنش و فرکانس و جرم آلومینیوم و آهن 1010 با بهترین لایه‌چینی‌ها در حالت اضافه کردن همه تکیه‌گاه‌ها

Table 8 Comparison of tension, frequency and mass of aluminum and steel 1010 with the best FMLs in the all-support mode

Composite or FML codes	w (Hz)	m (e <sup>-4</sup> ton)	Max stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)
Steel t=2mm	840.35	10.2979	Fail: max stress >396	305	395.98
Al t=2mm	862.6	3.53296	Fail: max stress >465.3	345	465.28
Al t=3mm	873.02	5.299	Fail: max stress >465.3	345	465.28
11	567.59	5.23402	479.7	-	1100
32	941.5	3.89935	670.6	-	2231
41	967.77	6.23895	417.6	-	2231
46	798.93	3.43483	Fail: max stress >603.2	-	603
156	866.5	18.4499	194.6	-	580
193	887.05	3.28958	Fail: max stress >1000	-	1000
256	896.52	4.93437	615	-	920
270	933.5	9.86875	279.2	-	808.8
284	976.53	16.4479	157.7	-	690

8- پیوست 1

جدول 9 انواع لایه‌چینی‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 9 Types composites studied in this research (The unit of measurements is mm)

Carbon/Epoxy codes	Glass/Epoxy codes	Number of layers	laminated sequence	Thickness of layers
22	1		$[\pm 45]_{2s}$	0.2
23	2	8	$[0/45/90/-45]_s$	0.2
24	3		$[0/90]_{2s}$	0.2
25	4		$[\pm 45]_{3s}$	0.2
26	5	12	$[0/45/90/-45/0/45]_s$	0.2
27	6		$[0/90]_{3s}$	0.2
28	7		$[\pm 45]_{4s}$	0.2
29	8	16	$[0/45/90/-45]_{2s}$	0.2
30	9		$[0/90]_{4s}$	0.2
31	10		$[\pm 45]_{5s}$	0.2
32	11	20	$[(0/45/90/-45)_2/0/45]_s$	0.2
33	12		$[0/90]_{5s}$	0.2
34	13		$[\pm 45]_{6s}$	0.2
35	14	24	$[0/45/90/-45]_{3s}$	0.2
36	15		$[0/90]_{6s}$	0.2
37	16		$[\pm 45]_{7s}$	0.2
38	17	28	$[(0/45/90/-45)_3/0/45]_s$	0.2
39	18		$[0/90]_{7s}$	0.2
40	19		$[\pm 45]_{8s}$	0.2
41	20	32	$[0/45/90/-45]_{4s}$	0.2
42	21		$[0/90]_{8s}$	0.2

جدول 10 انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 8 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 10 Types of 8 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al/Carbon/Epoxy codes	Al/Glass/Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
171	43	$[AL/\pm 45/AL]_s$	0.2	0.2	0.2
172	44	$[AL/\pm 45/AL]_s$	0.5	0.2	0.25
173	45	$[AL/\pm 45/AL]_s$	0.15	0.15	0.15
174	46	$[AL/\pm 45/AL]_s$	0.5	0.15	0.25
175	47	$[AL/45/-45/45]_s$	0.6	0.2	-
176	48	$[AL/45/-45/45]_s$	0.45	0.15	-
177	49	$[AL/45/90/AL]_s$	0.2	0.2	0.2
178	50	$[AL/0/45/90]_s$	0.6	0.2	-
179	51	$[AL/45/90/AL]_s$	0.15	0.15	0.15
180	52	$[AL/0/45/90]_s$	0.45	0.15	-
181	53	$[AL/0/90/AL]_s$	0.2	0.2	0.2
182	54	$[AL/0/90/AL]_s$	0.5	0.2	0.25
183	55	$[AL/0/90/0]_s$	0.6	0.2	-
184	56	$[AL/0/90/AL]_s$	0.15	0.15	0.15
185	57	$[AL/0/90/AL]_s$	0.5	0.15	0.25
186	58	$[AL/0/90/0]_s$	0.45	0.15	-

نشریه علمی فناوری خودرو

جدول 11 انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 12 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 11 Types of 12 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al/Carbon/Epoxy codes	Al/Glass/Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
187	59	$[AL/\pm 45_2/AL]_s$	0.4	0.2	0.4
188	60	$[AL/\pm 45_2/45]_s$	1	0.2	-
189	61	$[AL/\pm 45_2/AL]_s$	0.3	0.15	0.3
190	62	$[AL/\pm 45_2/45]_s$	0.75	0.15	-
191	63	$[AL/0/45/90/-45/AL]_s$	0.4	0.2	0.4
192	64	$[AL/0/45/90/-45/0]_s$	1	0.2	-
193	65	$[AL/0/45/90/-45/AL]_s$	0.3	0.15	0.3
194	66	$[AL/0/45/90/-45/0]_s$	0.75	0.15	-
195	67	$[AL/(0/90)_2/AL]_s$	0.4	0.2	0.4
196	68	$[AL/(0/90)_2/0]_s$	1	0.2	-
197	69	$[AL/(0/90)_2/AL]_s$	0.3	0.15	0.3
198	70	$[AL/(0/90)_2/0]_s$	0.75	0.15	-

جدول 12 انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 14 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 12 Types of 14 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al/Carbon/Epoxy codes	Al/Glass/Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Thickness of Al layer number 4	Al thickness for middle layer
199	71	$[AL/\pm 45/AL/\pm 45/AL]_s$	0.2	0.2	0.4	0.2
200	72	$[AL/\pm 45/AL/\pm 45/AL]_s$	0.15	0.15	0.3	0.15
201	73	$[AL/0/90/AL/0/90/AL]_s$	0.2	0.2	0.4	0.2

جدول 13 انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 16 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 13 Types of 16 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al/Carbon/Epoxy codes	Al/Glass/Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
202	74	$[AL/\pm 45_3/AL]_s$	0.54	0.18	0.54
203	75	$[AL/\pm 45_3/AL]_s$	0.6	0.2	0.6
204	76	$[AL/\pm 45_3/AL]_s$	0.45	0.15	0.45
205	77	$[AL/\pm 45_3/45]_s$	1.4	0.2	-
206	78	$[AL/\pm 45_3/45]_s$	1.05	0.15	-
209	81	$[AL/0/45/90/-45/0/45/AL]_s$	0.54	0.18	0.54
211	83	$[AL/0/45/90/-45/0/45/AL]_s$	0.6	0.2	0.6

254	126	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0/45/90]_s$	1.65	0.15	-
257	129	$[AL/(0/90)_5/AL]_s$	1	0.2	1
258	130	$[AL/(0/90)_5/AL]_s$	0.75	0.15	0.75
259	131	$[AL/(0/90)_5/0]_s$	1.65	0.15	-
260	132	$[AL/(0/90)_5/0]_s$	2.2	0.2	-

**جدول 16** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 28 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 16** Types of 28 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
263	135	$[AL/\pm 45_6/AL]_s$	1.2	0.2	1.2
264	136	$[AL/\pm 45_6/AL]_s$	0.9	0.15	0.9
265	137	$[AL/\pm 45_6/45]_s$	1.95	0.15	-
266	138	$[AL/\pm 45_6/45]_s$	2.6	0.2	-
269	141	$[AL/(0/45/90/-45)_3/AL]_s$	1.2	0.2	1.2
270	142	$[AL/(0/45/90/-45)_3/AL]_s$	0.9	0.15	0.9
271	143	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0]_s$	2.6	0.2	-
272	144	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0]_s$	1.95	0.15	-
275	147	$[AL/(0/90)_6/AL]_s$	1.2	0.2	1.2
276	148	$[AL/(0/90)_6/AL]_s$	0.9	0.15	0.9
277	149	$[AL/(0/90)_6/0]_s$	2.6	0.2	-
278	150	$[AL/(0/90)_6/0]_s$	1.95	0.15	-

**جدول 17** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 32 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 17** Types of 32 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
281	153	$[AL/\pm 45_7/AL]_s$	1.05	0.15	1.05
282	154	$[AL/\pm 45_7/AL]_s$	1.4	0.2	1.4
283	155	$[AL/\pm 45_7/45]_s$	2.25	0.15	-
284	156	$[AL/\pm 45_7/45]_s$	3	0.2	-
287	159	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0/45/AL]_s$	1.05	0.15	1.05
288	160	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0/45/AL]_s$	1.4	0.2	1.4
289	161	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0/45/90]_s$	2.25	0.15	-
290	162	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0/45/90]_s$	3	0.2	-
293	165	$[AL/(0/90)_7/AL]_s$	1.05	0.15	1.05
294	166	$[AL/(0/90)_7/AL]_s$	1.4	0.2	1.4
295	167	$[AL/(0/90)_7/0]_s$	2.25	0.15	-
296	168	$[AL/(0/90)_7/0]_s$	3	0.2	-

212	84	$[AL/0/45/90/-45/0/45/AL]_s$	0.45	0.15	0.45
214	86	$[AL/0/45/90/-45/0/45/90]_s$	1.4	0.2	-
215	87	$[AL/0/45/90/-45/0/45/90]_s$	1.05	0.15	-
216	88	$[AL/(0/90)_3/AL]_s$	0.54	0.18	0.54
219	91	$[AL/(0/90)_3/0]_s$	1	0.15	-
220	92	$[AL/(0/90)_3/0]_s$	1.4	0.2	-
221	93	$[AL/(0/90)_3/AL]_s$	0.6	0.2	0.6
222	94	$[AL/(0/90)_3/AL]_s$	0.45	0.15	0.45
223	95	$[AL/(0/90)_3/AL]_s$	0.51	0.17	0.51

**جدول 14** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 20 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 14** Types of 20 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
224	96	$[AL/\pm 45_4/AL]_s$	0.68	0.17	0.68
225	97	$[AL/\pm 45_4/AL]_s$	0.8	0.2	0.8
226	98	$[AL/\pm 45_4/AL]_s$	0.6	0.15	0.6
227	99	$[AL/\pm 45_4/45]_s$	1.8	0.2	-
228	100	$[AL/\pm 45_4/45]_s$	1.35	0.15	-
231	103	$[AL/0_2/45_2/90_2/-45_2/AL]_s$	0.68	0.17	0.68
233	105	$[AL/(0/45/90/-45)_2/AL]_s$	0.8	0.2	0.8
234	106	$[AL/(0/45/90/-45)_2/AL]_s$	0.6	0.15	0.6
236	108	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0]_s$	1.8	0.2	-
237	109	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0]_s$	1.35	0.15	-
238	110	$[AL/(0/90)_4/AL]_s$	0.68	0.17	0.68
240	112	$[AL/(0/90)_4/AL]_s$	0.8	0.2	0.8
241	113	$[AL/(0/90)_4/AL]_s$	0.6	0.15	0.6
243	115	$[AL/(0/90)_4/0]_s$	1.8	0.2	-
244	116	$[AL/(0/90)_4/0]_s$	1.35	0.15	-

**جدول 15** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 24 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 15** Types of 24 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
245	117	$[AL/\pm 45_5/AL]_s$	1	0.2	1
246	118	$[AL/\pm 45_5/AL]_s$	0.75	0.15	0.75
247	119	$[AL/\pm 45_5/45]_s$	1.65	0.15	-
248	120	$[AL/\pm 45_5/45]_s$	2.2	0.2	-
251	123	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0/45/AL]_s$	1	0.2	1
252	124	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0/45/AL]_s$	0.75	0.15	0.75
253	125	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0/45/90]_s$	2.2	0.2	-

**جدول 21** انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 28 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

**Table 21** Types of 28 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
267	139	$[(AL/45/AL/-45)_3/AL/45]_s$	0.2
268	140	$[(AL/45/AL/-45)_3/AL/45]_s$	0.15
273	145	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0/AL/45/AL/90]_s$	0.2
274	146	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0/AL/45/AL/90]_s$	0.15
279	151	$[(AL/0/AL/90)_3/AL/0]_s$	0.15
280	152	$[(AL/0/AL/90)_3/AL/0]_s$	0.2

**جدول 22** انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 32 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

**Table 22** Types of 32 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
285	157	$[AL/45/AL/-45]_{4s}$	0.15
286	158	$[AL/45/AL/-45]_{4s}$	0.2
291	163	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45]_{2s}$	0.15
292	164	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45]_{2s}$	0.2
297	169	$[AL/0/AL/90]_{4s}$	0.15
298	170	$[AL/0/AL/90]_{4s}$	0.2

**9- پیوست 2**

**جدول 23** تنش واقعی و کرنش پلاستیک فلز 1010 [25]

**Table 23** True stress and plastic strain of metal [25]

True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
305	0
306.6822729	0.078823805
311.3144875	0.079580754
332.8049375	0.083154783
354.445	0.086728003
368.998875	0.089228084
383.85655	0.09233576
392.4691	0.0954888
395.9799641	0.098631929

**جدول 18** انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 16 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

**Table 18** Types of 16 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
207	79	$[AL/45/AL/-45]_{2s}$	0.2
208	80	$[AL/45/AL/-45]_{2s}$	0.15
210	82	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45]_s$	0.2
213	85	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45]_s$	0.15
217	89	$[AL/0/AL/90]_{2s}$	0.2
218	90	$[AL/0/AL/90]_{2s}$	0.15

**جدول 19** انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 20 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

**Table 19** Types of 20 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
229	101	$[(AL/45/AL/-45)_2/AL/45]_s$	0.2
230	102	$[(AL/45/AL/-45)_2/AL/45]_s$	0.15
232	104	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0]_s$	0.2
235	107	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0]_s$	0.15
239	111	$[(AL/0/AL/90)_2/AL/0]_s$	0.2
242	114	$[(AL/0/AL/90)_2/AL/0]_s$	0.15

**جدول 20** انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 24 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

**Table 20** Types of 24 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
249	121	$[AL/45/AL/-45]_{3s}$	0.2
250	122	$[AL/45/AL/-45]_{3s}$	0.15
255	127	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0/AL/45]_s$	0.2
256	128	$[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0/AL/45]_s$	0.15
261	133	$[AL/0/AL/90]_{3s}$	0.15
262	134	$[AL/0/AL/90]_{3s}$	0.2

**جدول 27** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (کربن/اپوکسی/آلومینیوم دوازده لایه) [32]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	323.86	0
2	450	0.002
3	544.32	0.004
4	690	0.006
5	808.8	0.008
6	920	0.01
7	1000	0.011

**جدول 28** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (کربن/اپوکسی/آلومینیوم بیست و چهار لایه) [32]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	290.53	0
2	323.86	0.002
3	450	0.004
4	544.32	0.006
5	690	0.008
6	808.8	0.01
7	920	0.011

**جدول 29** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (کربن/اپوکسی/آلومینیوم بیست و هشت لایه) [32]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	245.61	0
2	290.53	0.002
3	323.86	0.004
4	450	0.006
5	544.32	0.008
6	690	0.01
7	808.8	0.011

**جدول 30** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (کربن/اپوکسی/آلومینیوم سی و دو لایه) [32]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	224.36	0
2	245.61	0.002
3	290.53	0.004
4	323.86	0.006
5	450	0.008
6	544.32	0.01
7	690	0.011

**جدول 24** تنش واقعی و کرنش پلاستیک فلز آلومینیوم [30]

**Table 24** True stress and plastic strain of aluminum metal [30]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	345.00	0
2	346.71	0.00037873
3	351.10	0.00053702
4	355.19	0.00058501
5	359.35	0.001755
6	363.50	0.0032176
7	367.66	0.0046801
8	371.81	0.0052651
9	378.04	0.0073126
10	384.27	0.0087751
11	389.00	0.01053
12	394.66	0.013455
13	398.81	0.01638
14	405.04	0.019013
15	409.20	0.021938
16	413.35	0.024278
17	421.66	0.02691
18	427.89	0.029835
19	434.12	0.032761
20	438.28	0.034808
21	442.43	0.038026
22	448.66	0.042121
23	454.90	0.045631
24	459.05	0.048263
25	465.28	0.051481

**جدول 25** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (شیشه/اپوکسی/آلومینیوم هشت لایه) [31]

**Table 25** True stress and true strain of FML (glass/epoxy/aluminum eight layers) [31]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	297	0
2	330.4	0.003
3	399	0.008
4	437.6	0.013
5	490	0.018
6	530.5	0.023
7	580	0.028
8	603.2	0.033

**جدول 26** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (شیشه/اپوکسی/آلومینیوم سی و دو لایه) [31]

**Table 26** True stress and true strain of FML (glass/epoxy/aluminum thirty-two layers) [31]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	218	0
2	283.65	0.003
3	330.4	0.008
4	399	0.013
5	437.6	0.018
6	490	0.023
7	530.5	0.028
8	580	0.033

Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJRSET), Vol. 11, No. 6, pp.8163-8170, June 2022

- [21] Koppanati, M. S., Naga Rani, M. and Krishna Bhaskar, K., "Free Vibration Analysis of Graphene Reinforced Laminated Composite Plates Using Experimental Modal Testing" *Mechanics Of Advanced Composite Structures*, Vol. 10, No. 2, pp. 363-374, 2023.
- [22] Ghahremanian, Z., Shoostari, A.R. and Rafiee, M., "Analytical Modeling for Transverse linear and Nonlinear Vibrations of Glass Fiber/Epoxy Composites Reinforced with Carbon Nano Particles " *In Persian, Journal of mechanical engineering of Tabriz University* , Vol. 53, No. 1, pp. 81-90, 2023.
- [23] Azarafza, R., Davar, A and Ghaffari, H., "Fabrication and Testing of Composite Flange Using Experimental and Numerical Methodss " *In Persian, Journal of Aeronautical Engineering* , Vol. 25, No. 2, pp. 34-47, 2023.
- [24] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6539> , available in 18, February 2024.
- [25] Orhan, S., Öztürk, F. and Gattmah, J., "Effects of the Semi Die/Plug Angles on Cold Tube Drawing with a Fixed Plug by Fem for Aisi 1010 Steel Tube" *Sakarya University Journal of Science*, Vol. 21, No. 5, pp. 886-892, 2017.
- [26] Waqas, H. M., Shi, D., Imran, M., Khan, S. Z., Tong, L., Ahad, F. E., Zaidi, A. A., Iqbal, J. and Ahmed, W., "Conceptual Design of Composite Sandwich Structure Submarine Radome" *Materials*, Vol. 12, No. 12, pp. 1966, 2019.
- [27] Mr. Pruthviraj. K. Patil, M. K. D. B., Dr. S.M. Pise, "Optimization of Cross-Car Beam (Ccb) a Sub-System of Automobile by Modal Analysis" *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 08, No. 01, pp. 403-409, 2021.
- [28] ISHAK, M. H. I., "Modal Analysis of a Straight Pipe with and without Fluid" in *Proceeding of IRC*, pp.
- [29] Chen, D.-C., You, C.-S. and Gao, F.-Y., "Analysis and Experiment of 7075 Aluminum Alloy Tensile Test" *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 1252-1258, 2014.
- [30] Zehsaz, M., Hassanifard, S. and Esmaeili, F., "Fatigue Life Estimation for Different Notched Specimens Based on the Volumetric Approach" in *Proceeding of EDP Sciences*, pp. 42001.
- [31] Ergun, H., Liaw, B. M. and Delale, F., "Experimental-Theoretical Predictions of Stress–Strain Curves of Glare Fiber Metal Laminates" *Journal of Composite Materials*, Vol. 52, No. 1, pp. 109-121, 2018.
- [32] Xue, J., "Tensile Strength and Thermal Residual Stress of Carall and Uacs/Al Laminates" Thesis, Ph. D. dissertation. Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu ..., 2012.
- [1] Pinto, A. F., Tavares, S., César de Sá, J. M. and de Castro, P., "Structural Analysis of a Cross Car Beam Using Finite Element Models" *International Journal of Structural Integrity*, Vol. 6, No. 6, pp. 759-774, 2015.
- [2] <https://aec.org/page/cross-car-beam>, available in 18, February 2024.
- [3] Muhammad, A., Rahman, M. R., Bains, R. and Bakri, M. K. B., "Applications of Sustainable Polymer Composites in Automobile and Aerospace Industry" in: *Advances in Sustainable Polymer Composites*, Eds., pp. 185-207: Elsevier, 2021.
- [4] Rahmani, M., "Multidisciplinary Design Optimization of Automotive Aluminum Cross-Car Beam Assembly" Thesis, University of Toronto, 2013.
- [5] Pitrof, S. M. and Merrifield, R. A., "Engineering Development of a Composite Cross Car Beam" *SAE transactions*, pp. 738-743, 1997.
- [6] Lee, C. S., Lee, H. G., Hwang, H. Y. and Kim, J. W., "Novel Applications of Composite Structures to Robots, Machine Tools and Automobiles" *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 17-39, 2004.
- [7] Li, N., Chen, X., Hubbert, T. and Berkmortel, R., "2005 Ford Gt Magnesium Instrument Panel Cross Car Beam" 0148-7191, SAE Technical Paper, pp. 2005.
- [8] Shankar, G. S. S. and Vijayarangan, S., "Mono Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle–Design, End Joint Analysis and Testing" *Materials science*, Vol. 12, No. 3, pp. 220-225, 2006.
- [9] Silva, A. R. C. R. d., "Early Phase of the Cross Car Beam Concept Development", 2013.
- [10] Jaranson, J. and Ahmed, M., "Mmlv: Lightweight Interior Systems Design 2015-01-1236" *The Multi Material Lightweight Vehicle (MMLV) Project*, pp. 35, 2015.
- [11] Skszek, T., "Demonstration Project for a Multi-Material Lightweight Prototype Vehicle as Part of the Clean Energy Dialogue with Canada", *Vehma International Of America, Inc., Troy, MI (United States)*, pp. 2015.
- [12] Kim, D.-H., Kim, H.-G. and Kim, H.-S., "Design Optimization and Manufacture of Hybrid Glass/Carbon Fiber Reinforced Composite Bumper Beam for Automobile Vehicle" *Composite Structures*, Vol. 131, pp. 742-752, 2015.
- [13] Kim, D.-H., Jung, K.-H., Kim, D.-J., Park, S.-H., Kim, D.-H., Lim, J., Nam, B.-G. and Kim, H.-S., "Improving Pedestrian Safety Via the Optimization of Composite Hood Structures for Automobiles Based on the Equivalent Static Load Method" *Composite Structures*, Vol. 176, pp. 780-789, 2017.
- [14] Park, G. and Park, H., "Structural Design and Test of Automobile Bonnet with Natural Flax Composite through Impact Damage Analysis" *Composite Structures*, Vol. 184, pp. 800-806, 2018.
- [15] Satheesh, S., Srikari, S. and Shivakumar, H., "Numerical Investigation of Cross Car Beam Using Magnesium Alloy for Weight Reduction" *SASTech-Technical Journal of RUAS*, Vol. 17, No. 1, pp. 45-48, 2018.
- [16] Deokar, V., Gumma, V., Bhagwat, P. and Dange, A., "Development, Manufacturing and Testing of a Steering Wheel Prototype Processed out of Banana Fibre Composites", 2019.
- [17] Zhu, G., Wang, Z., Cheng, A. and Li, G., "Design Optimisation of Composite Bumper Beam with Variable Cross-Sections for Automotive Vehicle" *International journal of crashworthiness*, Vol. 22, No. 4, pp. 365-376, 2017.
- [18] Ding, M., Liu, B., Fan, Z., Wang, J., Zhai, F. and Li, L., "Damping Property of Carbon Fiber Reinforced Plastic for Noise/Vibration/Harsh of Steering Column Support Assembly", 2021.
- [19] Davar, A., Mehrabani, M., Zamani, M., Heydari Bani, M. and Eskandari Jam, J., "Analysis of Composite Lattice Cylindrical Shells under Transient Dynamic Loading" *In Persian, علوم و مهندسی هوافضا*, Vol. 14, No. 1, pp. 30-44, 2021.
- [20] Thatithooru Vasantha , yalamanchili Suresh, " Structural Analysis on Cross Car Beam by Varying Materials ", *International Journal of*



## مطالعه آسیب در چندلایه‌های کامپوزیتی - فلزی حاوی ترک ماتریسی، جدایی بین لایه‌ای و پلاستیسیته لایه فلزی

فائزه محمدظاهری<sup>1</sup>، بیژن محمدی<sup>2\*</sup>، فتح اله طاهری بهروز<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* ایران، تهران، صندوق پستی: 36916-19689، bijan\_mohammadi@iust.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

چندلایه‌های کامپوزیتی- فلزی ساختارهای ترکیبی جدیدی هستند که در آن چندین ورق فلزی نازک و لایه‌های کامپوزیت به هم متصل شده‌اند. این ساختارها دارای ویژگی‌هایی چون مقاومت خستگی بالا، مقاومت در برابر ضربه و جذب بالای انرژی بوده که باعث افزایش روزافزون کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف شده است. FMLها مستعد بروز آسیب می‌باشند. در این مطالعه آسیب در FML تحت بار استاتیکی کششی شامل ترک‌های ماتریسی، جدایی بین لایه‌های القایی ناشی از ترک ماتریسی و پلاستیسیته لایه‌های فلزی بررسی شده است. با استفاده از مدل تحلیلی توزیع تنش و نرخ رهاسازی انرژی در FML حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌ای استخراج گردید. همچنین مدل سازی عددی FML حاوی آسیب‌های مذکور نیز انجام شد. نتایج توزیع تنش استخراج شده از مدل تحلیلی و عددی با هم مقایسه شد و بین نتایج انطباق خوبی مشاهده گردید. در ادامه نمونه‌های FML تحت آزمایش کشش قرار گرفتند و آسیب‌هایی که در آن‌ها رخ داده بود نمایش داده شد. با استفاده از مدل تحلیلی و محاسبه نرخ رهاسازی انرژی، اشباع ترک ماتریسی و شروع جدایی بین لایه‌ای در چگالی ترک 0.38 (فاصله دو ترک 2.7 میلی‌متر) استخراج گردید. با مشاهده نمونه‌های تجربی، این چگالی ترک در بیشتر طول نمونه مشاهده گردید، اما به علت‌های مختلفی چون نواقص ساخت، در بعضی از نواحی فاصله بین ترک‌ها بزرگ‌تر از مقدار مذکور بود.

دریافت: 1402/12/02

پذیرش: 1403/03/01

### کلیدواژگان

چندلایه‌های کامپوزیتی- فلزی،

پلاستیسیته،

جدایی بین لایه‌ای،

ترک ماتریسی

## Study of damage in fiber metal laminate including matrix cracking, delamination and plasticity of metal layer

Faezeh Mohammad Zaheri<sup>1</sup>, Bijan Mohammadi<sup>2\*</sup>, Fathollah Taheri-Behrooz<sup>3</sup>

1, 2, 3- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 36916-19689, Tehran, Iran, bijan\_mohammadi@iust.ac.ir

### Keywords

Fiber Metal Laminate,  
Plasticity,  
Delamination,  
Matrix cracking

### Abstract

Fiber Metal Laminates are new composite structures in which several thin metal sheets and composite layers are connected together. These structures have properties such as high fatigue resistance, high impact resistance and high energy absorption, which have led to a growing use of them in various industries. In this study, damage in FMLs under tensile static loading, including matrix cracking, delamination induced by matrix cracking and plasticity in metal layers, was examined. Using the analytical model, stress distribution and energy release rate were extracted in FML containing matrix cracking and delamination. Numerical modeling of FML containing such damages was also performed. The stress distribution results obtained from the analytical and numerical models were compared, and good agreement between the results was observed. Furthermore, the FML samples were subjected to tensile test and the damages that occurred in them were displayed. By using the analytical model and calculating energy release rate, the matrix crack saturation and the initiation of delamination at the crack density of 0.38 (the distance between two cracks is 2.7 mm) were extracted. By observing the experimental samples, this crack density was observed in most of the length of the sample, but due to various reasons such as manufacturing defects, in some areas the distance between the cracks was larger than the mentioned value.

Please cite this article using:

Mohammad Zaheri, F., Mohammadi, B., Taheri-Behrooz, F., "Study of Damage in Fiber Metal Laminate including Matrix Cracking, Delamination and Plasticity of Metal Layer," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2377-2386, 2024.  
https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2023510.1877

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

مختلف الیاف و خواص مکانیکی پایین مابین فلز و کامپوزیت [15]، خواص چسبندگی، کیفیت اتصال فلز - کامپوزیت و فرآیند ساخت باعث ایجاد جدایی بین لایه‌ای در FML تحت بار می‌شوند. از دیگر آسیب‌های مشاهده شده در FML ها پلاستیسیته و گسیختگی در لایه‌های فلزی می‌باشد [16]. قاسمی و همکاران [17] با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته به بررسی رشد ترک خستگی ورق‌های ترک‌دار آلومینیومی، تعمیر شده توسط وصله‌های کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها تأثیر زاویه ترک بر روی ضریب شدت تنش در ورق تعمیر شده و تأثیر لایه‌چینی وصله‌های کامپوزیتی بر روی جابه‌جایی نقاط دهانه ترک و ضریب شدت تنش را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که وصله‌های کامپوزیتی با ترکیب ورق/الیاف/الیاف/آلومینیوم بیشترین تأثیر را در خواص ترمیمی دارد و می‌تواند ضریب شدت تنش را تا 70 درصد کاهش دهد.

حالات آسیب در FML ها را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف شناسایی کرد. دیا و همکاران [18] آسیب بوجود آمده در FML آلومینیوم/کامپوزیت شیشه را تحت بار شبه استاتیکی و خستگی با استفاده از تکنیک انتشار آکوستیک<sup>1</sup> بررسی نمودند. قاجار و قدمی [19] به منظور تشخیص آسیب در لایه‌چینی شیشه/اپوکسی روش تجربی جدید معرفی نمود. این روش بر اساس میکروسکوپ نوری و حلالیت رنگ در اتانول بود. نجف‌آبادی و همکاران [20] خرابی ورق آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با چندلایه فلز الیاف را با روش انتشار آکوستیک بررسی نمودند. حالات مختلف خرابی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی و بررسی سطوح شکست مورد مطالعه قرار گرفت. در دهه‌های گذشته معیارهای مختلفی برای آسیب و تخریب FML ارائه شده است. برخی از این معیارها شامل تئوری حداکثر کرنش، تئوری تسای-هیل، مدل کاهش سفتی و همچنین مدل مکانیک آسیب پیوسته می‌باشند [21, 22]. چن و سان [23] مدل ترکیبی پلاستیسیته و تئوری کلاسیک لایه ها را به منظور پیش‌بینی رفتار FML در آزمون کشش ارائه نمودند. کرتس و کنترل [24] از نتایج تئوری حداکثر کرنش و تئوری تسای-هیل به منظور محاسبه آسیب FML ترموپلاستیک تیتانیومی استفاده کردند. آن‌ها از معیار تسای-هیل به منظور تخمین آسیب لایه‌های کامپوزیت و از معیار حداکثر کرنش به منظور تخمین آسیب لایه‌های آلومینیوم استفاده نمودند. پولری و همکاران [25] یک مدل تخریب بر اساس کاهش تدریجی خواص سفتی لایه‌چینی بعد از عبور از معیار تسای-هیل در FML ارائه دادند. در این مدل مقادیر تسای-هیل بیانگر نرخ مقدار استحکام به تنش بدست آمده در جهت‌های مشخص تنش بود. بر اساس این مدل، تخریب در لایه‌چینی زمانی اتفاق می‌افتد که توزیع ترم 1 آسیب تسای-هیل در مقایسه با دیگر ترم‌ها بیشتر باشد؛ در این حالت، آسیب تخریب الیاف در نظر گرفته می‌شود. همچنین زمانی که لایه‌چینی در دو ترم 2 و 3 تخریب گردد، جدایش در بین الیاف و ماتریس رخ می‌دهد. در این معیارها تأثیر رفتار لایه‌های فلز و کامپوزیت برهم در FML و اثر ناشی از آسیب در لایه‌ها بر ایجاد آسیب‌های جدید به صورت جامع بررسی نشده است. انکوش و همکاران [26] آسیب FML را برای هر مود آسیب با استفاده از قانون رشد آسیب نمایی تکمیل کردند. آن‌ها به منظور پیش‌بینی آسیب از معیار آسیب هشین [27] که دارای چهار مود آسیب می‌باشد، استفاده نمودند. آن‌ها برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک لایه‌های آلومینیوم از مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک<sup>2</sup> استفاده کردند. محمدظاهری و همکاران [28] روش تحلیلی مناسبی را جهت پیش‌بینی وضعیت آسیب شامل ترک ماتریسی و پلاستیسیته فلز و مشخصات مکانیکی باقیمانده ناشی از آن در FML تحت

کاربرد فلزات و کامپوزیت‌ها به طور جداگانه دارای نقاط ضعف می‌باشند. در فلزی مثل آلومینیوم نقاط ضعف شامل مقاومت خستگی و خوردگی پایین و چگالی بالا بوده و در کامپوزیت‌ها مقاومت ضربه پایین و رفتار غیر پلاستیک جزء معایب هستند. در دهه هفتاد ایده استفاده از دو ماده به صورت ترکیبی برای غلبه بر بسیاری از معایب هر دو ماده بیان شد [1]. با وجود کاربردهای فراوان FML در صنایع مختلف، این ساختارها مستعد وجود خرابی‌هایی هستند. خرابی در FML شامل آسیب در کامپوزیت، آسیب در فلز به کار برده شده در آن و همچنین جدایی میان لایه‌ای می‌باشد. در FML بسته به بارگذاری و نوع FML مکانیزم‌های مختلف آسیب می‌تواند اتفاق بیافتد. تحقیقات گسترده‌ای در مورد مدهای آسیب FML انجام شده است. ملک زاده و همکاران [2] به بررسی پاسخ ضربه سرعت پایین ورق ساندویچی با رویه الیاف-فلز توسط ضربه‌زننده صلب پرداختند. آن‌ها بیشینه نیروی برخورد را با کمک مدل جرم و فنر دو درجه آزادی در یک فرایند تکرار استخراج نمودند. نتایج تجربی و تحلیلی نشان داد که چیدمان لایه‌ها، جرم و سرعت ضربه‌زننده در سطح انرژی ثابت و ابعاد سازه هدف، عوامل تأثیرگذار در پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی با رویه فلز-الیاف می‌باشند. داور و همکاران [3] به صورت پارامتری ضربه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی با رویه FML و هسته مدرج تابعی را تحلیل نمودند. آن‌ها با استفاده از یک تئوری پوسته جدید به پیش‌گویی تاریخچه نیروی تماس ناشی از برخورد عرضی شبه استاتیکی توسط ضربه‌زننده الاستیک و ایزوتروپیک پرداختند.

مطالعات بنیاس [4] در رابطه با آسیب‌های ایجاد شده در آزمایش‌های ضربه بر FML نشان داد که در انرژی‌های ضربه پایین تعدادی ترک ماتریسی در لایه‌های کامپوزیت ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش انرژی ضربه، جدایی بین لایه‌ای در ناحیه‌های میانی بین لایه‌های کامپوزیت و یا بین لایه‌های کامپوزیت-فلز رخ می‌دهد. او نشان داد با افزودن مجدد انرژی ضربه، تغییر شکل در FML در ناحیه ضربه اتفاق می‌افتاد. اولین مود آسیب مشاهده شده در اثر ضربه ترک ماتریسی بوده و این مود آسیب منجر به جدایی بین لایه‌ای می‌گردد. همچنین در آزمایش‌ها تغییر شکل پلاستیک آلومینیوم نیز مشاهده گردید.

یکی از مکانیزم‌های مهم آسیب در FML تورق میان لایه‌ها ناشی از جدایی چسبنده بین آن‌ها می‌باشد [3]. این فرم از آسیب به طور قابل ملاحظه‌ای خطرناک می‌باشد زیرا تشخیص آن بین لایه‌های داخلی به علت وجود لایه‌های آلومینیومی امکان‌پذیر نیست. تورق میان لایه‌ها به طور همزمان باعث کاهش سفتی و کاهش ظرفیت تحمل بار تحت بارگذاری فشاری می‌شود [6,7,8]. مسئله جدایی بین لایه‌های FML به طور گسترده در تحقیقات بررسی شده است. برخی مطالعات [9,10,11,12] بر تشخیص پدیده تورق و خواص شکست پرداخته‌اند. ردی [13] نیز فرآیند تورق را تحت تأثیر انواع بارگذاری بررسی نمود. وی به این نتیجه رسید که تورق معمولاً در بارگذاری خستگی و یا تنش-های برشی بزرگ میان لایه‌های رخ می‌دهد اما می‌تواند تحت تأثیر پلاستیسیته فلز نیز باشد. آبریت [14] بیان کرد که عموماً جدایی بین لایه‌های ناشی از وجود ترک‌های ماتریسی و تنش برشی میان لایه‌ای می‌باشد و ناسازگاری سفتی میان لایه‌های مجاور در دسته‌ای از لایه‌ها منجر به تغییر شکل لایه‌چینی می‌شود. عواملی مانند تفاوت در سفتی میان لایه‌های کامپوزیت با جهت‌گیری‌های

<sup>1</sup> Acoustic Emission technique<sup>2</sup> Isotropic hardening

بارگذاری استاتیکی ارائه نمودند. آن‌ها با ارائه این مدل اثر پلاستیسیته در لایه‌های فلزی و ترک ماتریسی در لایه‌های کامپوزیت برهم را به شکل تئوری پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش نسبت ضخامت فلز به کامپوزیت 90 درجه و افزایش فاصله بین ترک‌ها احتمال بروز پلاستیسیته در لایه فلزی کاهش می‌یابد. محمدی و پاکدل [29,30] میدان تنش را برای لایه-چینی  $[\theta_m^{(0)}/\theta_n^{(i)}]_s$  با فرض بروز ترک‌های ماتریسی میانی یا متقارن بیرونی یا زیگزاگی بیرونی، حاوی یا فاقد جدایی بین‌لایه‌ای تحت بارگذاری دلخواه داخل صفحه بررسی کردند. آن‌ها با معرفی المان حجمی برای هر یک از انواع وضعیت آسیب محتمل و با استفاده از معادلات پیوستگی تنش و شرایط مرزی برای ترک‌های میانی و ماتریسی بیرونی حاوی جدایی بین‌لایه‌ای القایی میدان تنش و متناظر با آن افت خواص مکانیکی را استخراج نمودند. محمدی و همکاران [31] رشد آسیب در کامپوزیت‌های متعامد تحت بار کششی را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از معیار نرخ رهاسازی انرژی شروع و رشد ترک‌های ماتریسی، جدایی بین‌لایه‌ای القایی و همچنین وضعیت اشباع ترک‌های ماتریسی را پیش‌بینی نمودند.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در خصوص بررسی و پیش‌بینی آسیب در FML ها انجام شده اما مدل کاملی در این خصوص ارائه نشده است. در این مطالعه با توسعه مدل تحلیلی ارائه شده برای FML ها [28]، علاوه بر بررسی ترک ماتریسی و پلاستیسیته FML جدایی بین‌لایه‌ای القایی ناشی از ترک ماتریسی نیز تحلیل گردیده است. همچنین نمونه FML تحت بار کششی قرار گرفته و آسیب در آن به ثبت رسیده است. نتایج استخراج شده از مدل تحلیلی با نتایج عددی و تجربی مقایسه شده که انطباق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در خصوص بررسی و پیش‌بینی آسیب در FML ها انجام شده اما مدل کاملی در این خصوص ارائه نشده است. در این مطالعه با توسعه مدل تحلیلی ارائه شده برای FML ها [28]، علاوه بر بررسی ترک ماتریسی و پلاستیسیته FML جدایی بین‌لایه‌ای القایی ناشی از ترک ماتریسی نیز تحلیل گردیده است. همچنین نمونه FML تحت بار کششی قرار گرفته و آسیب در آن به ثبت رسیده است. نتایج استخراج شده از مدل تحلیلی با نتایج عددی و تجربی مقایسه شده که انطباق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد.

## 2- مدل تحلیلی

در مدل توسعه‌یافته در این پژوهش فرض می‌شود که آسیب به طور یکنواخت در امتداد هر لایه عرضی توزیع گردد و بر اساس روش حساب تغییرات هشین [29]، یک المان حجمی می‌تواند نماینده کل لایه‌چینی در نظر گرفته شود. آسیب‌های مورد بررسی در این پژوهش علاوه بر ترک‌های ماتریسی و پلاستیسیته، جدایی بین‌لایه‌ای نیز می‌باشند. بارگذاری از نوع بار ثابت، استاتیکی و بصورت کششی و تک‌محوره است. در این مدل ابتدا تنش بحرانی تعریف شده است. تنش بحرانی کمترین تنش است که اگر به FML اعمال شود، بدون در نظر گرفتن هیچ آسیب دیگری، لایه‌های فلزی وارد محدوده پلاستیک می‌شوند. اگر تنش اعمال شده به FML کمتر از تنش بحرانی باشد، رفتار در لایه‌های فلزی الاستیک بوده و در لایه‌های کامپوزیت در صورتی که شرایط مهیا باشد ترک ماتریسی تشکیل می‌شود. ایجاد ترک ماتریسی منجر به تغییر توزیع تنش اولیه و ایجاد تنش‌های اغتشاشی در لایه‌چینی می‌شود. این تنش‌های اغتشاشی باعث افزایش تنش در لایه‌های فلزی می‌گردند. ممکن است افزایش تنش در لایه فلز منجر به پلاستیسیته در آن شود. بنابراین با ادامه بارگذاری امکان ایجاد دو نوع از آسیب وجود دارد: اول ترک ماتریسی جدید در لایه‌های کامپوزیتی و دوم ورود فلز به ناحیه پلاستیک. در صورتی که تنش در لایه فلزی همچنان کمتر از تنش تسلیم باشد با ادامه بارگذاری امکان ایجاد ترک ماتریسی جدید وجود دارد و ایجاد هر ترک ماتریسی جدید، شرایط قبل را تکرار می‌کند. به این معنی که توزیع تنش به هم خورده و تنش در لایه مجاور افزایش می‌یابد و پلاستیسیته در فلز محتمل می‌شود. ایجاد ترک

1-2- محاسبه میدان تنش در المان حجمی FML حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین‌لایه‌ای

در حالتی که المان حجمی علاوه بر ترک ماتریسی، حاوی جدایی بین‌لایه‌ای نیز باشد لازم است مطابق شکل 1 المان حجمی را به دو ناحیه تقسیم کرده و برای هر ناحیه توابع تنش و شرایط مرزی مجزا تعریف شود. دو ناحیه شامل ناحیه حاوی جدایی بین‌لایه‌ای و بدون جدایی بین‌لایه‌ای است که به ترتیب با بالانویس‌های  $d$  و  $c$  نشان داده شده است.

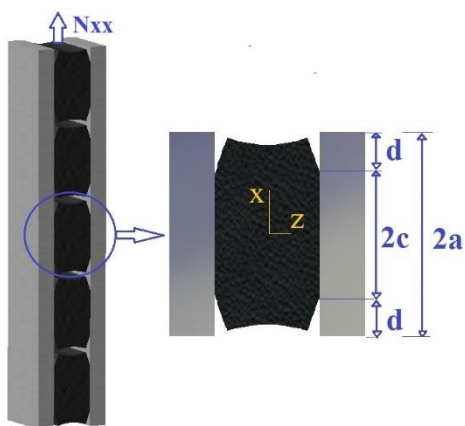


Fig. 1 Schematic of FML RVE<sup>1</sup> containing matrix cracks in composite layers and delamination between metal and composite layers

شکل 1 شماتیک المان حجمی FML حاوی ترک ماتریسی میانی در لایه‌های کامپوزیتی و جدایی بین لایه‌های فلز و کامپوزیت

به منظور استخراج توزیع تنش پس از بروز ترک و جدایی بین‌لایه‌ای روالی مطابق روال گفته شده در مقاله [25] ارائه شده است، با این تفاوت که در المان حجمی دو ناحیه با توزیع تنش‌های متفاوت وجود دارد. بنابراین تنش در زمان وجود آسیب در هر ناحیه به صورت مجموع دو تنش در نظر گرفته می‌شود؛ این دو تنش عبارت‌اند از تنش اولیه قبل از بروز آسیب که در هر دو ناحیه  $c$  و  $d$  یکسان است  $(\sigma_{jk}^{(i)0})$  و با استفاده از روابط تئوری کلاسیک لایه‌ها استخراج می‌شود و تنش اغتشاشی ناشی از ایجاد آسیب که به ترتیب در دو ناحیه  $c$  و  $d$   $(\sigma_{jk}^{(i)c})$  و  $(\sigma_{jk}^{(i)d})$  می‌باشد (معادله 1). فرض‌های ارائه شده در خصوص مستقل بودن تنش‌های اغتشاشی داخل صفحه در راستای ضخامت (راستای  $Z$ ) و راستای عرضی (راستای  $Y$ ) نیز پابرجا می‌باشند. تکنیک تقسیم‌بندی لایه‌ها در این حالت تأثیر بسزایی دارد. زیرا در صورتی که لایه‌ها به زیر تعداد لایه‌های مشخص تقسیم نشوند میدان تنش در ناحیه حاوی جدایی بین‌لایه‌ای صفر می‌گردد. بنابراین در این حالت می‌توان کل المان حجمی حاوی جدایی بین‌لایه‌ای و ترک ماتریسی با طول  $2a$  را با المان حجمی حاوی ترک ماتریسی با طول  $2(a-d)$  جایگزین کرد. به منظور دستیابی به یک میدان تنش اغتشاشی حائز شرایط مذکور، تنش‌های اغتشاشی درون صفحه‌ای در دو ناحیه  $c$  و  $d$   $(\sigma_{xx}^{(i)d})$  و  $(\sigma_{xx}^{(i)c})$  در زیر لایه‌های  $(i)$  به صورت توابعی ناشناخته از توابع

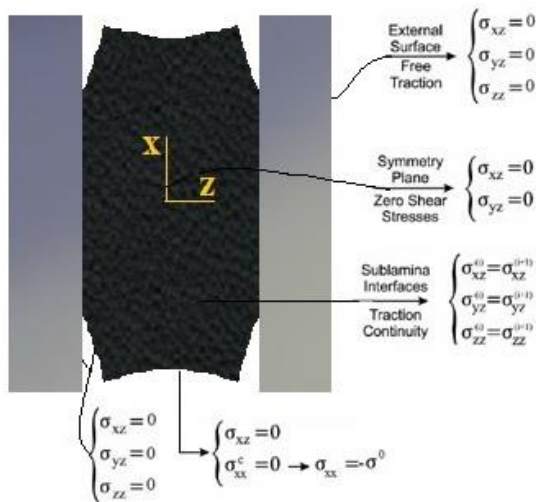
<sup>1</sup> Representative Volume Element

XY هستند. تنش‌های برشی خارج صفحه بر روی صفحات تقارن XY می‌بایست برابر با صفر در نظر گرفته شود:

$$\text{at } z = 0 \quad \begin{cases} \sigma_{xz}^{L(1)c} = \sigma_{xz}^{L(1)d} = 0 \\ \sigma_{yz}^{L(1)c} = \sigma_{yz}^{L(1)d} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

• پیوستگی تنش: در استخراج میدان تنش قابل قبول، گرچه تنش‌های داخل صفحه در زیرلایه‌های مجاور متفاوت هستند، ولیکن شرط پیوستگی تنش‌ها ایجاب می‌کند تا تنش‌های خارج صفحه در مرز هر دو زیرلایه مجاور در هر دو ناحیه c و d مطابق رابطه (7) برابر باشند.

$$\text{at } z = z_i \quad \begin{cases} \sigma_{xz}^{L(i)c} = \sigma_{xz}^{L(i+1)c} \\ \sigma_{yz}^{L(i)c} = \sigma_{yz}^{L(i+1)c} \\ \sigma_{zz}^{L(i)c} = \sigma_{zz}^{L(i+1)c} \\ \sigma_{xz}^{L(i)d} = \sigma_{xz}^{L(i+1)d} \\ \sigma_{yz}^{L(i)d} = \sigma_{yz}^{L(i+1)d} \\ \sigma_{zz}^{L(i)d} = \sigma_{zz}^{L(i+1)d} \end{cases} \quad i = 1 \dots m - 1 \quad (7)$$



**Fig. 2** Boundary conditions and continuity of stresses along the thickness of the FML RVE with the middle 90-degree layers containing matrix cracking and delamination between the metal and composite layers.

شکل 2 شرایط مرزی و پیوستگی تنش‌ها در راستای ضخامت المان حجمی FML دارای لایه‌چینی‌های 90 درجه میانی حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌های فلز و کامپوزیت

علاوه بر شرایط مرزی ذکر شده، با اعمال شرایط تعادل نیرویی رابطه (8) برای توابع مجهول نیز استخراج می‌گردد.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \varphi_i^d(x) = 0 \\ \sum_{i=1}^m \varphi_i^c(x) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

با استفاده از شرایط مرزی و تعادلی گفته شده توابع نامعلوم f و g برحسب توابع  $\varphi_i^d(x)$  و  $\varphi_i^c(x)$  استخراج می‌گردد. همانطور که پیش از این اشاره شد به منظور استخراج توابع مجهول  $\varphi_i^c(x)$  و  $\varphi_i^d(x)$  لازم است انرژی مکمل المان حجمی (معادله (9)) مینیمم شود.

مجهول  $\varphi_i^c(x)$  و  $\varphi_i^d(x)$  (معادله 2) در نظر گرفته می‌شوند. در اینجا نیز باید شرایط تعادل (معادله 3)، شرایط مرزی و پیوستگی تنش برآورده شود.

$$\begin{aligned} \sigma_{jk}^{L(i)c} &= \sigma_{jk(0)}^{(i)} + \sigma_{jk}^{(i)c} \quad (j, k) = (x, y, z) \\ i &= 1..m \\ \sigma_{jk}^{L(i)d} &= \sigma_{jk(0)}^{(i)} + \sigma_{jk}^{(i)d} \quad (j, k) = (x, y, z) \\ i &= 1..m \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^{(i)c} &= -\frac{\varphi_i^c(x)}{t_i} \quad i = 1..m \\ \sigma_{xx}^{(i)d} &= -\frac{\varphi_i^d(x)}{t_i} \quad i = 1..m \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}^{(i)c}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}^{(i)c}}{\partial z} &= 0 \quad i = 1..m \\ \frac{\partial \sigma_{xz}^{(i)c}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}^{(i)c}}{\partial z} &= 0 \quad i = 1..m \\ \frac{\partial \sigma_{xx}^{(i)d}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}^{(i)d}}{\partial z} &= 0 \quad i = 1..m \\ \frac{\partial \sigma_{xz}^{(i)d}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}^{(i)d}}{\partial z} &= 0 \quad i = 1..m \end{aligned} \quad (3)$$

با حل معادلات تعادل (معادله 3) توزیع تنش در زیرلایه‌های FML بر حسب توابع مجهول  $f(x)$  و  $g(x)$  استخراج می‌گردد. این توابع مجهول با استفاده از حل معادلات حاصل از شرایط مرزی در راستای محور Z و پیوستگی تنش‌ها برای هر زیرلایه قابل محاسبه است. شرایط مرزی المان حجمی حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌های برای FML حاوی ترک ماتریسی میانی در لایه-های کامپوزیتی و جدایی بین لایه‌های فلز و کامپوزیت در شکل 2 نشان داده شده است. مجموع شرایط مرزی در راستای محور Z و پیوستگی تنش‌ها در این حالت به سه دسته عمده تقسیم می‌شود:

• سطوح آزاد: در حالت وجود جدایی بین لایه‌های، سطوح آزاد در راستای محور Z علاوه بر صفحات فوقانی و تحتانی المان حجمی، روی سطوح جدایی بین لایه‌های را نیز شامل می‌شود. تنش مطابق روابط (4) و (5) بر روی سطوح آزاد صفر است. در رابطه (5)، i مربوط به لایه‌های حاوی جدایی بین لایه‌های است.

$$\text{at } z = h \quad \begin{cases} \sigma_{xz}^{L(m)c} = \sigma_{xz}^{L(m)d} = 0 \\ \sigma_{yz}^{L(m)c} = \sigma_{yz}^{L(m)d} = 0 \\ \sigma_{zz}^{L(m)c} = \sigma_{zz}^{L(m)d} = 0 \\ \sigma_{xz}^{L(i)d} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{at } z = \pm z^d \quad \begin{cases} \sigma_{yz}^{L(i)d} = 0 \\ \sigma_{zz}^{L(i)d} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

که  $z^d$  مختصات صفحات حاوی جدایی بین لایه‌های در راستای محور Z در المان حجمی می‌باشد.

• صفحات تقارن: المان حجمی کامپوزیت لایه‌های حاوی ترک‌های ماتریسی و جدایی بین لایه‌های دارای تقارن هندسی و بارگذاری نسبت به صفحه

- در لایه‌های حاوی ترک ماتریسی که در ناحیه  $d$  نیز قرار می‌گیرد تنش در سطوح ترک صفر است (مطابق معادله (15) که در آن  $i$  بیانگر لایه‌های حاوی ترک ماتریسی است).

$$\begin{aligned} \sigma^{L(i)d}_{xx} &= 0 \\ \sigma^{L(i)d}_{xy} &= 0 \\ \sigma^{L(i)d}_{xz} &= 0 \end{aligned} \quad (15) \quad \text{at } x = \pm a$$

- در راستای محور  $x$  به جز سطح ترک‌ها تنش‌ها دارای پیوستگی هستند:

$$\begin{aligned} \sigma^{L(i)d}_{xx} &= \sigma^{L(i)c}_{xx} \\ \sigma^{L(i)d}_{xy} &= \sigma^{L(i)c}_{xy} \\ \sigma^{L(i)d}_{xz} &= \sigma^{L(i)c}_{xz} \end{aligned} \quad (16) \quad \text{at } x = a - d$$

- المان حجمی حول محور  $Z$  تقارن چرخشی دارد. به این معنا که هندسه و بارگذاری المان حجمی با چرخش 180 درجه حول محور  $Z$  در سرتاسر المان حجمی برقرار است.
- با توجه به اینکه المان حجمی در واقع نماینده FML در طول است و میدان تنش آن به کل نمونه قابل تعمیم است، لذا می‌بایست پیوستگی تنش‌ها در طرفین المان حجمی نیز برقرار باشد.

$$\begin{aligned} \sigma^{L(i)c}_{xx}(\text{at } x = a - d) &= \sigma^{L(i)c}_{xx}(\text{at } x = d - a) \\ \sigma^{L(i)c}_{xy}(\text{at } x = a - d) &= \sigma^{L(i)c}_{xy}(\text{at } x = d - a) \\ \sigma^{L(i)c}_{xz}(\text{at } x = a - d) &= -\sigma^{L(i)c}_{xz}(\text{at } x = d - a) \\ \sigma^{L(i)d}_{xz}(\text{at } x = a) &= -\sigma^{L(i)d}_{xz}(\text{at } x = -a) \\ \sigma^{L(i)d}_{xz}(\text{at } x = a) &= \sigma^{L(i)d}_{xz}(\text{at } x = -a) \end{aligned} \quad (17)$$

در این مطالعه رفتار لایه‌های فلزی الاستیک - پلاستیک کامل فرض می‌شود. به منظور اعمال رفتار الاستیک- پلاستیک کامل برای لایه‌های فلزی موجود در FML حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌های لازم است انرژی کرنشی به نحوی مینیمم شود که تنش در لایه‌های فلزی در هر دو ناحیه  $c$  و  $d$  از تنش تسلیم تجاوز نکنند. بنابراین قیدهای  $G^c_j$  و  $G^d_j$  برابر تنش در زیرلایه‌های فلزی 1 تا  $nn$  در دو ناحیه  $c$  و  $d$  تعریف می‌شوند. با تعریف قیود مذکور، تابع تنش به‌گونه‌ای استخراج می‌شود که تنش‌های بدست آمده در لایه‌ها نه تنها معادلات تعادل، شرایط مرزی و تعادل نیرو، بلکه رفتار الاستیک- پلاستیک کامل فلز را نیز برآورده کند. همانطور که گفته شد به دلیل تکینگی تنش در نوک ترک، تنش مجاور نوک ترک در لایه‌های فلزی افزایش یافته و این امر اجتناب‌ناپذیر است.

توابعی  $T^c$  و  $T^d$  به عنوان تابعی بر حسب توابع مجهول  $b_j^c(x)$  و  $b_j^d(x)$  و تابعی  $F^c$  و  $F^d$  که در روابط (19) نشان داده شده است، تعریف می‌شوند. در این حالت با اعمال عملگر حساب تغییرات به توابعی  $T^c$  و  $T^d$  (معادلات (20)) دستگاه معادلاتی تشکیل شده (21) که با اعمال شرایط مرزی ذکر شده در معادلات (15) تا (17) و (22) توابع مجهول  $\varphi_i^c$  و  $\varphi_i^d$  بر اساس  $b_j^c(x)$  و  $b_j^d(x)$  استخراج می‌شوند. به منظور محاسبه  $b_j^c(x)$  و  $b_j^d(x)$ ، توابع تنش بدست آمده در قید اولیه جایگزین شده و با تنش تسلیم فلز برابر قرار داده می‌شوند. نهایتاً توابع تنش و توزیع تنش در لایه‌های FML در هر دو ناحیه  $c$  و  $d$  استخراج می‌گردند.

$$\begin{aligned} G^c_j &= \sigma^{L(j)c}_{xx} \quad j=1..nn \\ G^d_j &= \sigma^{L(j)d}_{xx} \quad j=1..nn \end{aligned} \quad (18)$$

$$U'_c = 2 \int_{a-d}^{a-d} \left\{ \sum_{i=1}^m \int_{z_{i-1}}^{z_i} w_i^c dz \right\} dx + 4 \int_{a-d}^a \left\{ \sum_{i=1}^m \int_{z_{i-1}}^{z_i} w_i^d dz \right\} dx \quad (9)$$

که در این رابطه  $w_i^c$  و  $w_i^d$  بر حسب تنش‌های اغتشاشی نواحی  $c$  و  $d$  و ماتریس نرمی محلی  $S_i$  استخراج می‌شود.

$$\begin{aligned} w_i^d &= \frac{1}{2} \sigma_i^{dT} \cdot S_i \cdot \sigma_i^d \quad i=1..m \\ w_i^c &= \frac{1}{2} \sigma_i^{cT} \cdot S_i \cdot \sigma_i^c \quad i=1..m \end{aligned} \quad (10)$$

انرژی مکمل را می‌توان به صورت تابعی از توابع مجهول  $\varphi_i^c(x)$  و مشتقات آن نسبت به  $x$ ، به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$U'_c = \int_{d-a}^{a-d} F^c(\varphi_i^{c''}(x), \varphi_i^{c'}(x), \varphi_i^c(x)) dx + 2 \int_{a-d}^a F^d(\varphi_i^{d''}(x), \varphi_i^{d'}(x), \varphi_i^d(x)) dx \quad i=1..m \quad (11)$$

مینیمم سازی انرژی مکمل و استخراج توابع مجهول با اعمال اپراتور حساب تغییرات به تابعی‌های  $F^c$  و  $F^d$  و برابر قرار دادن آن با صفر مطابق معادله (12) انجام می‌شود.

$$\int_{d-a}^{a-d} \delta F^c \cdot dx + 2 \int_{a-d}^a \delta F^d \cdot dx = 0 \quad i = 1..m \quad (12)$$

با اعمال اپراتور حساب تغییرات مطابق آنچه که گفته شد روابط زیر حاصل می‌گردد:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2} \left( \frac{\partial F^d}{\partial \varphi_i^{d''}} \right) - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial F^d}{\partial \varphi_i^{d'}} \right) + \frac{\partial F^d}{\partial \varphi_i^d} &= 0 \\ \frac{d^2}{dx^2} \left( \frac{\partial F^c}{\partial \varphi_i^{c''}} \right) - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial F^c}{\partial \varphi_i^{c'}} \right) + \frac{\partial F^c}{\partial \varphi_i^c} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \left[ \left\{ \frac{\partial F^c}{\partial \varphi_i^{c'}} - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial F^c}{\partial \varphi_i^{c''}} \right) \right\} \delta \varphi_i^c \right]_{x=d-a}^{x=a-d} \\ + \sum_{i=1}^m \left[ \left( \frac{\partial F^c}{\partial \varphi_i^{c''}} \right) \delta \varphi_i^{c'} \right]_{x=d-a}^{x=a-d} \\ + \sum_{i=1}^m \left[ \left\{ \frac{\partial F^d}{\partial \varphi_i^{d'}} - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial F^d}{\partial \varphi_i^{d''}} \right) \right\} \delta \varphi_i^d \right]_{x=a-d}^{x=a} \\ + \sum_{i=1}^m \left[ \left( \frac{\partial F^d}{\partial \varphi_i^{d''}} \right) \delta \varphi_i^{d'} \right]_{x=a-d}^{x=a} \\ = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

برای حل دستگاه معادلات اوایلر-لاگرانژ و استخراج توابع ناشناخته، تعداد مشخصی شرایط مرزی مورد نیاز است. این شرایط مرزی در حالتی که المان حجمی تنها حاوی ترک ماتریسی باشد با حالتی که حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌ای باشد متفاوت است مجموع شرایط مرزی ذاتی مورد نیاز برای حل دستگاه معادلات اوایلر-لاگرانژ در المان حجمی حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌ای عبارت است از:

در روابط فوق  $G_C(Propagation)$  و  $G_d(Initiation)$  به ترتیب نرخ رهاسازی انرژی ناشی از رشد ترک ماتریسی و نرخ رهاسازی انرژی شروع جدایی بین لایه‌های می‌باشند.  $U(\rho)^c$ ,  $U(2\rho)^c$ ,  $U(\rho,d)^c$  نیز به ترتیب انرژی مکمل المان حجمی حاوی ترک ماتریسی با چگالی  $\rho$ ، انرژی مکمل المان حجمی حاوی ترک ماتریسی با چگالی  $2\rho$  و انرژی مکمل المان حجمی حاوی ترک ماتریسی با چگالی  $\rho$  همراه جدایی بین لایه‌های با طول  $d$  می‌باشند.

### 3- مدل عددی

برای مدل‌سازی عددی FML لازم است طول نمونه تا حدی بلند باشد که ابتدا و انتهای نمونه که محل‌های بارگذاری و مقید شده هستند، بر توزیع تنش در المان حجمی بی‌تأثیر باشند. همانطور که گفته شد، رفتار المان حجمی بیانگر رفتار کل لایه‌چینی می‌باشد، بنابراین به منظور کاهش زمان محاسبات، یک المان حجمی با فاصله مناسب از محل‌های بارگذاری و مقید شده، شبیه‌سازی گردید. ترک‌های ماتریسی در لایه‌های 90 درجه و جدایی بین لایه‌های در محل ترک‌ها بین لایه‌های کامپوزیت و فلز با طول مشخص شبیه‌سازی شد. ضخامت لایه‌ها در شبیه‌سازی 0.2 میلی‌متر در نظر گرفته شد و هر لایه به سه زیرلایه تقسیم گردید.

FML با لایه‌چینی s[AL/90] با خواص ذکر شده در جدول 1 برای لایه‌های فلزی و کامپوزیتی مدل گردید. لازم به ذکر است رفتار برای آلومینیوم، الاستیک - پلاستیک کامل تعریف می‌گردد.

جدول 1 خواص لایه‌های FML [32]

Table 1 Properties of FML layers [32]

کربن / اپوکسی					
$E_A$	$E_T$	$G_A$	$G_T$	$\nu_A$	$\nu_T$
208 GPa	6.5 GPa	1.65 GPa	2.3 GPa	0.25	0.41
آلومینیوم					
$E_m$	$G_m$	$\nu_m$	$\sigma_y$		
GPa 73	GPa 27	0.35	MPa 300		

مطابق مدل تحلیلی ارائه شده، بارگذاری به صورت بار کششی تک‌محوری استاتیکی می‌باشد. لازم است در شبیه‌سازی، قطعه به صورت مناسب مقید گردد. بدین منظور به سطح انتهایی FML تنش کششی در راستای  $x$  اعمال شده و در یک نقطه در راستای  $y$  مقید می‌گردد (مطابق شکل 3-a). سطح ابتدایی FML نیز در راستای  $x$  مقید می‌شود (شکل 3-b). همچنین به علت تقارن در بارگذاری و مدل، خط تقارن FML در مسیر  $x$  در راستای  $z$  مقید می‌گردد (شکل 3-c). در خصوص شبکه‌بندی مدل، نکته مهم توجه به نحوه شبکه‌بندی مدل در نزدیک محل‌های ترک و بین لایه‌ها است. همچنین در شبیه‌سازی بر پایه روش اجزای محدود، با پذیرفتن صحت روند شبیه‌سازی، برای اثبات صحت نتایج استخراجی لازم است همگرایی نتایج از نظر ابعاد دانه‌بندی نیز بررسی شود. اجزای به کار رفته در شبیه‌سازی FML از نوع خطی جزء C3D8R و تعداد 126000 المان می‌باشد.

$$T^c = F^c + \sum_{j=1}^{nn} G^c_j b^c_j$$

$$T^d = F^d + \sum_{j=1}^{nn} G^d_j b^d_j \quad (19)$$

$$\int_{a-d}^{a-d} \delta T^c \cdot dx + 2 \int_{a-d}^a \delta T^d \cdot dx = 0$$

$$i = 1..m \quad (20)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( \frac{\partial T^d}{\partial \varphi^{d''}_i} \right) - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial T^d}{\partial \varphi^{d'}_i} \right) + \frac{\partial T^d}{\partial \varphi^d_i} = 0$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( \frac{\partial T^c}{\partial \varphi^{c''}_i} \right) - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial T^c}{\partial \varphi^{c'}_i} \right) + \frac{\partial T^c}{\partial \varphi^c_i} = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^m \left[ \left\{ \frac{\partial T^c}{\partial \varphi^{c'}_i} - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial T^c}{\partial \varphi^{c''}_i} \right) \right\} \delta \varphi^c_i \right]_{x=a-d}^{x=a-d}$$

$$+ \sum_{i=1}^m \left[ \left( \frac{\partial T^c}{\partial \varphi^{c''}_i} \right) \delta \varphi^{c'}_i \right]_{x=d-a}^{x=a-d}$$

$$+ \sum_{i=1}^m \left[ \left\{ \frac{\partial T^d}{\partial \varphi^{d'}_i} - \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial T^d}{\partial \varphi^{d''}_i} \right) \right\} \delta \varphi^d_i \right]_{x=a-d}^{x=a-d}$$

$$+ \sum_{i=1}^m \left[ \left( \frac{\partial T^d}{\partial \varphi^{d''}_i} \right) \delta \varphi^{d'}_i \right]_{x=a-d}^{x=a-d} = 0 \quad (22)$$

### 2-1- محاسبه نرخ رهاسازی انرژی

حین فرآیند ایجاد ترک، میزان مشخصی انرژی تحت عنوان نرخ بحرانی رهاسازی انرژی آزاد می‌گردد. با شروع بارگذاری در صورت اینکه نرخ رهاسازی انرژی ترک ماتریسی با نرخ بحرانی رهاسازی انرژی برابر شود ترک ماتریسی در نمونه ایجاد می‌شود. با ادامه بارگذاری بر تعداد ترک‌های ماتریسی افزوده می‌شود و نرخ رشد چگالی ترک‌های ماتریسی کاهش می‌یابد. طوری که در ابتدا تعداد ترک‌های ماتریسی در زمان کمتری ایجاد شده و با ادامه بارگذاری ترک‌ها با سرعت کمتری ایجاد می‌شوند. در نتیجه به تدریج الگوی توزیع نسبتاً یکنواختی از ترک‌های ماتریسی در طول نمونه مشاهده می‌گردد و رشد ترک‌های ماتریسی در چگالی خاصی متوقف شده و دیگر ترک ماتریسی جدیدی ایجاد نمی‌شود. در این لحظه مود آسیب تغییر کرده و جدایی بین لایه‌های از محل ترک‌های ماتریسی ایجاد می‌شود. در این حالت نرخ رهاسازی شروع جدایی بین لایه‌های از نرخ رهاسازی رشد ترک ماتریسی بیشتر شده است. نقطه شروع جدایی بین لایه‌های و توقف رشد ترک‌های ماتریسی تحت عنوان وضعیت آسیب ویژه که مستقل از بارگذاری است نام‌گذاری می‌گردد [30]. در این مقاله آسیب ویژه در FML تحت بار استاتیکی و بار ثابت به طور تحلیلی بررسی شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. به این منظور ابتدا نرخ رهاسازی انرژی ناشی از رشد ترک‌های ماتریسی با استفاده از رابطه (23) با داشتن انرژی مکمل المان حجمی حاوی ترک ماتریسی استخراج می‌گردد. سپس نرخ رهاسازی انرژی شروع جدایی بین لایه‌های با در نظر گرفتن طول جدایی نزدیک به صفر مطابق رابطه (24) استخراج می‌گردد. کافی است نتایج نرخ رهاسازی انرژی رشد ترک ماتریسی با نرخ رهاسازی انرژی جدایی بین لایه‌های در چگالی‌های مختلف ترک مقایسه شود.

$$G_C(Propagation) = \frac{U(2\rho)^c - U^c(\rho)}{\Delta d} \quad (23)$$

$$G_d(Initiation) = \frac{U(\rho,d)^c - U^c(\rho)}{\Delta d} \quad \Delta d \rightarrow 0 \quad (24)$$

تهیه تصاویر مناسب از لبه نمونه‌ها که امکان تشخیص ترک‌های ماتریسی یا جدایی بین‌لایه‌ای را فراهم نماید مستلزم صیقلی و عاری بودن لبه نمونه از ناصافی است. برای این منظور لازم است لبه نمونه با استفاده از سنباده مناسب پرداخت شود. عملیات پرداخت نمونه‌ها می‌بایست با خنک کاری و شستشو از طریق پاشش آب انجام شود. نمونه‌ها برای انجام آزمایش کشش مطابق شکل 4 در ابعاد مطابق استاندارد ASTM D3039 برش داده شده و تب گذاری شدند. به منظور ثبت آسیب از دوربین Basler acA2440-35um با رزولوشن 2048Px × 2448px استفاده شد. آزمایش کشش برای پنج نمونه از FML با لایه‌چینی [AL/90<sub>3</sub>s] توسط دستگاه سنتام (SANTAM-STM150) با ظرفیت بار 15 تن تحت بار استاتیکی با کنترل جابجایی و با نرخ افزایش جابجایی 0.5 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و آسیب ایجاد شده در نمونه‌ها ثبت گردید.

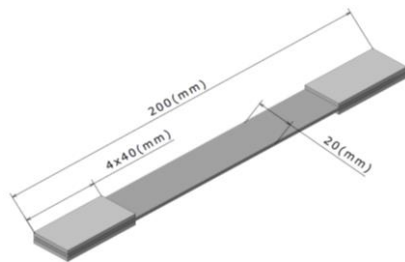


Fig. 4 FML tensile test sample dimensions according to ASTM D3039 standard

شکل 4 ابعاد نمونه آزمایش کشش FML مطابق با استاندارد ASTM D3039

#### 5- تحلیل نتایج

در این بند ابتدا توزیع تنش در FML حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین‌لایه‌ای با در نظر گرفتن قید پلاستیسیته لایه فلزی به صورت تحلیلی و عددی استخراج شده و با هم مقایسه شده است. سپس نرخ رهاسازی انرژی ناشی از رشد ترک ماتریسی و شروع جدایی بین‌لایه‌ای از مدل تحلیلی استخراج گردیده و با آسیب به دست آمده از آزمایش تجربی مقایسه شده است.

#### 5-1- مقایسه نتایج عددی و تحلیلی توزیع تنش در FML حاوی ترک ماتریسی

##### و جدایی بین‌لایه‌ای

نمونه FML با لایه‌چینی [AL/90<sub>3</sub>s] با خواص ذکر شده در جدول 1 با فاصله بین دو ترک (2a) برابر 4 میلی‌متر و طول جدایی بین‌لایه‌ای (d) 0.3 میلی‌متر شبیه‌سازی گردید و تحت تنش 150 مگاپاسکال قرار گرفت. کانتور تنش استخراج شده مطابق شکل 5 می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در لایه‌های کامپوزیتی در ناحیه حاوی جدایی بین‌لایه‌ای تنش ناچیز بوده و تنش به لایه‌های آلومینیوم اطراف منتقل شده است و تنش در لایه فلزی به تنش تسلیم (300 مگاپاسکال) رسیده است و در نتیجه در این ناحیه لایه‌های آلومینیومی وارد ناحیه پلاستیک شده‌اند.

توزیع تنش نیز برای المان حجمی FML با شرایط مذکور با استفاده از مدل تحلیلی و مدل عددی در لایه کامپوزیتی 90 درجه مطابق شکل 6 استخراج و مقایسه شده است. تنش  $\sigma_{xx}$  در راستای محوری که از وسط نمونه عبور کرده است و بین دو ترک قرار دارد استخراج شده است. تنش  $\sigma_{zz}$  نیز در مرز میان لایه‌های فلز و کامپوزیت در حد فاصل بین دو ترک بدست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش برشی  $\sigma_{xz}$  در ناحیه نوک جدایی بین‌لایه‌ای به مقدار

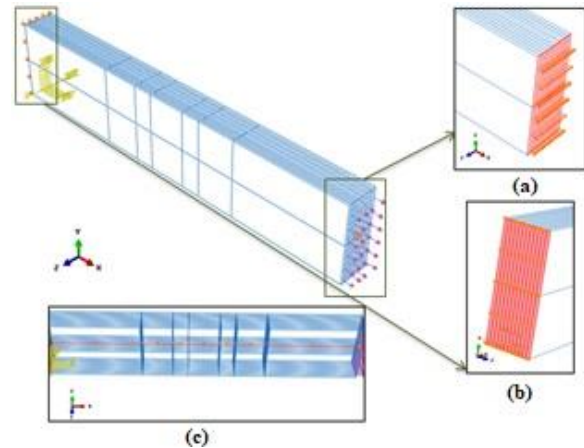


Fig. 3 Boundary conditions and loading in FML finite element simulation

شکل 3 شرایط مرزی و بارگذاری در شبیه‌سازی المان محدود FML

#### 4- آزمایش تجربی

در این پژوهش از کارال<sup>1</sup> برای انجام آزمایش‌های کشش استفاده شده است. کارال ترکیبی از لایه‌های آلومینیوم و الیاف کربن است. به منظور ساخت نمونه های FML از پارچه تک‌جهته کربن T-300 با وزن سطحی 200 گرم بر مترمربع و رزین اپوکسی LR-385 استفاده شد. برای ساخت نمونه‌ها، از ترکیب رزین با هاردنر HY-385 به نسبت وزنی 100 به 35 که مورد پیشنهاد و تأیید شرکت سازنده رزین است استفاده شد. لایه‌های فلزی نیز از جنس آلومینیوم 6061 با ضخامت 0.6 میلی‌متر می‌باشند. خواص مکانیکی کامپوزیت کربن/اپوکسی با انجام آزمایش‌های کشش مطابق استاندارد ASTM D-3039 و آزمایش برش مطابق استاندارد ASTM D-5379 استخراج گردید و در جدول 2 بیان شده است. مطابق نتایج بدست آمده از آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8، مدول الاستیسیته و تنش تسلیم در ورق آلومینیوم به ترتیب 65 گیگاپاسکال و 165 مگاپاسکال استخراج گردید.

جدول 2 مشخصات مکانیکی کامپوزیت کربن/اپوکسی

Table 2 Mechanical properties of Carbon /epoxy composite

مقدار	مشخصه مکانیکی
90	مدول کششی طولی $E_A$ (GPa)
6.7	مدول کششی عرضی $E_T$ (GPa)
3.5	مدول برشی طولی $G_A$ (GPa)
2.5	مدول برشی عرضی $G_T$ (GPa)
0.3	ضریب پواسون طولی $\nu_A$
0.5	ضریب پواسون عرضی $\nu_T$

در این پژوهش به منظور بهبود چسبندگی بین لایه‌های فلز و کامپوزیت، در ابتدا سطوح آلومینیوم با ذرات سیلیس سندبلاست شدند. سپس اسید شویی سدیم هیدروکسید (NaOH) نیز انجام گردید. در نهایت آلومینیوم با آب مقطر شسته شد و با قرارگیری در کوره با دمای 50 درجه به مدت یک ساعت خشک گردید. برای ساخت نمونه‌های FML، لایه‌های الیافی و فلزی با روش لایه‌گذاری دستی با آغشته کردن به رزین و هاردنر و با عمل‌آوری در فشار کیسه خلأ ساخته شدند.

<sup>1</sup> Carbon-fiber-reinforced aluminum laminates (CARALL)



Fig. 7 Damaged sample of FML with [AL/90<sub>3</sub>]s laminate in a tensile test  
شکل 7 نمونه گسیخته شده FML با لایه‌چینی [AL/90<sub>3</sub>]s در آزمایش کشش

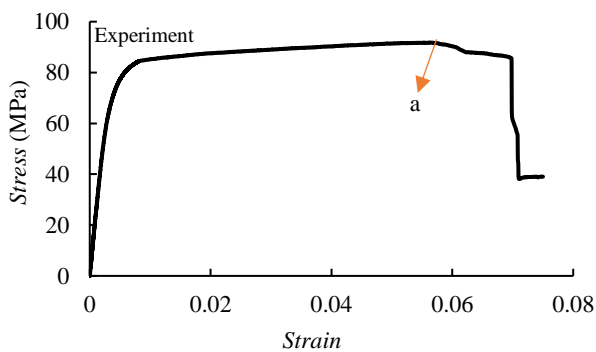


Fig. 8 Tensile Stress- Strain curve of FML with [AL/90<sub>3</sub>]s laminate  
شکل 8 منحنی تنش-کرنش استخراج شده از آزمون کشش FML با لایه‌چینی [AL/90<sub>3</sub>]s

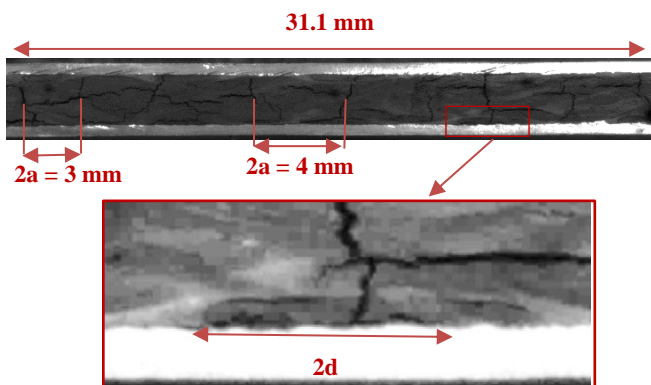


Fig. 9 FML with [AL/90<sub>3</sub>]s laminate containing matrix cracking and delamination before complete damage  
شکل 9 نمونه FML با لایه‌چینی [AL/90<sub>3</sub>]s قبل از تخریب کامل در آزمایش کشش حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌ای

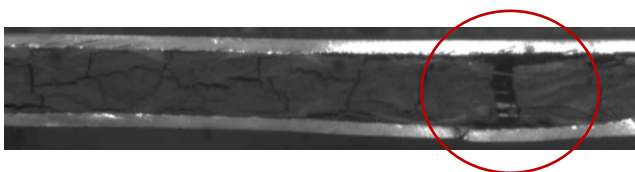


Fig. 10 Damaged FML with [AL/90<sub>3</sub>]s laminate  
شکل 10 نمونه گسیخته شده FML با لایه‌چینی [AL/90<sub>3</sub>]s

بیشینه رسیده است و با رسیدن به ترک ماتریسی به صفر میل می‌کند. تنش  $\sigma_{xx}$  نیز در میانه المان حجمی حداکثر بوده و با رسیدن به ابتدا و انتهای المان حجمی رو به صفر می‌باشد. مطابق شکل نتایج تحلیلی و عددی دارای انطباق خوبی هستند.

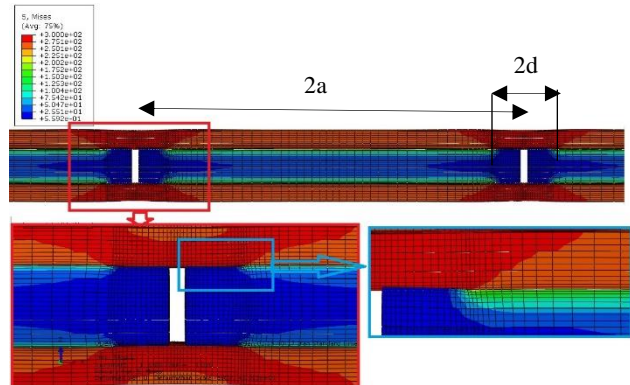


Fig. 5 The stress contour in FML under tensile loading of 150 MPa includes matrix cracking and delamination

شکل 5 کانتور تنش در FML تحت بار کششی 150 مگاپاسکال حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌ای

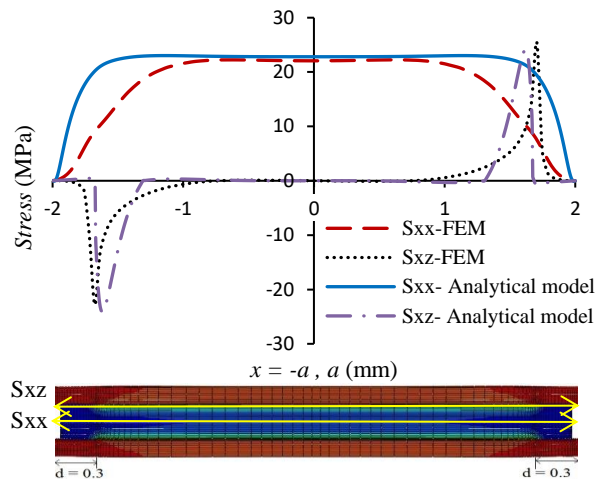


Fig. 6 Stress distribution in 90 degree layers in FML under tensile loading of 150 MPa containing matrix cracking and delamination

شکل 6 توزیع تنش در لایه 90 درجه در FML تحت بار کششی 150 مگاپاسکال حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌ای

### 2-5- بررسی تجربی و تحلیلی آسیب در FML

نمونه FML با لایه‌چینی [AL/90<sub>3</sub>]s با خواص ذکر شده در جدول 2 تحت بار کششی قرار گرفت و نمونه مطابق شکل 7 گسیخته شد. با استفاده از نمودار تنش - کرنش استخراج شده از آزمون کشش مطابق شکل 8 مشاهده می‌شود که نمونه FML تا تنش 91 مگاپاسکال (نقطه a) تنش تحمل نموده و سپس دچار افت سختی و نهایتاً تخریب شده است. در این تنش در ضخامت نمونه ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌ای مطابق شکل 9 ایجاد شده و نهایتاً پس از تخریب کامل، نمونه مطابق شکل 10 می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود ترک‌های ماتریسی با فواصل تقریباً برابر از 3 میلی‌متر تا 4 میلی‌متر و جدایی بین لایه با طول‌های متفاوت 2d تا 3 میلی‌متر در نمونه ایجاد شدند. سپس یکی از ترک‌ها کاملاً باز شده و در نزدیک همان طول جدایی بین لایه‌ای شدت یافته و در نهایت لایه فلزی در نزدیک همان ناحیه گسیخته شد. در همین لحظه کل نمونه FML نیز تخریب شد.

## 6- نتایج

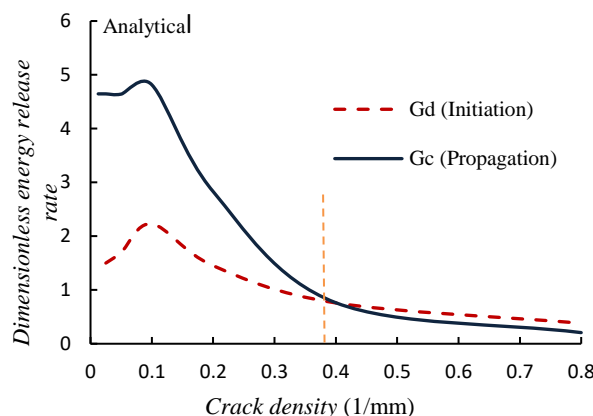
در این مطالعه مدل توسعه‌یافته برای بررسی آسیب در FML حاوی ترک ماتریسی، جدایی بین‌لایه‌ای و پلاستیسیته تحت بار کششی ارائه شد. همچنین مدل‌سازی عددی FML حاوی آسیب‌های مذکور انجام گردید. از طرفی نمونه کارال ساخته شد و تحت آزمایش کشش قرار گرفت. در نهایت نتایج زیر حاصل گردید:

- در آزمایش کشش FML، ترک‌های ماتریسی تکرار شونده با فواصل تقریباً مساوی در لایه‌های 90 درجه کامپوزیت و جدایی بین‌لایه‌ای در نزدیک ترک‌های ماتریسی مشاهده گردید. همچنین پلاستیسیته فلز در FML با داشتن منحنی تنش - کرنش استخراج شده از آزمون کشش قابل تشخیص بود.
- با استفاده از مدل تحلیلی، توزیع تنش در المان حجمی FML حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین‌لایه‌ای استخراج و با مدل عددی مقایسه شد. نتایج دارای انطباق خوبی بود.
- توزیع تنش در لایه‌های 90 درجه در المان حجمی FML حاوی ترک ماتریسی و جدایی بین‌لایه‌ای بیان‌گر بیشینه تنش برشی در ناحیه نوک جدایی بین‌لایه‌ای بود.
- با استفاده از مدل تحلیلی و مقایسه نرخ رهاسازی انرژی رشد ترک ماتریسی و نرخ رهاسازی انرژی شروع جدایی بین‌لایه‌ای، اشباع ترک ماتریسی و شروع جدایی بین لایه در چگالی ترک 0.38 استخراج گردید. این چگالی ترک در بیشتر نواحی از نمونه آزمایش شده مشاهده گردید ولی در برخی نواحی چگالی ترک تا 0.25 نیز مشاهده شد که به علت نواقص ساخت و شروع زودرس جدایی بین‌لایه‌ای بود.

## 7- مراجع

- [1] Voegelersang, L. B., Vlot, A., "Development of fibre metal laminates for advanced," Materials Processing Technology, Vol. 1, No.1, pp. 103-115, 2000.
- [2] Malekzadeh-Fard, K., Azarnia, A. H., Zolghadr, N., "Analytical modeling to predict dynamic response of Fiber-Metal Laminated Panel subjected to low velocity impact," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, pp. 331- 342, 2018.
- [3] Davar, A., Heydari Beni, M., Azarafza, R. E., skandari, J., "Parametric impact analysis on cylindrical sandwich shells with FML face and functionally graded core using a new shell theory," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No.4, pp. 2099-2115, 2023.
- [4] Bieniaś, J., Jakubczak, P., Surowska, B., "Low-energy impact behaviour and damage characterization of carbon fibre reinforced polymer and aluminium hybrid laminates," Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 15, pp. 925-932, 2015.
- [5] Pärnänen, T., Kanerva, M., Sarlin, E., Saarela, O., "Debonding and impact damage in stainless steel fibre metal laminates prior to metal fracture", Composite Structures, Vol. 119, pp. 777-786, 2015
- [6] Barbero, E., "Finite element analysis of composite materials using ANSYS," CRC Press, 2014.
- [7] "Airoldi, A., Vesco, M., Zwaag, S., Baldi, A., Sala, G., "Damage in glare laminates under indentation loads: experimental and numerical results," In: Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials, Vol. 29, 2009.
- [8] Curiel Sosa, J. L., Karapurath, N., "Delamination modelling of GLARE using Extended Finite Element Method," Composites Science and Technology, Vol. 72, No. 7, pp. 788-791, 2012.
- [9] Lopes, C. S., Remmers, J. J. C., Gurdal, Z., "Influence of Porosity on the Interlaminar Shear Strength of Fibre- Metal Laminates," Key Engineering Materials, Vol. 383, pp.35-52, 2008.

به منظور بررسی وضعیت آسیب ویژه، نرخ رهاسازی انرژی بی‌بعد شده در دو حالت برای نمونه FML با لایه‌چینی  $[AL/90_3]_s$  مطابق شکل 11 استخراج گردید. حالت اول شرایطی است که المان حجمی در ابتدا حاوی ترک ماتریسی با چگالی  $\rho$  بوده و نرخ رهاسازی انرژی از حالت ترک ماتریسی با چگالی  $\rho$  به چگالی  $2\rho$  با عنوان Gc (Propagation) در چگالی‌های مختلف ترک استخراج شده است. در حالت دوم نرخ رهاسازی انرژی در شرایطی است که المان حجمی حاوی ترک ماتریسی با چگالی  $\rho$  بوده و سپس جدایی بین‌لایه‌ای با طول d ( با طول نزدیک به صفر) ایجاد شود. در حالت دوم نرخ رهاسازی انرژی Gd (Initiation) نام‌گذاری شده است. با مقایسه دو نرخ رهاسازی انرژی مطابق شکل 11 مشاهده می‌شود که در چگالی‌های ترک کمتر از 0.38 نرخ رهاسازی انرژی ناشی از رشد ترک ماتریسی از نرخ رهاسازی انرژی ناشی از شروع جدایی بین‌لایه‌ای بیشتر بوده و بنابراین مود آسیب غالب رشد ترک ماتریسی می‌باشد. با افزایش چگالی ترک ماتریسی از 0.38 این روال برعکس شده و نرخ رهاسازی انرژی شروع جدایی بین‌لایه‌ای از نرخ رهاسازی انرژی رشد ترک ماتریسی بیشتر می‌شود. بنابراین از این نقطه ترک ماتریسی به حالت اشباع رسیده و جدایی بین‌لایه‌ای آغاز می‌گردد.



**Fig. 11** Dimensionless energy release rate for propagation of matrix cracking and initiation of delamination of FML with  $[AL/90_3]_s$  laminate  
**شکل 11** نرخ رهاسازی انرژی رشد ترک ماتریسی و شروع جدایی بین‌لایه‌ای در FML با لایه‌چینی  $[AL/90_3]_s$

با مشاهده نتایج تجربی مطابق شکل 9 با در نظر گرفتن فاصله دو ترک 3 میلی‌متر، چگالی ترک 0.34 و با در نظر گرفتن فاصله دو ترک 4 میلی‌متر، چگالی ترک ماتریسی 0.25 بر میلی‌متر حاصل شده است. در حالی که از مدل تحلیلی، چگالی ترک در حالت اشباع ترک ماتریسی 0.38 بر میلی‌متر استخراج گردید. علت اختلاف به وجود آمده در برخی از نواحی ( نواحی با فاصله ترک بیشتر از 3 میلی‌متر) را می‌توان به نواقص ساخت مربوط دانست. عدم چسبندگی مناسب بین لایه‌ها باعث می‌شود تا پس از بروز ترک ماتریسی قبل از رسیدن به حالت اشباع و در اثر ایجاد تمرکز تنش، جدایی بین‌لایه‌ای شکل بگیرد. بروز جدایی بین‌لایه‌ای زودرس نه تنها رشد ترک‌های ماتریسی را به صورت موضعی متوقف می‌سازد بلکه در رهاسازی انرژی نیز سهم دارد. حاصل آزاد شدن بخشی از انرژی در اثر بروز جدایی بین‌لایه‌ای زودرس، کاهش رشد ترک‌های ماتریسی می‌باشد.

- [30] Pakdel, H., Mohammadi, B., "Prediction of outer-ply matrix crack density at saturation in laminates under static and fatigue loading," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 139, 43-54, 2018.
- [31] Mohammadi, B., Fallah, A., Bayat, I., "Prediction of damage propagation in cross-ply laminated composites subjected to uniaxial tensile loading," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No.1, pp. 1911-1893, 2022.
- [32] Hashin, Z., Analysis of cracked laminates: A variational approach, *Mechanics of Materials*, Vol. 4, No. 2, pp. 121-136, 1985.
- [33] NAIRN, J. A., HU, S., "The Initiation and Growth of Delaminations Induced by Matrix Microcracks in Laminated Composites", *International Journal of Fracture*, Vol. 57, pp. 1-24, 1992.
- [10] Mahazeri, F., Hosseini-Toudeshky, H., Experimental "Investigations on Fracture Toughness of Sandwich Beams with Foam Core and FML face sheets," 11th International Conference on Composite Science and Technology, 2017.
- [11] Sinke, J., de Boer, H., Middendorf, P., "Testing and modeling of failure behaviour in Fibre Metal Laminates," 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2006.
- [12] Huiming, N., Yuan, L., Ning, H., Masahiro, A., Naoya, T., Yaolu, L., Liangke, W., Junhua, L., Fuhao, M., "Experimental and numerical study on the improvement of interlaminar mechanical properties of Al/CFRP laminates," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 216, pp.79-88, 2015.
- [13] Hassan, M. K., "Characterization of Face Sheet/Core Debonding Strength in Sandwiched Medium Density Fiberboard," *Materials Sciences and Applications*, No.9, pp. 673-684, 2017.
- [14] Abrate, S., "Impact on composite structures," Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 135160. 1998.
- [15] Morinie`re, F. D., Alderliesten, R. C., Yarmohammad Tooski, M., Benedictus, R., "Damage evolution in GLARE fibremetal laminate under repeated low velocity impact tests," Vol. 2, *Central European Journal of Engineering*, No. 27, pp. 603-611, 2012.
- [16] Majzoobi, G. H., Morshedi, H., Farhadi, K., "The effect of aluminum and titanium sequence on ballistic limit of bi-metal 2/1 FMLs" *Thin-Walled Structures*, Vol. 122, pp.1-7, 2018.
- [17] Ashenai Ghasemi, F., Pourkamali, A., Roozbahani, A., "Using XFEM for investigating the crack growth of cracked aluminum plates repaired with fiber metal, *Modares Mechanical Engineering*," Vol. 13, pp. 15-27, 2014.
- [18] Dia, A., Dieng, L., Gaillet, L., Gning, P., "Damage detection of a hybrid composite laminate aluminum/glass under quasi-static and fatigue loadings by acoustic emission technique," Vol. 5, 2019.
- [19] Ghajar, R., Ghadaimi, M., "A novel experimental method and computational micromechanical model for in-situ damage detection and prediction of stiffness degradation in cross-ply FML, *Composite Structures*," Vol. 305, pp. 116492, 2023.
- [20] Najafabadi, M., Hosseini Toudeshky, H., Sedighi, M., "Damage monitoring of aluminum sheet repaired with fiber metal laminate patch by acoustic emission," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No.2, pp. 1-8, 2016.
- [21] Wu, G., Yang, J. M., "Analytical modeling and numerical simulation of the nonlinear deformation of hybrid fibremetal laminates," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 13, pp. 413-425, 2005.
- [22] Kashfi, M., Majzoobi, G. H., Bonora, N., Lannitti, G., Ruggiero, A., Khademi, E., "A new overall nonlinear damage model for fiber metal laminates based on continuum damage mechanics. *Engineering Fracture Mechanics*," Vol. 206, pp. 21-33, 2019.
- [23] Chen, J. L., Sun, C. T., "Modeling of orthotropic elastic-plastic properties of ARALL laminates. *Composite Science and Technology*," Vol. 36, No. 4, pp. 321-37, 1989.
- [24] Cortes, P., Cantwell, W. J., "The prediction of tensile failure in titanium-based-thermoplastic fibre metal laminate," *Composite Science and Technology*, Vol. 66, No. 13, pp. 2306-2316, 2006.
- [25] Pavuluri, M.V., Subba, R., "Degradation model based on Tsai-Hill factors to model the progressive failure of fiber metal laminates", *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, pp. 1783-1792, 2010.
- [26] Sharma, A.P., Khan, S.H., Parameswaran, V., "Experimental and numerical investigation on the uni-axial tensile response and failure of fiber metal laminates", *Composites Part B*, Vol. 125, pp. 259-274, 2017.
- [27] Hashin, Z., "Failure criteria for unidirectional fibre composites", *Applied Mechincs*, pp. 329-34, 1980.
- [28] Mohammad-Zaheri, F., Mohammadi, B., Taheri-Behrooz, F., "Prediction of stress distribution and stiffness degradation in fiber metal laminates containing matrix cracking," *Composite Structures*, Vol. 311, pp. 116820, 2023.
- [29] Mohammadi, B., Pakdel, H., "Characteristic damage state of symmetric laminates subject to uniaxial monotonic- fatigue loading, *Engineering Fracture Mechanics*," Vol. 199, 86-100, 2018.



## قالب پیش‌نویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرم‌افزار ورد (استایل عنوان)

نام و نام‌خانوادگی نگارنده اول<sup>1</sup>، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم<sup>2\*</sup>، نام و ... نگارنده سوم<sup>3</sup>، ... (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمی نگارنده، رشته تخصصی، نام سازمان، نام شهر (استایل مشخصات نویسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* شهر، صندوق پستی 16846-13114، پست الکترونیکی نویسنده‌دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

### چکیده (سبک عنوان چکیده)

### اطلاعات مقاله:

در این قالب (تمپلیت)، شیوه‌ی تهیه‌ی سریع ساختار مقاله با استفاده از امکانات استایل (سبک) نرم‌افزار ورد برای مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت شرح داده شده است. روش قالب‌بندی مقاله، بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازه آن‌ها، به‌طور کامل در استایل‌ها تهیه شده است و کافی است نویسندگان با کپی کردن متن مقاله و چسباندن (پیست) آن در بخش‌های مختلف و انتخاب استایل مربوط، مقاله خود را تهیه نمایند. نویسندگان محترم مقالات باید توجه داشته باشند، مجله از پذیرش مقالاتی که خارج از این قالب تهیه شده باشند، معذور است. برای آماده‌سازی مقاله از همین فایل و کمک گرفتن از نوار ابزار «استایل‌ها» (Styles) استفاده کنید. توجه شود که از نسخه ورد 2010 برای نگارش مقالات استفاده شود تا هماهنگی‌های لازم بین کاربران نظیر سردبیر، دبیر تخصصی، داور و ویراستار برقرار گردد. چکیده برای مقاله پژوهشی کامل حداقل 180 و حداکثر شامل 250 کلمه می‌باشد. چکیده باید به‌طور صریح و شفاف، موضوع و هدف پژوهش، روش‌های انجام و نتایج آن را مطرح کند. در چکیده از ذکر جزئیات کار، شکل‌ها، جدول‌ها، فرمول‌ها، مراجع و پاورقی پرهیز شود. لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.

دریافت: .....

پذیرش: .....

**کلیدواژگان (استایل عنوان کلید واژگان)**

حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده کاما (استایل کلیدواژگان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

## A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname<sup>1</sup>, Fathollah Taheri-Behrooz<sup>2\*</sup>, Davoud Shahgholian<sup>3</sup>, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

### Keywords (Style: Keywords Title)

Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As:  
Composites, Foam, Shear, Deflection

### Abstract (Style: Abstract Title)

The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)

کپی و سپس چسباندن (پیست<sup>2</sup>) متن خود در این فایل، سبک<sup>3</sup> مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن می‌توانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:

Paste option → match with Destination format

### 1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1)

برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت<sup>1</sup>) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با

<sup>3</sup> Style

<sup>1</sup> Template

<sup>2</sup> Paste

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in Microsoft word," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2387-2390, 2024. <https://doi.org/...>

...

شکل‌ها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکان‌های ذکر شده، مشخص نمایید:

Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position

محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف می‌شوند.

عناوین افقی و عمودی شکل‌ها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتنالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتنالیک می‌آیند(توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتنالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن<sup>2</sup> با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین<sup>3</sup>) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

استفاده از کلمات فارسی در شکل‌ها قابل قبول نمی‌باشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاع‌ها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکل‌های هر مقاله ارائه گردند.

در کلیه‌ی محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد.

از نویسندگان محترم درخواست می‌گردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به هم‌ریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.

برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه شکل‌ها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

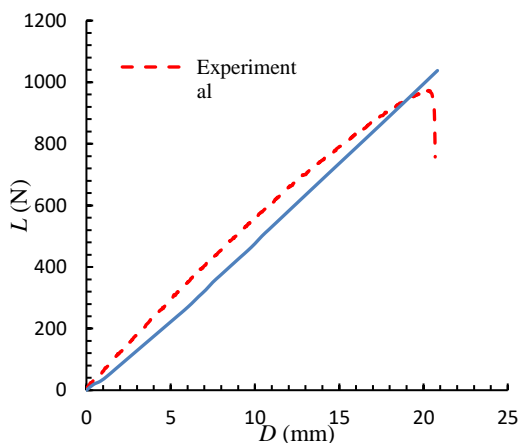


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی 5 میلی‌متر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علائمی نظیر ، : ، ؛ و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیه‌ی این علائم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته می‌شوند.

حداکثر صفحات پیش‌نویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

### 1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می‌شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می‌یابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره‌گذاری شوند و نمی‌توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,5,7].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-15]" خودداری شود. در مقاله‌های پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شده‌اند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آن‌ها باید اندک باشد.

### 1-2- اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی<sup>1</sup> مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال 1.2 صحیح و 1/2 غلط می‌باشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می‌شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می‌شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می‌شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

### 2- شکل‌ها، نمودارها و جدول‌ها (استایل عنوان سطح 1)

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت دوتستونی در مقاله درج می‌شوند. در صورتی که نتوان آن‌ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می‌شوند. (استایل متن اصلی)

### 1-1- شکل‌ها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم شکل‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، شکل‌ها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکل‌ها در زیر شکل قرار می‌گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می‌گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی شکل بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
- به همه‌ی شکل‌ها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکل‌ها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سائز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

<sup>3</sup> Gridlines

<sup>1</sup> English (Style: Sub Title)

<sup>2</sup> Times New Roman

**2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)**

نکات کلی که باید در ترسیم جدول‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- جدول‌ها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می‌گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
  - عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
  - جدول‌ها حتی‌الامکان فقط با سه خط افقی اصلی و بدون خطوط عمودی تنظیم می‌شوند.
  - به همگی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.
  - جدول‌ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
  - استفاده از اعداد فارسی در جدول‌ها قابل قبول نمی‌باشد.
  - در صورتی که از جدول‌های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می‌باشد.
  - متون داخل جدول‌ها باید به زبان فارسی و با قلم بی‌نازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون‌ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین، 7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می‌باشد.
  - جدول‌ها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینه‌های رنگی و خاکستری در تهیه جدول‌ها پرهیز نمایید.
- جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.  
برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه جدول‌ها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

**جدول 1** اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)**Table 1** Fonts sizes (Style: Table Title)

زبان متن	فارسی	لاتین
نوع قلم	بی‌نازنین	تایمز نیو رومن
اندازه قلم	10	9
عناوین بخش‌های سطح 1	10	9
عناوین بخش‌های سطح 2	9	8
متن اصلی مقاله	10	9
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	9	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها <sup>(9)</sup>	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

<sup>(9)</sup>فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

**3- روابط و فرمول‌های ریاضی (استایل عنوان سطح 1)**

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله<sup>1</sup> موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث 9pt<sup>2</sup> و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدور برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ<sup>3</sup> استفاده نشود.

در نوشتن فرمول‌ها رعایت نکات زیر الزامی است:

- 1- در فرمول‌نویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک می‌آیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک می‌آیند.
- 2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.
- 3- وقتی ادامه فرمول در سطرهای بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعد از سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله  $(a.b)$  به جای نقطه ضرب  $(a*b)$  استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^K} = Q_{11}^K \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^K + Q_{66}^K) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k + Q_{22}^K \sin^4 \theta^k \quad (1)$$

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (a-3)$$

**4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)**

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایه‌ی املا‌ی زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله‌ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصله‌ی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را به‌صورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می‌شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است.

در مورد «ها» جمع نیز دقت کنید که از کلمه‌ی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصله‌ی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل‌ها» را به‌صورت «شکل‌ها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادهات» و «اساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

**1-4- علائم، نشانه‌ها و ارقام (استایل عنوان سطح 2 و 3)**

از علائم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. استفاده از ممیز

<sup>3</sup> Math Type

<sup>1</sup> Insert -> Symbols -> Equation

<sup>2</sup> Cambria Math

تذکره: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت<sup>1</sup> در نرم‌افزار اندنوت<sup>2</sup> استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان<sup>3</sup> مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

#### مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

(توجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند)

مثال:

- [1] Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آن‌ها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

- [2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

#### کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

- [3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

#### پایان نامه‌ها:

- [4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

#### ثبت اختراع:

- [5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

#### پایگاه‌های الکترونیکی:

- [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, available in 13, February 2005.

#### استانداردها:

- [7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم‌علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست‌علایم باید دقیقاً یکسان باشد.

در صورت نیاز، لیست‌علایم و نشانه‌ها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج می‌شود. این لیست به صورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

#### 5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

$E$  مدول یانگ ( $\text{Nm}^{-2}$ )

$P$  نیرو ( $\text{Nm}^{-2}$ )

$T$  دما (K)

علایم یونانی

$\sigma$  تنش ( $\text{Nm}^{-2}$ )

$\epsilon$  کرنش

بالانویس‌ها

$k$  تعداد لایه

زیرنویس‌ها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

#### 6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست‌علایم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

#### 7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم‌تایمز نیو رومن 8 نوشته می‌شوند. شماره مرجع داخل کروه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجدداً تأکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- ✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی‌ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است، خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است [5]". این نوع ارجاع نادرست است و کمکی به خواننده در درک مطلب نخواهد داشت.
- ✓ از ارجاع به پایان‌نامه‌های کارشناسی خودداری نمایید.
- ✓ نام مجله‌ها و نظایر آن به‌طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

<sup>3</sup> Language

<sup>1</sup> JSTC.ens (EndNote Style)

<sup>2</sup> EndNote