



## بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیتهای هیبریدی بر پایه پلی پروپیلن به کمک طراحی آزمایش

منا گل پرور<sup>1</sup>، محمد فسیحی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 163-16756، mfasih@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/6/8

پذیرش: 96/7/5

### کلیدواژگان:

پلی پروپیلن  
نانوکامپوزیت  
خواص کششی  
مقاومت ضربه  
طراحی آزمایش

### چکیده

پلی پروپیلن دارای چقرمگی و مقاومت ضربه پایینی است و برای خیلی از کاربردها نیاز به اصلاح دارد. اضافه کردن الاستومرها جهت تقویت چقرمگی و مقاومت ضربه به طور معمول استفاده می شود، اما سبب افت مدول و استحکام کششی می گردد. در این پژوهش یک کامپوزیت هیبریدی پلی پروپیلن/ترموپلاستیک الاستومر/نانو سیلیکا/ سازگارکننده به روش اختلاط مذاب تهیه گردید و اثر همزمان نانوذره، الاستومر و سازگارکننده بر روی خواص کششی و ضربه نمونه‌ها به کمک روش طراحی آزمایش سطح پاسخ مطالعه شد. نتایج میکروسکوپی نشان دادند که آلیاژ تولیدی یک آلیاژ دو فازی بوده که اندازه ذرات الاستومر آن در حدود 100-400 نانومتر است و با افزایش درصد ترموپلاستیک الاستومر، اندازه ذرات آن در آلیاژ افزایش می یابد. اندازه ذرات نانوسیلیکا در حضور سازگار کننده بین 40-90 نانومتر بوده است، اما عدم استفاده از سازگار کننده سبب ایجاد کلوخه‌هایی از نانوذرات در کامپوزیت می گردد. با افزایش میزان ترموپلاستیک الاستومر، کرنش شکست و استحکام ضربه افزایش می یابد، درحالی که مدول یانگ و استحکام کششی با کاهش همراه است. اثر نانوذرات سیلیکا بر روی خواص مکانیکی به مقدار زیادی به حضور یا عدم حضور سازگارکننده ارتباط دارد. افزایش نانوسیلیکا در عدم حضور سازگار کننده سبب کاهش استحکام کششی و مقاومت ضربه می گردد. همچنین افزایش نانوسیلیکا در حضور سازگارکننده سبب افزایش مدول الاستیک می گردد. بر اساس نتایج بدست آمده از طراحی آزمایش، روابط ریاضی برای پیش بینی خواص مکانیکی ارائه گردید. استفاده از سیستم هیبریدی امکان بهبود چشمگیر مقاومت ضربه پلی پروپیلن، بدون افت مدول الاستیک را فراهم نمود.

## Investigation of mechanical properties of polypropylene-based hybrid nanocomposites using experimental design

Mona Golparvar, Mohammad Fasihi\*

School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16756-163, Tehran, Iran, mfasih@iust.ac.ir

### Keywords

Polypropylene  
Nanocomposite  
Tensile properties  
Impact strength  
Experimental design

### Abstract

Polypropylene has a poor toughness and impact strength. So, it needs to modification for some applications. Addition of elastomers to PP to enhance the toughness is a traditional way, but it causes to decrease of the modulus and tensile strength of products. In this research a hybrid composite system including PP, thermoplastic elastomer, nanoparticle and compatibilizer was prepared by melt mixing method. The interaction effect of nanoparticle, thermoplastic elastomer, and compatibilizer on the tensile and impact properties of composites were studied using the experimental design technique; response surface methodology. The results of microscopy analysis showed that the blends were two-phase, where thermoplastic elastomer was dispersed phase. The elastomeric particle size was in the range of 100-400 nm and by increasing the rubber content, rubber particle size increased. Nanosilica dispersed in the presence of compatibilizer had a particle size between 40-90 nm, while the lack of compatibilizer created some agglomerations of nanoparticles. As elastomer content increased, the strain of failure and impact strength of nanocomposites increased, while the Young modulus and tensile strength were decreased. Addition of nanosilica to the PP in the absence of compatibilizer lowered the tensile and impact strengths. While, addition of nanosilica along with compatibilizer improved the tensile modulus of blends. According to the experimental design results, some mathematical relations were presented to predict the mechanical properties. The optimal hybrid nanocomposite had significantly higher impact strength than pure PP while their moduli were in the same order.

### 1- مقدمه

قیمت ارزان، رو به افزایش است. این ترموپلاستیک کاربردهای زیادی در صنایع فیلم های بسته بندی، لوله، الیاف و قطعات خودرو دارد. اما نقطه ضعف آن، چقرمگی و مقاومت ضربه پایین آن است [1].

امروزه استفاده های صنعتی از پلی پروپیلن (PP) به دلیل فرآیندپذیری آسان، زیادافت راحت، خواص مکانیکی نسبتا خوب، پایداری حرارتی مناسب و

### Please cite this article using:

Golparvar, M. and Fasihi, M., "Investigation of mechanical properties of polypropylene-based hybrid nanocomposites using experimental design", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 307-314, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

میکروسکوپی این سیستمها نیز مطالعه شد. همچنین برای بررسی اثرات متقابل پارامترها از تکنیک طراحی آزمایش سطح پاسخ<sup>4</sup> با روش باکس-بنکن<sup>5</sup> بهره گرفته شد. این روش امکان پیش بینی خواص این کامپوزیتهای با تغییر درصد اجزا را فراهم می کند.

## 2- مواد و روشها

### 2-1- مواد

پلی پروپیلن با نام تجاری RG 1102G محصول شرکت پتروشیمی رجال به عنوان ماتریس پلیمری، پلی پروپیلن گرافت شده با مالئیک انیدرید با نام تجاری KARABOND A-100 ساخت شرکت کارانگین ایران به عنوان سازگارکننده، نانوسیلیکای پودری با نام تجاری AEROSIL® 200 ساخت شرکت Degussa آلمان با سطح ویژه  $200 \pm 25 \text{ m}^2/\text{g}$  و ترموپلاستیک الاستومر اولفینی ساخت شرکت ExxonMobil با نام تجاری 6102 Vistamaxx مورد استفاده قرار گرفتند. ترموپلاستیک الاستومر مورد استفاده، یک کوپلیمر تصادفی پروپیلن-اتیلن تولید شده با کاتالیستهای متالوسن می باشد.

### 2-2- طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ

در سیستمهایی که تعداد فاکتورهای تاثیر گذار زیاد است، بررسی تمامی حالات مختلف (طراحی فاکتوربال) عموماً شامل تعداد زیادی آزمایش می شود که انجام آن به لحاظ وقت و هزینه مقرون به صرفه نیست. تکنیکهای طراحی آزمایش که انواع مختلفی دارند قابلیت کاهش تعداد آزمایشات به میزان قابل توجهی را دارند. از روشهای طراحی آزمایش مطرح می توان به روش تاگوچی<sup>6</sup> و روش سطح پاسخ اشاره نمود. در روش سطح پاسخ، روابط غیر خطی در نظر گرفته شده و امکان بررسی اثر متقابل پارامترها نیز وجود دارد [17].

روش سطح پاسخ خود مدلهای مختلفی دارد که در این تحقیق از مدل طراحی باکس-بنکن استفاده شده است که در آن سه فاکتور متغیر میزان الاستومر، نانوسیلیکا و سازگارکننده در سه سطح مینیمم (-1)، متوسط (0) و ماکزیمم (+1) هستند. متغیرهای ورودی در سه سطح طراحی در جدول 1 نشان داده شده است. در این طراحی، الاستومر بین 10 تا 20 درصد، نانو سیلیکا بین 3 تا 9 درصد و نسبت سازگارکننده به نانوسیلیکا بین صفر تا یک تغییر می کند.

بر اساس روش سطح پاسخ 15 آزمایش با فرمولاسیون مختلف طراحی شد که در جدول 2 مشاهده می شود. انجام طراحی آزمایشات و تحلیل دادهها توسط نرم افزار Design Expert انجام شد. در این طراحی رابطه بین متغیرهای ورودی و فاکتورهای پاسخ به کمک یک معادله چند جمله ای مطابق رابطه (1) بیان می شود.

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^K \beta_j X_j + \sum_{j=1}^K \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{i < j}^K \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $Y_i$  فاکتور پاسخ،  $X$  متغیر ورودی و  $\beta_0, \beta_j, \beta_{jj}, \beta_{ij}$  به ترتیب عرض از مبدأ، اثر خطی، اثر مرتبه دوم و اثر متقابل هستند.  $K$  تعداد متغیرهای ورودی و  $\varepsilon$  میزان خطا است [18].

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بهبود چقرمگی و افزایش مقاومت ضربه پلی پروپیلن انجام شده است. از جمله کارهای تحقیقاتی می توان آلیاژی با انواع ترموپلاستیک الاستومرها مانند کوپلیمرهای بلوک استایرنی<sup>1</sup> (TPS) [2-4]، ترموپلاستیک الاستومرهای پلی آلفینی<sup>2</sup> (TPE) [6,5] و ترموپلاستیک الاستومرهای پلی یورتانی<sup>3</sup> (TPU) [8,7] را نام برد. در این آلیاژها بهبود چشمگیر کرنش شکست و مقاومت ضربه حتی تا بیش از 10 برابر نیز مشاهده می شود. اما نقطه ضعف این آلیاژها افت شدید مدول الاستیک و استحکام کششی است. باجسیک و همکارانش گزارش کردند که افزودن 20 درصد TPU به PP سبب افزایش 100 درصدی کرنش شکست می گردد. ولی مدول آلیاژ بیش از 70 درصد کاهش می یابد [7]. فصیحی و همکارانش اثر دو نوع TPE را بر استحکام ضربه و خواص کششی PP مطالعه کرده و مشاهده کردند که افزودن 20 درصد TPE به PP مقاومت ضربه را تا بیش از 12 برابر بهبود می دهد. ولی مدول آلیاژ حدود 40 درصد نسبت به PP کاهش می یابد [11]. میزان کاهش مدول و استحکام کششی بسته به نوع TPE به بیش از 50 درصد نیز می رسد [9].

از طرف دیگر، مطالعاتی در خصوص استفاده از پرکنندههای نانومتری جهت بهبود خواص مکانیکی PP انجام شده است. نانوسیلیکا یکی از در دسترس ترین و ارزان ترین نانوذرات می باشد که کاربردهای صنعتی زیادی نیز پیدا کرده است. در تحقیقات انجام گرفته در زمینه نانوکامپوزیتهای پلی پروپیلن-نانوسیلیکا، مشاهده شده است که افزودن این نانوذره به PP مدول الاستیک را افزایش می دهد. میزان افزایش مدول با افزودن 5 درصد نانوسیلیکا حدود 20-40 درصد می باشد [10,11]. اما به دلیل ماهیت غیرقطبی پلی پروپیلن و قطبی سیلیکا چسبندگی خوبی بین این اجزا ایجاد نمی شود و کرنش شکست و استحکام ضربه کاهش چشمگیری می یابد [12,13]. از این رو استفاده از سازگارکنندهها جهت بهبود چسبندگی بین نانوذرات و ماتریس پلیمری در این کامپوزیتهای ضروری به نظر می رسد [14,15].

در بین سازگار کنندهها، پلی پروپیلن گرافت شده با مالئیک انیدرید عملکرد مناسبی در سیستم پلی پروپیلن/نانوسیلیکا داشته است. گروههای مالئیک این ماده می توانند با گروههای هیدروکسیل سطح نانوسیلیکا واکنش داده و پیوند کووالانسی برقرار کنند [15]. در سیستم حاوی سازگار کننده، افزایش سیلیکا تا حدود 6 درصد سبب بهبود اندکی در استحکام کششی می گردد. اما در غلظتهای بالاتر استحکام کششی را کاهش می دهد [15]. اما سیستمهای نانوکامپوزیتهای اگرچه سبب بهبود مدول و گاهی استحکام کششی می گردند، اما چقرمگی و مقاومت ضربه را کاهش می دهند [11,12,16]. کامپوزیتهای هیبریدی کامپوزیتهایی با دو نوع پرکننده یا تقویت کننده می باشند. کامپوزیتهای هیبریدی که همزمان حاوی الاستومر و نانوذره باشند، تاکنون در مطالعات قبل مورد مطالعه قرار گرفته اند.

در این کامپوزیتهای، اثرات متقابل اجزا بر روی خواص مکانیکی نیز اهمیت می یابد که این اثرات متقابل تاکنون در مطالعات قبلی به ندرت بررسی شده اند. بررسی اثرات متقابل به دلیل تعداد زیاد آزمایشات تنها به روش طراحی آزمایش میسر می باشد. در این پژوهش، اثر افزودن همزمان نانوسیلیکا، ترموپلاستیک الاستومر اولفینی و سازگارکننده بر روی خواص کششی و استحکام ضربه پلی پروپیلن مورد بررسی قرار گرفت و ساختار

<sup>4</sup> Response Surface Methodology

<sup>5</sup> Box-Behnken

<sup>6</sup> Taguchi

<sup>1</sup> Styrenic block copolymers

<sup>2</sup> Thermoplastic polyolefin elastomers

<sup>3</sup> Thermoplastic polyurethane elastomers

**3-نتایج و بحث**

**3-1- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)**

جهت بررسی کیفیت پراکنش ذرات الاستومر و همچنین ذرات نانوسیلیکا، آزمون SEM به عمل آمد. تصاویر SEM از سطح شکست نمونه P3 (حاوی سازگار کننده) و P11 (بدون سازگار کننده) در شکل 1 قابل مشاهده است. هر دو نمونه حاوی 10 درصد TPE و 6 درصد نانوسیلیکا هستند. با توجه به اینکه نمونه قبل از SEM درون حلال نرمان هپتان قرار داده شده بود، ذرات الاستومر حل شده و از نمونه خارج شده اند. لذا جای آنها به صورت حفره دیده می‌شود. همچنین ذرات نانوسیلیکا با رنگی روش تر از ماتریس متمایز هستند. کیفیت پراکنش این ذرات در نمونه حاوی سازگار کننده مناسب تر بوده و اندازه ذرات آنها بین 40 تا 90 نانومتر متغیر است. اما در نمونه بدون سازگار کننده تجمع ذرات و کلوخه های در حدود اندازه ذرات الاستومر نیز مشاهده می‌شود.

شکل 2 تصاویر SEM نمونه‌های P11, P14, P10 و P9 که حاوی درصد‌های مختلف الاستومر هستند را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش درصد الاستومر، قطر این ذرات نیز افزایش می‌یابد. علت این امر احتمال بیشتر برخورد ذرات و به هم پیوستگی آنها حین اختلاط است. به طور میانگین، قطر متوسط در نمونه‌های 10، 15 و 20 درصد TPE به ترتیب 191، 242 و 369 نانومتر بوده است. البته حضور نانوسیلیکا و عامل سازگار کننده تاثیر اندکی بر این اندازه ذرات داشته اند.

**3-2- خواص کششی**

جدول 3 نتایج خواص کششی را در نانوکامپوزیت‌های هیبریدی مختلف نشان می‌دهد. خواص اندازه‌گیری شده شامل استحکام کششی، مدول یانگ و درصد ازدیاد طول تا شکست (کرنش شکست) می‌باشد. مدلهای ریاضی مختلفی می‌توانند برای پیش بینی اثر فاکتورها بر خواص مکانیکی به کار روند که دقت این مدلها در جدول 4 آورده شده است. بر اساس آنالیز آماری، برای تحلیل داده ها و مشخص کردن سهم تاثیر هر یک از پارامترها مدل Cubic که دارای کمترین خطا بود به کار گرفته شد. این مدل اثرات متقابل بیشتری را در نظر می‌گیرد. در ادامه به بررسی اثر هر پارامتر بر روی خواص مکانیکی به کمک این مدل پرداخته می‌شود.

**جدول 3 خواص کششی نمونه ها**

**Table 3 Tensile properties of samples**

کد نمونه ها	استحکام کششی (MPa)	مدول یانگ (Mpa)	کرنش شکست (%)
PP	35.2±0.8	1071.6±22.0	13.3±2.5
P1	28.9±0.5	981.0±20.8	16.9±3.0
P2	28.7±0.2	983.4±12.4	16.8±1.2
P3	33.4±0.9	1065.6±25.3	11.7±1.8
P4	27.3±0.5	926.5±18.7	19.7±4.4
P5	26.3±0.7	870.5±7.4	8.5±1.6
P6	28.8±0.4	978.9±14.8	19.4±3.4
P7	26.1±0.2	967.7±24.9	20.5±0.5
P8	27.8±1.3	987±14.4	16.8±4.1
P9	24.5±1.2	896.8±5.9	19.4±1.1
P10	28.3±1.0	952.9±27.2	9.9±1.4
P11	32.3±2.6	1054.9±35.7	8.4±2.2
P12	30.5±0.3	1008.6±26.5	12.3±0.5
P13	23.6±0.4	761.1±28.7	27.6±3.4
P14	33.0±0.4	1133.7±14.1	14.8±2.4
P15	30.4±0.7	1039.3±18.3	9.3±1.5

<sup>2</sup> Coalescence

**جدول 1** متغیرهای ورودی و سطح تغییرات در طراحی آزمایش باکس-بنکن  
**Table 1** Factors and levels used in the Box-Behnken design

متغیرها	واحد	سطح (-1)	سطح (0)	سطح (+1)
درصد الاستومر	%	10	15	20
درصد نانوسیلیکا	%	3	6	9
نسبت سازگار کننده*		0	0.5	1

\* نسبت سازگار کننده به نانوسیلیکا محاسبه شده است.

**جدول 2** طراحی فرمولاسیون نمونه‌ها به کمک باکس-بنکن  
**Table 2** Composition of samples using Box-Behnken design

کد نمونه‌ها	الاستومر (%)	نانوسیلیکا (%)	نسبت سازگار کننده
P1	15	6	0.5
P2	15	6	0.5
P3	10	6	1
P4	20	3	0.5
P5	15	3	1
P6	15	3	0
P7	20	9	0.5
P8	15	6	0.5
P9	20	6	0
P10	15	9	0
P11	10	6	0
P12	10	9	0.5
P13	20	6	1
P14	10	3	0.5
P15	15	9	1

**3-2- تهیه نمونه‌ها**

با توجه به فرمولاسیون طراحی شده هر نمونه توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش، اجزا فرمولاسیون به ترتیب پلی پروپیلن، الاستومر، سازگار کننده و نانوسیلیکا توسط دستگاه مخلوط‌کن داخلی برابندر مخلوط شدند. دمای اختلاط 190 °C، دور 80 rpm و زمان اختلاط 15 دقیقه در نظر گرفته شد. سپس، نمونه‌ها در دستگاه پرس گرم تحت دمای 220 °C و تا فشار 150 بار در قالبهای استاندارد کشش و ضربه، قالب‌گیری شدند. نمونه پلی‌پروپیلن خالص نیز برای مقایسه مطابق همین شرایط تهیه شد.

**4-2- آزمون‌ها**

آزمون کشش توسط دستگاه کشش سنتام مدل Santam-STM-150 و با سرعت کششی 50 mm/min مطابق با استاندارد ASTM D638 در دمای محیط انجام شد.

آزمون ضربه آیزود شکافدار<sup>1</sup>، با عمق شکاف 2.5 میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM D256 انجام شد و برای هر نمونه 5 تکرار انجام شد.

برای بررسی مورفولوژی نمونه‌ها، عکس‌های SEM از سطح شکست نمونه‌ها دستگاه VEGA II ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک تهیه شدند. برای این منظور، ابتدا سطح شکست نمونه‌ها به مدت 2 ساعت درون نرمال هپتان قرار داده شدند تا فاز الاستومری حل شده و حذف شود و سپس با پوشش نازکی از طلا پوشش داده شده تا کیفیت عکس‌ها بهبود یابد.

<sup>1</sup> Notched Izod impact test

جدول 4 آنالیز آماری و دقت مدل‌های ریاضی

Table 4 Anova analysis for evaluating model

مدلها	انحراف معیار	R <sup>2</sup>
Linear	1.44	0.75
2FI	1.42	0.76
Quadratic	1.70	0.66
Cubic	0.59	0.95

3-3- استحکام کششی

استحکام کششی پلی پروپیلن خالص حدود 35 مگاپاسکال بوده که با افزایش الاستومر تا حدود 23 مگاپاسکال نیز در نمونه P13 کاهش نشان می‌دهد. البته مقادیر بالاتر و در حدود پلی پروپیلن خالص نیز مانند P3 و P14 مشاهده می‌شود (جدول 3).

منحنی های اثر برهمکنش فاکتورهای مختلف بر روی استحکام کششی بر اساس تحلیل نتایج در شکل 3 نشان داده شده است. محور افقی سطح متغیرها را نشان می‌دهد که این سطوح بین 1- و 1 بوده و در جدول 1 تعریف شده اند. در هر شکل دو فاکتور تغییر می‌کند و فاکتور سوم در سطح صفر خود قرار دارد. تغییر سطح فاکتور سوم می‌تواند سبب تغییر شکل منحنی‌ها گردد. افزایش ترموپلاستیک الاستومر سبب کاهش چشمگیر استحکام کششی می‌گردد. این مساله در مطالعات قبل نیز مشاهده شده بود [9,1]. شکل 3a روند تغییرات استحکام کششی با تغییر درصد الاستومر در دو حالت سطح پایین (منحنی مشکی رنگ) و سطح بالای نانو سیلیکا (منحنی قرمز رنگ) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش درصد سیلیکا، روند تاثیرگذاری الاستومر بر استحکام کششی متفاوت شده و اثر آن کاهش می‌یابد. اما حضور یا عدم حضور سازگار کننده در روند تغییرات استحکام کششی تاثیر چندانی ندارد (شکل 3b).

استحکام کششی به شدت وابسته به انتقال تنش بین نانوذرات و ماتریس بین آن‌ها است. زمانی که چسبندگی مناسبی میان نانوذرات و ماتریس برقرار باشد، تنش اعمال شده از ماتریس به ذرات منتقل می‌شود و باعث بهبود استحکام کششی می‌شود. همانطور که در شکل 3c دیده می‌شود افزایش سیلیکا در عدم حضور سازگار کننده سبب کاهش کمی در استحکام کششی شده است. درحالی که در حضور سازگار کننده روند عکس دیده شده و افزایش استحکام کششی با افزایش درصد سیلیکا مشاهده می‌شود.

از قابلیت‌های طراحی آزمایش این است که خواص اندازه گیری شده را می‌تواند به صورت یک مدل ریاضی از فاکتورها ارائه نماید. بر اساس آنالیز آماری داده‌ها و با حذف جملاتی که بر اساس این آنالیز تاثیر چندانی روی استحکام کششی نداشتند (به کمک آنالیز واریانس)، مدل چند جمله‌ای ارائه شده توسط مدل طراحی باکس-بنکن مطابق الگوی معادله (1) برای استحکام کششی بدست آمد که معادله (2) می‌باشد. در این معادله A ، B و C پارامترهای ورودی، به ترتیب سطح الاستومر، سیلیکا و سازگار کننده می‌باشند. معادلات بدست آمده در حالت CODED هستند. یعنی از سطح هر فاکتور به جای مقدار عددی آن استفاده شده است.

$$Tensile\ Strength\ (MPa) = 28.22 - 4.4A + 0.9B - 0.025C + 0.32AB + 1.1BC + 0.41A^2 + 0.41B^2 + 1.83A^2B + 1.84AB^2 \quad (2)$$

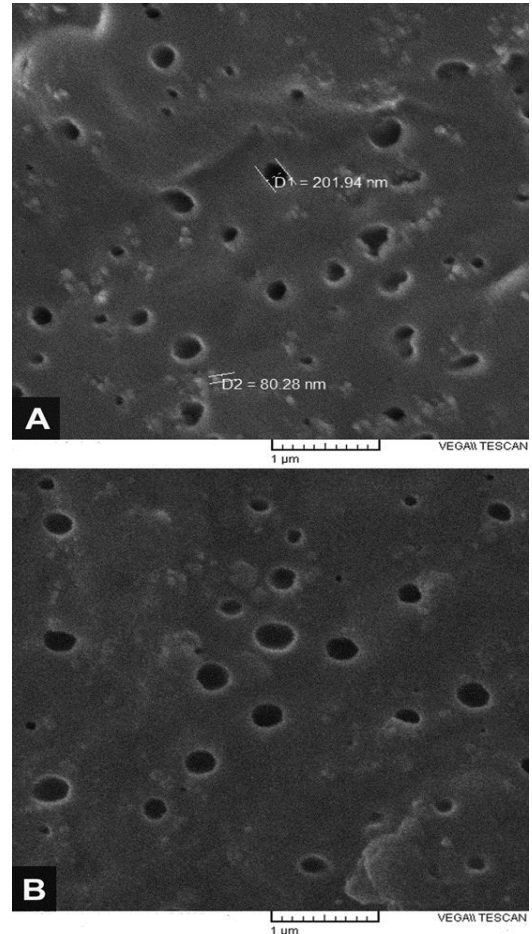


Fig. 1 SEM images of sample (A)P3 and (B)P11  
شکل 1 تصویرهای SEM نمونه P3 (A) و P11(B)

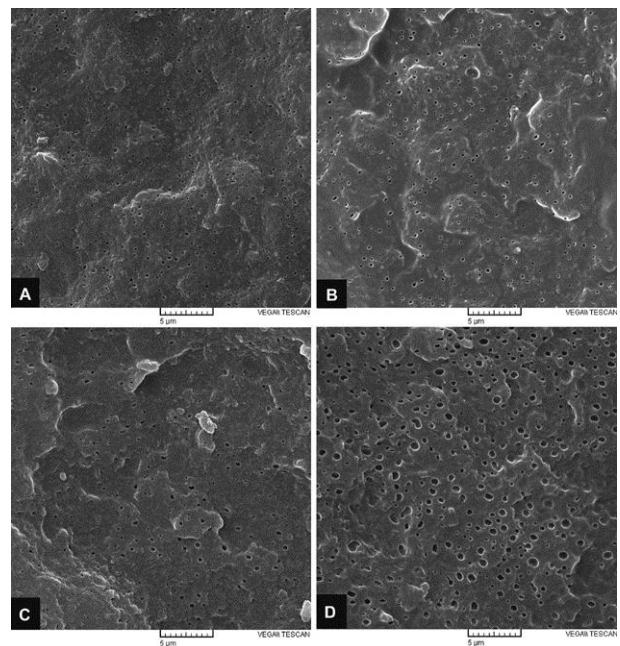


Fig. 2 SEM images of sample (A)P11, (B)P14, (C)P10 and (D)P9  
شکل 2 تصویرهای SEM نمونه P11 (A), P14(B), P10(C) و P9(D)

همانطور که دیده می‌شود، بالاترین ضریب با علامت منفی مربوط به A که درصد الاستومر است، می‌باشد. ضریب BC هم که اثر متقابل سیلیکا و سازگارکننده را نشان می‌دهد، دارای علامت مثبت است که نشان می‌دهد، افزایش همزمان نانوسیلیکا و سازگارکننده اثر مثبتی بر استحکام کششی دارد.

#### 4-3-مدول یانگ

اثرات متقابل فاکتورهای مختلف بر روی مدول یانگ در شکل 4 به شکل منحنی‌های کانتور دو بعدی رسم شده‌اند. نواحی قرمز رنگ، حد بالای مدول (حدود 1130 مگاپاسکال) و آبی رنگ حد پایین مدول (حدود 760 مگاپاسکال) را نشان می‌دهد. از آنجا که مدول الاستومر خیلی کمتر از پلی‌پروپیلن (حدود 10 مرتبه) است افزایش آن به پلی‌پروپیلن سبب کاهش چشمگیر مدول می‌شود. این مساله در شکل 4a به خوبی نشان داده شده است که افزایش الاستومر سبب تغییر رنگ ناحیه به سمت آبی رنگ می‌شود. با افزایش الاستومر جهت حفظ مدول الاستیک باید مقدار نانوسیلیکا نیز افزایش یابد. شکل 4b نشان می‌دهد که افزایش سازگار کننده اثر چندانی روی مدول الاستیک نداشته است. البته درصد میانی سازگارکننده کمی مدول بالاتری می‌دهد. علت این مساله این است که مدول سازگار کننده خود نسبت به پلی‌پروپیلن خالص کمتر است. افزایش سازگار کننده تا حدوی که سبب بهبود چسبندگی نانوذرات سیلیکا و ماتریس پلیمری شود مطلوب بوده و مدول را بهبود می‌بخشد. اما اضافه بودن سازگار کننده در سیستم خود سبب افت مدول می‌گردد.

شکل 4c نشان می‌دهد مقدار افزودن ذرات سیلیکا بدون حضور سازگارکننده تاثیر زیادی بر مدول ندارد. اما در سطح وسط و بالای سازگارکننده، افزایش سیلیکا سبب افزایش مدول می‌شود که این مساله ناشی از بهبود چسبندگی ماتریس با ذرات سیلیکا است.

مدل چند جمله‌ای ارائه شده توسط مدل طراحی باکس-بنکن برای مدول مشابه آنچه در استحکام کششی بیان شد، بدست آمد و در معادله (3) نشان داده شده است. این معادله، قابلیت پیش بینی مدول کامپوزیت را بر حسب سطح اجزا دارد.

$$\begin{aligned} \text{Modulus (MPa)} = & 983.8 - 115.6A + 35.7B - 5.5C + \\ & 41.6AB + 36.6AC + 48.7BC + 4.7A^2 + 20.6B^2 - \\ & 43.9C^2 - 56.7A^2B - 25.7A^2C + 53.6AB^2 \end{aligned} \quad (3)$$

#### 5-3-کرنش شکست

اثر متقابل فاکتورهای مختلف بر روی کرنش شکست در نمودارهای سه‌بعدی در شکل 5 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 5a دیده می‌شود، به دلیل انعطاف پذیری بالای ترموپلاستیک الاستومر، افزایش آن به پلی‌پروپیلن باعث افزایش کرنش شکست می‌شود. هرچه میزان کرنش شکست بیشتر باشد بیانگر آن است که نانوکامپوزیت چقرمگی بیشتری خواهد داشت. زمانی که میزان ترموپلاستیک الاستومر بیش از 15% می‌شود کرنش شکست به شدت افزایش می‌یابد که به نوعی تغییر رفتار از شکننده به چقرمه<sup>1</sup> را بیان می‌کند. کرنش شکست در بیشترین مقدار به 27.6 درصد میرسد که نسبت به نمونه پلی‌پروپیلن خالص افزایش بیش از 100 درصدی را نشان می‌دهد.

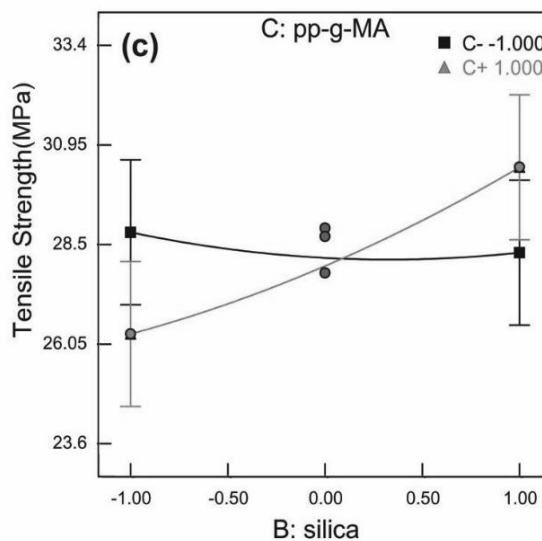
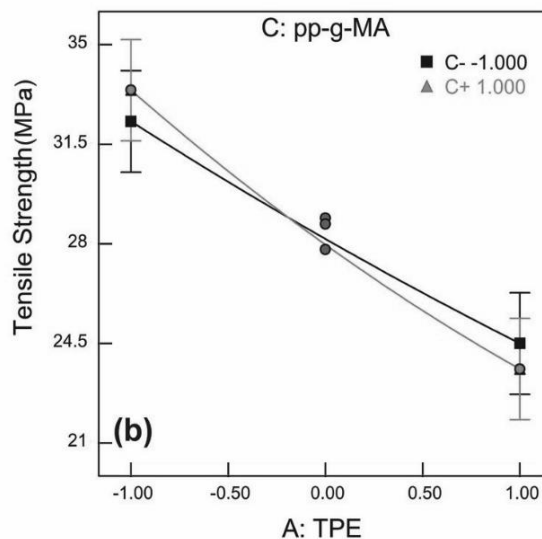
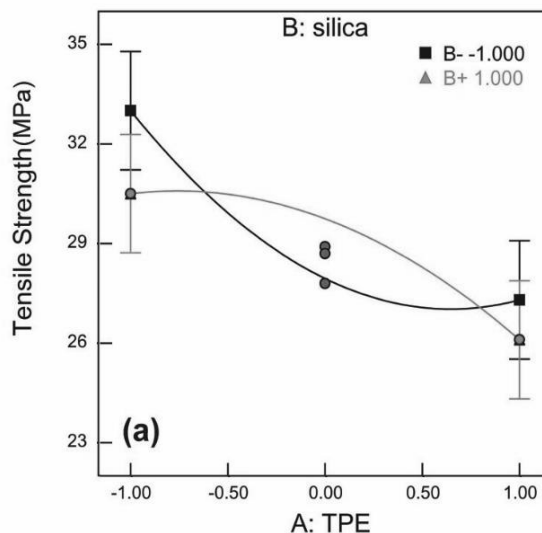


Fig. 3 Interaction effect of different factors on the tensile strength of samples

شکل 3 اثر متقابل فاکتورهای مختلف بر استحکام کششی نمونه‌ها

<sup>1</sup> Brittle-ductile transition

اثر نانوذرات سیلیکا بر روی کرنش شکست در شکل 5b نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، کرنش شکست با افزودن ذرات سیلیکا کاهش می‌یابد. این مساله به دلیل ماهیت صلب نانوذرات نسبت به پلیمر خالص است. اما حضور سازگار کننده، سبب افزایش کرنش شکست می‌گردد. این مساله به این دلیل است که حضور سازگار کننده سبب بهبود چسبندگی نانوذرات و ماتریس پلیمری گردیده و سبب می‌گردد شکست از فصل مشترک اتفاق نیفتد.

شکل 5c نشان می‌دهد که حضور سازگار کننده در درصدهای پایین الاستومر تقریباً بر کرنش شکست تاثیری ندارد. اما در درصدهای بالای الاستومر سبب بهبود کرنش شکست می‌گردد.

مدل چند جمله‌ای پیش بینی شده توسط مدل طراحی باکس-بنکن برای کرنش شکست در معادله (4) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Strain at break (MPa)} = & 16.87 - 6.7A - 2.1B - 2.88C + \\ & 0.77AB + 1.2AC + 2.25BC + 2.44A^2 + 2.53B^2 - \\ & 2.56C^2 + 1.75A^2B + 5.73A^2C + 3.42AB^2 \end{aligned} \quad (4)$$

### 6-3- مقاومت ضربه

نتایج آزمون ضربه در جدول 5 گزارش شده است. همانگونه که دیده می‌شود، مقاومت ضربه PP خالص خیلی پایین بوده و در حد  $4 \text{ kJ/m}^2$  می‌باشد. این مقدار در نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی افزایش می‌یابد و به حداکثر مقدار  $42 \text{ kJ/m}^2$  در نمونه P4 و P13 می‌رسد که افزایش بیش از 10 برابری مقاومت ضربه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه درصد TPE در این دو نمونه 20 درصد بوده است، به نظر می‌رسد مقاومت ضربه بیشتر متاثر از درصد الاستومر باشد.

اثرات متقابل فاکتورهای مختلف بر مقاومت ضربه در شکل 6 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 6a دیده می‌شود، درصد TPE دارای بیشترین تاثیر بر مقاومت ضربه است. به طور میانگین، روند تغییرات مقاومت ضربه با افزایش TPE خطی نیست.

افزایش 10 درصد TPE مقاومت ضربه PP خالص را حدود 2.5 برابر بهبود داده و از حدود  $4 \text{ kJ/m}^2$  به حدود  $10 \text{ kJ/m}^2$  رسانده است. در حالی که با افزایش 20 درصد TPE مقاومت ضربه بیش از 10 برابر افزایش داشته است. این مساله بدلیل انتقال رفتار از حالت شکننده به چقرمه در درصد معینی از TPE است که در کارهای قبلی به آن اشاره شده است و در بخش کرنش شکست نیز مطرح شد [1]. همچنین مشاهده می‌گردد که کامپوزیت‌های با درصد نانوسیلیکای بالاتر، مقاومت ضربه کمتری دارند.

شکل 6b اثر نانوذرات سیلیکا در حضور و عدم حضور سازگار کننده بر روی مقاومت ضربه را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، در حالتی که سازگار کننده در سیستم وجود نداشته باشد، نانوذرات سیلیکا سبب کاهش مقاومت ضربه نانوکامپوزیت می‌گردند. (منحنی مشکی رنگ). اما در حضور سازگار کننده (منحنی قرمز رنگ)، اولاً میزان مقاومت ضربه به صورت کلی بالاتر است. ثانیاً، افزودن نانوذرات سیلیکا سبب کاهش مقاومت ضربه نمی‌گردد. بلکه به میزان کمی می‌تواند آن را بهبود نیز ببخشد. این اثرات تفکیک شده از شکل 6a قابل استنباط نبود.

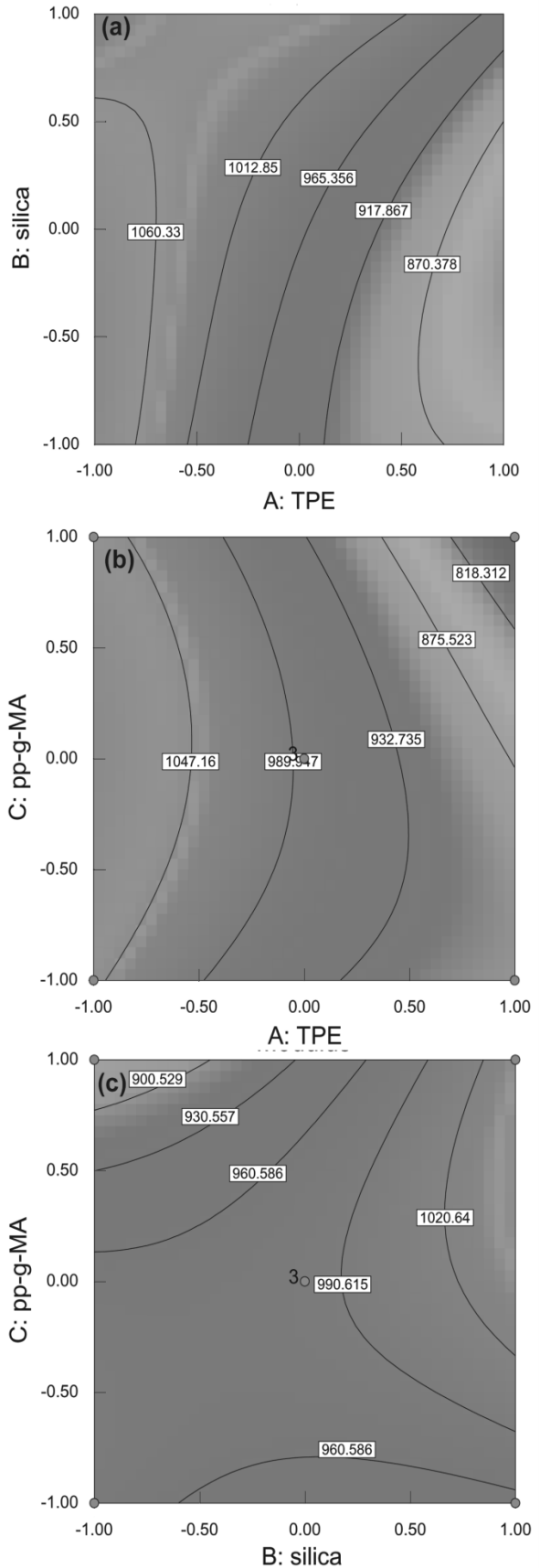


Fig. 4 Contour plots of elastic modulus as a function of different factors  
شکل 4 نمودارهای کانتور مدول الاستیک بر حسب فاکتورهای مختلف

جدول 5 استحکام ضربه نمونه ها

Table 5 Impact Strength of samples

استحکام ضربه (kJ/m <sup>2</sup> )	کد نمونه ها
4.2±0.7	PP
12.3±1.8	P1
13.5±2.3	P2
32.7±3.9	P3
41.4±5.3	P4
24.9±1.7	P5
27.2±3.4	P6
34.9±4.8	P7
12.7±2.7	P8
38.0±5.4	P9
19.6±5.9	P10
7.9±2.2	P11
14.3±3.7	P12
42.6±4.5	P13
11.9±2.7	P14
23.1±4.1	P15

مدل چند جمله‌ای ارائه شده توسط مدل طراحی باکس-بنکن برای مقاومت ضربه در معادله (5) نشان داده شده است.

$$Impact\ Strength\ \left(\frac{kJ}{m^2}\right) = 12.74 + 9.8A - 2.4B + 0.3C - 2.2AB - 5.2AC + 1.5BC + 9.7A^2 + 3.2B^2 + 7.8C^2 + 1.35A^2B + 6.87A^2C + 2.7AB^2 \quad (5)$$

بر اساس معادلات بدست آمده از اثر فاکتورهای مختلف بر خواص مکانیکی، امکان پیش بینی خواص مکانیکی برای فرمولهای تهیه نشده در محدوده سطح تغییرات فاکتورها وجود دارد. از این قابلیت می‌توان برای بهینه سازی خواص نانوکامپوزیت هیبریدی استفاده کرد. به طور مثال برای داشتن نمونه‌های با مدول و مقاومت ضربه بالا به طور همزمان، فرمولاسیونهایی توسط مدل پیشنهاد گردید که به همراه خواص پیش بینی شده آنها در جدول 6 آورده شده است.

پیش بینی خواص مکانیکی در سطوح مختلف متغیرها بوسیله معادلات 2 تا 5 انجام شده است. در نمونه‌های ارائه شده در جدول 6 به طور مثال فرمول 1 دارای مدول الاستیک در حد PP خالص است. در حالی استحکام ضربه آن بیش از 8 برابر PP خالص می‌باشد. این فرمول به نمونه P3 نزدیک می‌باشد و خواص پیش بینی شده نیز با خواص این نمونه نزدیک است. لذا این مدل قابلیت خوبی در پیش بینی خواص مکانیکی با تغییر درصد اجزا را دارد. همچنین استفاده از سیستم هیبریدی امکان بهبود چشمگیر مقاومت ضربه با حفظ مدول الاستیک PP را فراهم نمود.

جدول 6 فرمولاسیون‌های پیشنهادی مدل برای نمونه‌هایی با مدول و استحکام ضربه بهینه

Table 6 Predicted formulations with optimal modulus and impact strength

شماره	سطح الاستومر	سطح سیلیکا	سطح سازگار کننده	استحکام ضربه (kJ/m <sup>2</sup> )	مدول (MPa)
1	-1	0.34	1	34.1	1081
2	1	-1	-0.83	46.3	955
3	1	1	0.76	41.9	980
4	0.82	-1	-0.9	42.8	973

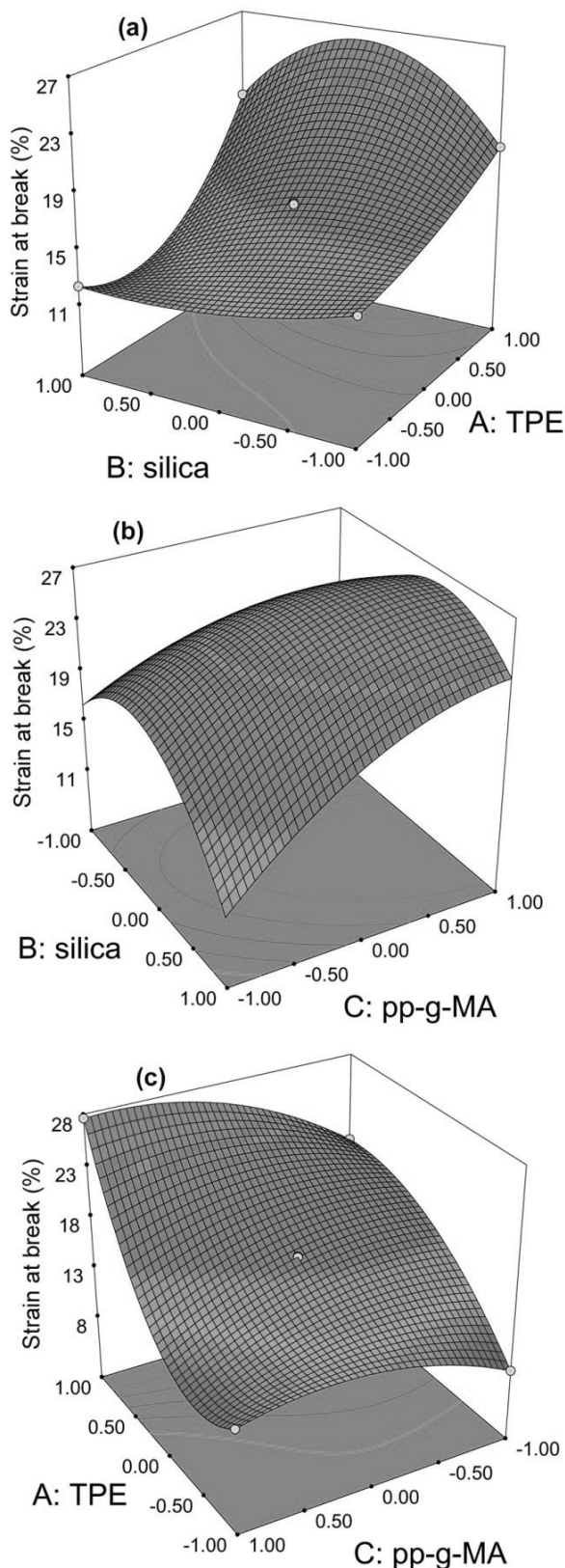


Fig. 5 3D plots of elongation at break of composites as a function of different factors

شکل 5 نمودارهای سه بعدی کرنش شکست به عنوان تابعی از فاکتورهای مختلف

مقاومت ضربه با حفظ مدول الاستیک را برای پلی پروپیلن فراهم نمود.

5-مراجع

- [1] Fasihi, M. and Mansouri, H., "Effect of Rubber Interparticle Distance Distribution on Toughening Behavior of Thermoplastic Polyolefin Elastomer Toughened Polypropylene" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 133, No. 40, pp. 44068, 2016.
- [2] Abreu, F. Forte, M. and Liberman, S., "SBS and SEBS Block Copolymers as Impact Modifiers for Polypropylene Compounds" *Journal of applied polymer science*, Vol. 95, No. 2, pp. 254-263, 2005.
- [3] Panaitescu, D.M., "Morphological Investigation of PP/Nanosilica Composites Containing SEBS" *Polymer Testing*, Vol. 31, No. 2, pp. 355-365, 2012.
- [4] Ranjbar, M. Arefazar, A. Bakhshandeh, Gh., "Constituting Balance Between Strength and Toughness in Nanocomposites Based on PP/SEBS-G-MA Blends" *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 27, No. 12, pp. 1589-1606, 2014.
- [5] Paul, S. and Kale, D., "Impact Modification of Polypropylene Copolymer with a Polyolefinic Elastomer" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 76, No. 9, pp. 1480-1484, 2000.
- [6] Liu, G. and Qiu, G., "Study on the Mechanical and Morphological Properties of Toughened Polypropylene Blends For Automobile Bumpers" *Polymer Bulletin*, Vol. 70, No. 3, pp. 849-857, 2013.
- [7] Bajsić, EG. Šmit, I. and Leskovic, M., "Blends of Thermoplastic Polyurethane and Polypropylene. I. Mechanical and Phase Behavior" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 104, No. 6, pp. 3980-3985, 2007.
- [8] Ajili, SH. Ebrahimi, NG. and Khorasani, MT., "Study on Thermoplastic Polyurethane/Polypropylene (TPU/PP) Blend as a Blood Bag Material" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 89, No. 9, pp. 2496-2501, 2003.
- [9] Liang, JZ., "Mechanical Properties and Morphology of Polypropylene/Poly (ethylene-co-octene) Blends" *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 20, No. 3, pp. 872-878, 2012.
- [10] Lee, S. Kontopoulou, M. and Park, C., "Effect of Nanosilica on the Co-Continuous Morphology of Polypropylene/ Polyolefin Elastomer Blends" *Polymer*, Vol. 51, No. 5, pp. 1147-1155, 2010.
- [11] Rong, MZ., "Structure-Property Relationships of Irradiation Grafted Nano-Inorganic Particle Filled Polypropylene Composites" *Polymer*, Vol. 42, No. 1, pp. 167-183, 2001.
- [12] Liu, Y. and Kontopoulou, M., "The Structure and Physical Properties of Polypropylene and Thermoplastic Olefin Nanocomposites Containing Nanosilica" *Polymer*, Vol. 47, No. 22, pp. 7731-7739, 2006.
- [13] Chen, JH., "Interfacial Enhancement of Nano-Sio<sub>2</sub>/Polypropylene Composites" *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No.2, pp. 252-259, 2009.
- [14] Zanjanijam, AR. Hakim, Sh. and Azizi, H., "Morphological, Dynamic Mechanical, Rheological and Impact Strength Properties of the PP/PVB Blends: The Effect of Waste PVB as a Toughener" *RSC Advances*, Vol. 6, pp. 44673-44686, 2016.
- [15] Bikiaris, DN., "Compatibilisation Effect of PP-g-MA Copolymer on Ipp/Sio<sub>2</sub> Nanocomposites Prepared By Melt Mixing" *European Polymer Journal*, Vol. 41, No.9, pp. 1965-1978, 2005.
- [16] Langroudi, AE. and Akkaf, MH., "Improvement in the Mechanical Properties of Polyester Nanocomposite with Nano - Silica Prepared by Sol-Gel Method" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 419-428, 2017. (In Persian)
- [17] Montgomery, DC., "Design and Analysis of Experiments" John Wiley & Sons, New York, 2008.
- [18] Banerjee, S., Joshi, M. and Ghosh, A.K., "Optimization of Polypropylene/Clay Nanocomposite Processing Using Box-Behnken Statistical Design" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 123, No. 4, pp. 2042-2051, 2012.

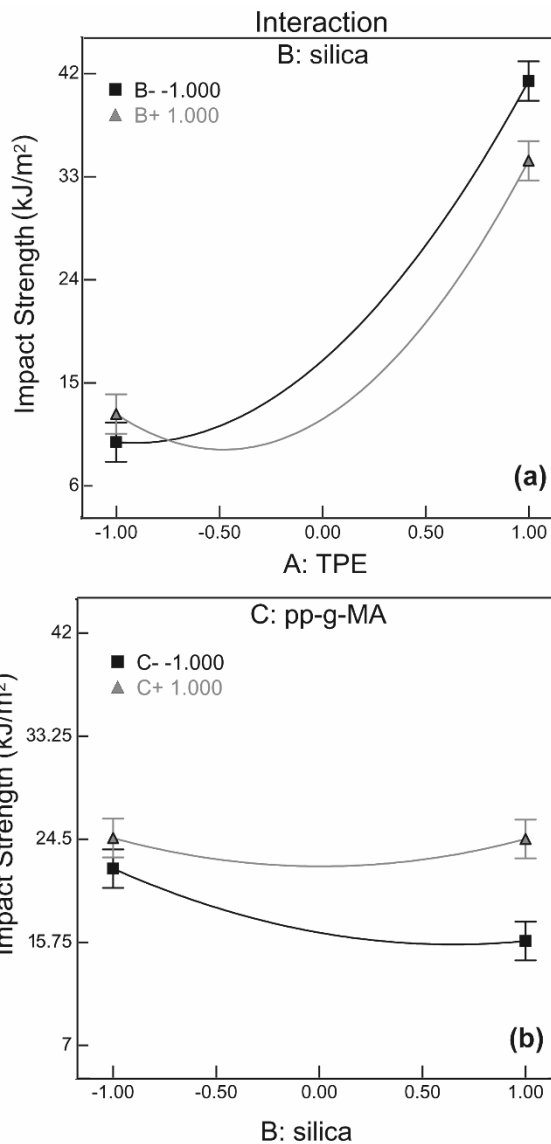


Fig. 6 Interaction effect of different factors on the impact strength of samples

شکل 6 اثر متقابل فاکتورهای مختلف بر مقاومت ضربه نمونه ها

4-نتیجه گیری

اثر همزمان سه فاکتور درصد ترموپلاستیک الاستومر، نانوسیلیکا و سازگار کننده بر روی خواص کششی پلی پروپیلن با استفاده از روش طراحی آزمایش بررسی گردید. نتایج میکروسکوپی پراکنش مناسب ذرات الاستومر و نانوذرات سیلیکا در حضور سازگار کننده را نشان داد. با افزایش میزان الاستومر، کرنش شکست تا حدود 2 برابر و مقاومت ضربه تا بیش از 10 برابر افزایش یافت، درحالی که مدول الاستیک و استحکام کششی تا حدود 30 درصد با کاهش همراه بود. افزایش نانوسیلیکا در حضور سازگار کننده سبب افزایش مدول و استحکام کششی گردید. اما در عدم حضور سازگار کننده سبب افت خواص کششی و مقاومت ضربه شد. اثرات متقابل فاکتورها بر خواص کششی و ضربه به صورت منحنی‌های برهمکنش بر اساس تحلیل داده‌ها بدست آمد و معادلات ریاضی جهت پیش بینی این خواص ارائه گردید. این روش امکان بهینه سازی خواص مکانیکی بر اساس حداکثر بودن یک یا چند خاصیت را ایجاد می‌نماید. در نهایت استفاده از سیستم هیبریدی امکان بهبود چشمگیر





## اثر نانوصفحات گرافن عامل دار بر رفتار خمشی کامپوزیت اپوکسی / الیاف بازالت

سید نوید حسینی آب‌بندانک<sup>1</sup>، سید محمد حسین سیادتی<sup>2\*</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استادیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 19991-43344، siadati@kntu.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش، اثر نانوصفحات گرافن عامل دار بر خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت مطالعه شده است. گرافن توسط عامل سیلانی تری‌آمینوپروپیل تری‌متوکسی‌سیلان عامل دار شد و چهار نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مختلف گرافن عامل دار (0.2، 0.3، 0.4 و 0.5) به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. در میان این چهار نمونه، نانوکامپوزیت حاوی 0.4% وزنی گرافن عامل دار بهترین رفتار خمشی را نشان داد. جهت بررسی اثر وجود گرافن و همچنین عامل دار کردن گرافن، دو کامپوزیت دیگر یکی فاقد گرافن و دیگری حاوی 0.4% وزنی گرافن بدون عامل نیز ساخته شدند. در مقایسه با نمونه فاقد گرافن، نانوکامپوزیت حاوی 0.4% وزنی گرافن عامل دار به ترتیب 89.6، 252.6 و 44.6 درصد افزایش در استحکام خمشی، مدول خمشی و انرژی شکست از خود نشان داد، اما نانوکامپوزیت حاوی 0.4% وزنی گرافن بدون عامل، به ترتیب 26.2 و 10.8 درصد کاهش در استحکام خمشی و انرژی شکست نشان داد، گرچه مدول خمشی آن به مقدار 3.1 درصد افزایش داشت. نتایج نشان دادند که عامل دار کردن گرافن باعث توزیع مناسب‌تر آن در زمینه و لذا برهمکنش بیشتر آن با زمینه و الیاف شده و در نتیجه باعث بهبود خواص نانوکامپوزیت شده است. مطابق با آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز، بهبود در خواص خمشی ناشی از حضور گروه‌های عاملی بر روی سطح گرافن می‌باشد که امکان چسبندگی آن‌ها را به مولکول‌های پلیمری و الیاف بازالت افزایش می‌دهد. همچنین مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده چسبندگی بهتر پلیمر به الیاف و مکانیزم‌های چقرمه‌سازی مانند انحراف ترک، تورق لایه‌های گرافن و قفل شدن ترک در حضور گرافن عامل دار بر روی سطح شکست می‌باشد.

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/7/1

پذیرش: 96/8/9

### کلیدواژگان:

گرافن  
عامل دار کردن  
الیاف بازالت  
اپوکسی  
خواص خمشی

## Effects of functionalized graphene nanoplatelets on the flexural behaviors of basalt fibers/epoxy composites

Seyd Navid Hosseini Abbandanak, M. Hossein Siadati\*, Reza Eslami-Farsani

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\* P. O. Box 19991-43344, Tehran, siadati@kntu.ac.ir

### Keywords

Graphene  
Functionalization  
Basalt fibers  
Epoxy  
Flexural properties

### Abstract

The effects of functionalized graphene nanoplatelets (FGN) on the flexural properties of basalt fibers/epoxy composites were studied. The functionalization of graphene was performed by 3-Aminopropyltrimethoxysilane. Four nanocomposites with different weight percentages of FGN (0.2, 0.3, 0.4 and 0.5) were fabricated via hand lay-up method. Among these four, the nanocomposite reinforced by 0.4 wt.% FGN showed the best flexural behavior. To investigate the effects of graphene as well as its functionalization, two other composites one without graphene and another reinforced by 0.4 wt.% of unfunctionalized graphene nanoplatelets (UFGN) were also fabricated. In comparison to the sample without graphene, the nanocomposite with 0.4 wt.% of FGN showed respectively 89.6, 252.6 and 44.6 percent improvements in the flexural strength, flexural modulus and fracture energy, but the nanocomposite with 0.4 wt.% UFGN showed respectively 26.2 and 10.8 percent decrease in the flexural strength and fracture energy, although had a slight increase of 3.1 percent in the flexural modulus. These results indicated that functionalization facilitated the dispersion of graphene in the matrix and thus enhanced its interaction to both matrix and basalt fibers. According to the Fourier transform infrared spectroscopy results, the improvement in the flexural properties is related to the functional groups whose presence on the graphene platelets enhanced better adherence to the polymer's molecules and the basalt fibers. Furthermore, scanning electron microscopy observations of the fracture surfaces showed better polymer to fiber interfacial adhesion and thus caused toughening mechanisms such as crack deflection, graphene delamination and crack pinning in the FGN containing samples.

### 1- مقدمه

خاک‌رس، سیلیکا، نانولوله کربنی و دیگر نانوذرات باعث بهبود هر دو خواص نام‌برده می‌شود. در میان تقویت‌کننده‌های کربنی، کربن سیاه در صنعت لاستیک و نانولوله کربنی در زمینه تحقیقاتی به طور ویژه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علی‌رغم تحقیقات بسیاری که تاکنون انجام گرفته است، هنوز

مواد پلیمری از استحکام و چقرمگی پایینی برخوردارند. افزودن تقویت‌کننده‌هایی مانند کربن سیاه و تقویت‌کننده‌های نانومتری همانند

### Please cite this article using:

Hosseini Abbandanak, S. N. Siadati, M. H. and Eslami-Farsani, R., "Effects of functionalized graphene nanoplatelets on the flexural behaviors of basalt fibers/epoxy composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 315-324, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

نانولوله کربنی گزینه مناسبی برای تقویت‌کنندگی و افزایش چقرمگی در پلیمرها نمی‌باشد، چرا که این نانوذره به ویژه ساختار تک دیواره آن هزینه تولید بالایی دارد و همچنین مشکلاتی مانند افزایش ویسکوزیته و ناهمسانگردی خواص را ایجاد می‌کند. در عوض گرافن تقویت‌کننده‌ای با خواص منحصر به فرد نظیر مدول یانگ برابر با 1 تراپاسکال، استحکام نهایی 130 گیگا پاسکال، پایداری شیمیایی بالا، رسانایی حرارتی و الکتریکی بسیار خوب در همه جهات، عدم سمیت، سطح ویژه بالا و از این رو ایجاد پیوند بیشتر با زمینه برای تقویت هر چه بیشتر خواص آن و نیز هزینه تولید بسیار پایین‌تر آن نسبت به نانولوله کربنی می‌باشد [4-1].

رزین اپوکسی به طور گسترده به عنوان چسب، پوشش، ماده ساختمانی و همچنین به عنوان زمینه پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده به طور ذاتی ترد می‌باشد و از این رو اشاعه آسان میکروتکرک در آن سبب محدود کردن کاربرد آن شده است. مطالعات زیادی در جهت افزایش چقرمگی رزین اپوکسی توسط لاستیک‌ها، پلیمرهای گرمانرم و ذرات غیرآلی صورت گرفته است. استفاده از لاستیک و پلیمرهای گرمانرم که حداقل مقادیر مورد استفاده آن‌ها در زمینه در حد 15 الی 20 درصد وزنی می‌باشد، سبب کاهش دیگر خواص مطلوب رزین اپوکسی می‌شود. پلیمرهای تقویت شده با نانوذرات سیلیکا توجه بسیاری را به دلیل سطح ویژه بالای سیلیکا، کارایی و قیمت مناسب آن به خود جلب نموده‌اند. متأسفانه این نانوذره به دلیل فصل‌مشترک ضعیفی که با زمینه تشکیل می‌دهد، سبب بهبود چقرمگی تا حد مطلوبی نمی‌شود که دلیل این موضوع پیونددهی ضعیف سیلیکون با مواد پایه کربنی مانند رزین اپوکسی است [6,5]. گرافن به این دلیل که از تم‌های کربن تشکیل شده، بهتر از سیلیکا با اپوکسی پیوند برقرار می‌کند و مطابق با دلایل بالا تقویت‌کننده بسیار مناسبتری برای این پلیمر است.

یکی از چالش‌هایی که برای استفاده از نانوذرات وجود دارد، توزیع یکسان آن‌ها در زمینه می‌باشد. عامل‌دار کردن نانوذرات روشی کارآمد برای بهبود توزیع یکسان آن‌ها است. گروه‌های عاملی که بر روی سطح نانوذرات پیوند داده می‌شوند به دلیل سازگاری با زمینه، پیوندی قوی‌تری با آن برقرار می‌کنند و لذا فصل‌مشترک میان نانوذره و زمینه تقویت می‌شود [7-9].

در تحقیق صورت گرفته توسط یاسمین [10]، افزودن 4 درصد وزنی گرافیت به اپوکسی سبب افزایش مدول خمشی به میزان 10% شد و همچنین دمای انتقال شیشه‌ای از 143 به 145 درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. در پژوهش دیگری، مدهوکار و همکارانش [11] تاثیر گرافیت را در افزایش خواص کششی، خمشی و بهبود استحکام برشی بین لایه‌های کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف تک‌جهته بسیار موثر اعلام نمودند. کرتکار و همکارانش [12] با افزودن گرافن به اپوکسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت حاصل را مورد بررسی قرار دادند. با افزودن 0.1% وزنی گرافن به اپوکسی چقرمگی به میزان 53% بهبود یافت. آن‌ها دلیل افزایش چقرمگی را انحراف ترک توسط صفحات گرافن اعلام نمودند.

میلر و همکارانش [13] نیز با استفاده از عامل‌دار کردن سطح گرافن با عامل سیلانی سبب ایجاد پیوند کوالانسی در فصل‌مشترک گرافن و زمینه شدند و مدول یانگ و استحکام تسلیم را با افزودن 1% وزنی گرافن به زمینه به ترتیب به میزان 50 و 30 درصد بهبود بخشیدند. مشابه با این کار را نیز چیانگ و هسو [14] انجام دادند و سبب افزایش مقاومت به اشتعال نانوکامپوزیت زمینه اپوکسی شدند.

رفیعی و همکارانش [15] به بررسی چقرمگی شکست، انرژی شکست و همچنین رفتار خستگی پلیمر تقویت شده با گرافن عامل‌دار در درصد‌های

گوناگون پرداختند. با افزودن تنها 0.125% گرافن عامل‌دار به زمینه، چقرمگی شکست و انرژی شکست به ترتیب 65 و 115 درصد افزایش یافتند و سرعت رشد ترک 25 برابر کمتر شد. این در حالی است که برای افزایش خواص به این میزان با استفاده از نانولوله‌ی کربنی، حدود یک تا دو مرتبه به تقویت‌کننده بیشتری نیاز است. علت اصلی برتری گرافن در مقایسه با نانوله‌های کربنی را می‌توان به شکل دو بعدی آن (نسبت ابعادی بالای آن) ارتباط داد [15]. در واقع گرافن با داشتن شکل صفحه‌ای در منحرف کردن ترک نقش بسیار موثرتری را ایفا می‌کند و نسبت طول به ضخامت آن بسیار بیشتر از نانولوله می‌باشد و سطح ویژه بسیار بالاتری دارد [15].

احمدی مقدم و همکارانش [16] به بررسی اثر افزودن گرافن بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه پلیمری با زمینه اپوکسی پرداختند. در این پژوهش تاثیر عامل‌های سطحی گرافن بر روی بهبود خواص بررسی شد. به این منظور گرافن بدون عامل، اکسید گرافن، گرافن با عامل سطحی آمینی و همچنین گرافن با عامل سیلانی به عنوان تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گرفتند. به طور کلی عامل‌دار کردن گرافن سبب بهبود بیشتر در خواص مکانیکی شد و گرافن عامل‌دار شده با گروه‌های عاملی آمینی و سیلانی بیشترین افزایش خواص را نشان دادند. علت بهبود در چقرمگی شکست، مدول الاستیسیته و استحکام کششی به چسبندگی بیشتر میان نانوذره و زمینه و همچنین پراکندگی بهتر نانوذره در زمینه باز می‌گردد. مطابق با این پژوهش به ترتیب 82 و 38 درصد بهبود در چقرمگی و استحکام نهایی در نمونه‌های اپوکسی-گرافن عامل‌دار در 0.5% وزنی از تقویت‌کننده به دست آمد.

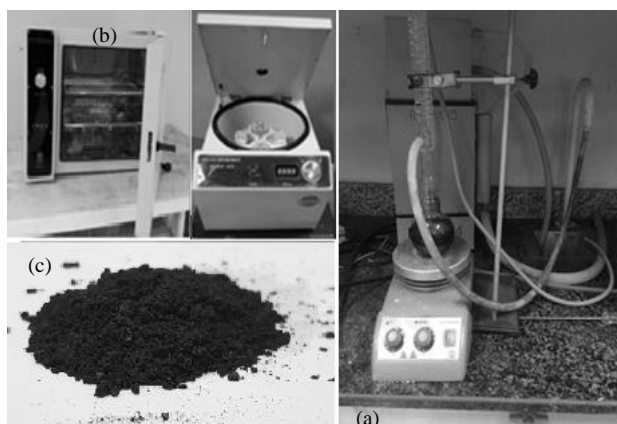
در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای تولید کامپوزیت‌های سبک با قیمت پایین توسط الیاف طبیعی انجام شده است. از آنجایی که الیاف بازالت منشأ معدنی دارند و هزینه تولید آن‌ها نیز پایین است توجه بسیاری را به خود جلب نموده‌اند. این الیاف خواص مکانیکی، فیزیکی و حرارتی خوبی دارند و همچنین زیست تخریب پذیرند. الیاف بازالت گزینه مناسبی برای جایگزین شدن به جای الیاف شیشه می‌باشند [17].

اسلامی و همکارانش [18] اثر سیکل حرارتی را بر کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بازالت و الیاف کربن در آزمون‌های سختی و ضربه شاریپی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش سختی ناشی از سیکل حرارتی برای کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف بازالت کمتر از کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن می‌باشد. همچنین استفاده از ترکیب الیاف بازالت و الیاف کربن در کامپوزیت، سبب افزایشی به میزان 190% در انرژی ضربه شد که حتی با اعمال سیکل‌های حرارتی مختلف نیز کاهش چندانی برای آن رخ نداد.

در تحقیق دیگری از اسلامی و همکارانش [19] به مقایسه تاثیر الیاف بازالت و الیاف شیشه بر رفتار خزشی کامپوزیت الیاف/فلز پرداخته شد. مطابق با نتایج به دست آمده از این پژوهش تاثیر الیاف بازالت بر افزایش مقاومت به خزش بیشتر از الیاف شیشه بود. این الیاف تاثیر چشم‌گیری بر کاهش سرعت کرنش اولیه و افزایش زمان انهدام قطعه در آزمون خزش از خود نشان داد.

در پژوهشی، لوپرستو و همکارانش [20] به مقایسه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف بازالت و کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداختند. در این پژوهش خواص کششی، خمشی، فشاری، مقاومت به ضربه و مدول خمشی کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی نتایج نشان‌دهنده برتری مکانیکی الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه می‌باشد. از این رو مطابق با دلایل بالا می‌توان در بسیاری از

در مرحله بعد عامل سیلانی برابر با وزن گرافن به محلول در حال هم‌خوردن افزوده و به طور کامل در آن حل شد. اسیدیته محلول اندازه‌گیری شد که در این حالت 11 بود و برای کاهش آن و انجام واکنش شیمیایی پیوند میان گرافن و عامل سیلانی اسیدیته محلول با افزودن هیدروکلریک اسید به 3 رسید. سپس محلول درون بالن منتقل و سیستم رفلاکس به مدت 8 ساعت در دمای 85 درجه سانتی‌گراد راه‌اندازی شد. پس از این مدت برای استخراج پودر گرافن عامل‌دار<sup>5</sup>، محلول، سانتریفیوژ شده و در آن قرار داده شد. شکل 1 سیستم رفلاکس، سانتریفیوژ، آون و پودر گرافن عامل‌دار را نشان می‌دهد.



**Fig. 1** Functionalization process of grapheme, a) Reflux system, b) Centrifuge in right and oven in left of the image and c) Functionalized graphene powder.

شکل 1 روند عامل‌دار کردن گرافن، (a) سیستم رفلاکس، (b) سانتریفیوژ در سمت راست و آون در سمت چپ و (c) پودر گرافن عامل‌دار

کاربردهایی که در آن‌ها از الیاف شیشه استفاده می‌شود، الیاف بازالت را جایگزین نمود.

مطابق با تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته، اثر تقویت‌کنندگی گرافن غالباً در کامپوزیت‌های پلیمری فاقد الیاف بررسی شده است و تعداد پژوهش‌هایی که نقش گرافن و به خصوص گرافن عامل‌دار را در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بررسی کنند بسیار اندک می‌باشد. نیکولاس و همکارانش [21] تاثیر گرافن را بر افزایش خواص مکانیکی بین لایه‌های کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزودن 0.25% وزنی گرافن به زمینه، استحکام خمشی به میزان 29% افزایش می‌یابد. همچنین نانوکامپوزیت با همین درصد گرافن، 25% افزایش در چقرمگی را در آزمون چقرمگی شکست نشان داد. علاوه بر این، مطابق با نتایج تحقیق بولوت [22]، گرافن بیشترین اثر خود را در درصد وزنی 0.1 در کامپوزیت اپوکسی/بازالت نشان داد که استحکام خمشی و مدول خمشی در این حالت، به ترتیب 30.2 و 67.9 درصد افزایش یافتند.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته و نقش گرافن و جایگاه الیاف بازالت در کامپوزیت‌های پلیمری (که به آن‌ها اشاره شد)، هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر عامل‌دار کردن گرافن بر روی رفتار خمشی کامپوزیت زمینه پلیمری اپوکسی/الیاف بازالت است. به این منظور، در ابتدا عملیات اصلاح سطحی برای عامل‌دار کردن گرافن انجام شد و نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با درصد‌های وزنی متفاوت گرافن عامل‌دار ساخته شدند. همچنین نانوکامپوزیتی حاوی گرافن بدون عامل در درصدی برابر با درصد بهینه نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با گرافن عامل‌دار تهیه شد تا تاثیر عامل‌دار کردن بر روی خواص و ریزساختار نانوکامپوزیت نمایان شود.

## 2- بخش تجربی

### 1-1- مواد

رزین اپوکسی 506 به همراه هاردنر اچ-ای-11<sup>1</sup> با نسبت 100:15 از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شد و به عنوان زمینه مورد استفاده قرار گرفت. پارچه الیاف بازالت با بافت اطلس و چگالی سطحی 350 گرم بر مترمربع از شرکت بلژیکی بازالتکس<sup>2</sup> و همچنین نانوصفحات گرافن از شرکت آمریکایی تحقیقات نانومواد یو-اس<sup>3</sup> تهیه شدند. هر ورق گرافنی از تعدادی گرافن تک‌لایه تشکیل شده است. ورق‌های گرافن دارای حداکثر 32 لایه می‌باشند که 2-18 نانومتر ضخامت دارند. همچنین قطر ورق‌ها 40-80 نانومتر و خلوص، سطح ویژه و چگالی گرافن به ترتیب 99.5%، 150-200 مترمربع بر گرم و 2.2-1.9 گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. به جهت عامل‌دار کردن گرافن، عامل سیلانی با نام تری‌آمینوپروپیل تری‌متوکسی‌سیلان از شرکت سیگما-آلدריך<sup>4</sup> خریداری شد.

### 2-2- عامل‌دار کردن گرافن

عامل‌دار کردن سطح گرافن به منظور افزایش چسبندگی و پراکندگی مناسب‌تر آن در زمینه مطابق با پژوهش صورت گرفته توسط خسروی و همکارانش [23] انجام شد. در ابتدا مقداری معین از گرافن (1 گرم) به بشر حاوی حلال اتانول و آب با نسبت اتانول به آب برابر با 5:95 اضافه شد و محلول حاصل برای پراکندگی مناسب گرافن به صورت مکانیکی هم‌زده شد.

### 3-2- ساخت نانوکامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت/گرافن

ساخت نانوکامپوزیت زمینه اپوکسی به روش لایه‌گذاری دستی نیز مطابق با پژوهش خسروی و همکارانش [23] انجام شد. برای این منظور در ابتدا مخلوط‌هایی از رزین با درصد‌های 0، 0.2، 0.3، 0.4 و 0.5 از گرافن عامل‌دار شده به ترتیب به مدت 15 و 60 دقیقه تحت عملیات هم‌زدن مکانیکی و آلتراسونیک (با توان 200 وات و فرکانس 24 کیلوهرتز) قرار گرفتند. پس از پراکنده شدن گرافن عامل‌دار در زمینه، هاردنر به مخلوط اضافه و هم‌زده شد. در ادامه، پارچه الیاف بازالت (6 لایه) به مخلوط حاصل آغشته شد و در نهایت نانوکامپوزیت ساخته شده در دمای اتاق به مدت 1 هفته تحت پخت قرار گرفت. پس از شناسایی درصد بهینه گرافن نیز برای مقایسه تاثیر عامل‌دار کردن، نمونه‌های نانوکامپوزیت با درصد مشابه گرافن غیرعامل‌دار<sup>6</sup> ساخته شد. شکل‌های 2-a تا 2-c، به ترتیب عملیات آلتراسونیک جهت پراکنده‌سازی گرافن در اپوکسی، نمونه‌های خمش آزمایش شده و آزمون خمش سه نقطه را نشان می‌دهند.

### 4-2- مشخصه‌یابی

برای اثبات عامل‌دار شدن گرافن، پودر گرافن دارای عامل تری‌آمینوپروپیل تری‌متوکسی‌سیلان و گرافن بدون عامل به روش طیف‌سنجی مادون قرمز دگرگونی فوری<sup>7</sup> با استفاده از اسپکترومتر جاسکو<sup>8</sup> در گستره 400-4000

<sup>5</sup> Functionalized Graphene

<sup>6</sup> Unfunctionalized Graphene

<sup>7</sup> Fourier Transform Infrared Spectroscopy

<sup>8</sup> JASCO

<sup>1</sup> HA-11

<sup>2</sup> Basaltex

<sup>3</sup> US Research Nanomaterial

<sup>4</sup> Sigma-Aldrich

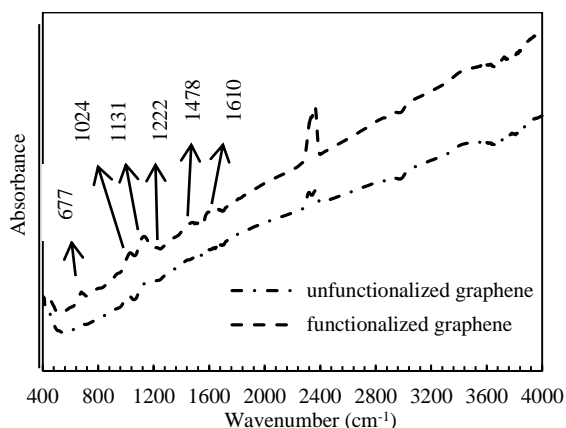


Fig. 3 FTIR curve of functionalized and unfunctionalized graphene

شکل 3 نمودار طیف‌سنجی مادون قرمز گرافن عامل‌دار و گرافن بدون عامل

تصاویر شکل 4 به بررسی اصلاح شدن گرافن می‌پردازند. شکل 4-a تصویر آنالیز سطحی از پودر گرافن را نشان می‌دهد. برای بررسی تصویری مکان‌های عناصر سیلیسیوم و نیتروژن بر روی سطح گرافن، آنالیز صفحه‌ای با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از تصویر نشان داده شده در شکل 4-a به عمل آمد. نتایج این آنالیز در تصاویر (b)، (c) و (d) از شکل 4 نشان داده شده است. شکل 4-b آنالیز صفحه‌ای سیلیسیوم را نشان می‌دهد که مکان این عنصر با نقاط سبز نشان داده شده است. مطابق با این تصویر، توزیع سیلیسیوم بر روی سطح گرافن مناسب بوده و همچنین مکان‌هایی با کلوخه سیلیسیوم نیز وجود دارند. شکل 4-c مکان‌های عنصر نیتروژن (نقاط آبی) را بر روی سطح گرافن نشان می‌دهد. توزیع این عنصر نیز مناسب می‌باشد. البته آنالیز عناصری مانند نیتروژن به دلیل سبک بودن آن‌ها مشکل‌تر از آنالیز عناصر سنگین‌تر مانند سیلیسیوم بوده، اما در هر صورت با استفاده از این آنالیز وجود سیلیسیوم اثبات شد که دلیل محکمی برای اصلاح شدن گرافن می‌باشد. طبق محاسبات کامپیوتری، به ترتیب 11.4 و 4.3 درصد از سطوح شکل‌های 4-b,c توسط نقاط سبز و آبی پوشیده شده‌اند. شکل 4-d نیز آنالیز صفحه‌ای عنصر کربن (نقاط قرمز) را نشان می‌دهد که جز اصلی گرافن می‌باشند.

آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نیز از همین پودر به عمل آمد و نمودار حاصل از آن در شکل 4-e نشان داده شده است. این نمودار وجود عناصر سیلیسیوم و نیتروژن را بر روی سطح گرافن ثابت می‌کند. حضور این عناصر بر روی سطح گرافن حاکی از اصلاح شدن آن و تشکیل پیوند با این عناصر می‌باشد. از آنجایی که گرافن بدون عامل قابلیت توزیع ضعیفی در پلیمر دارد، در صورت تشکیل پیوند با این عناصر توزیع و چسبندگی آن در زمینه افزایش می‌یابد. در این نمودار شدت پیک، نشان‌دهنده میزان حضور عنصر در ماده تحت آنالیز می‌باشد. شدت پیک‌های سیلیسیوم و نیتروژن قابل ملاحظه بوده و این نشان می‌دهد که سطح گرافن به خوبی اصلاح شده است.

$\text{cm}^{-1}$  مطالعه شدند. همچنین جهت تشخیص بهتر، عامل‌دار شدن پودر گرافن آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس<sup>1</sup> و آنالیز صفحه‌ای<sup>2</sup> از پودر گرافن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>3</sup> مدل تی‌اسکن<sup>4</sup> به عمل آمد.

نمونه‌های خمش مطابق با استاندارد دی-790<sup>5</sup> تهیه شده و با دستگاه کوپا<sup>6</sup> 10 تنی در دمای محیط تحت آزمون خمش سه نقطه با تکرار 4 نمونه برای هر درصد از نانوکامپوزیت قرار گرفتند (شکل 2-c). استحکام خمشی، مدول خمشی و انرژی شکست نمونه‌ها مطابق با همین استاندارد اندازه‌گیری شد. پس از آزمون خمش نیز سطح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل تی‌اسکن تحت بررسی قرار گرفت.

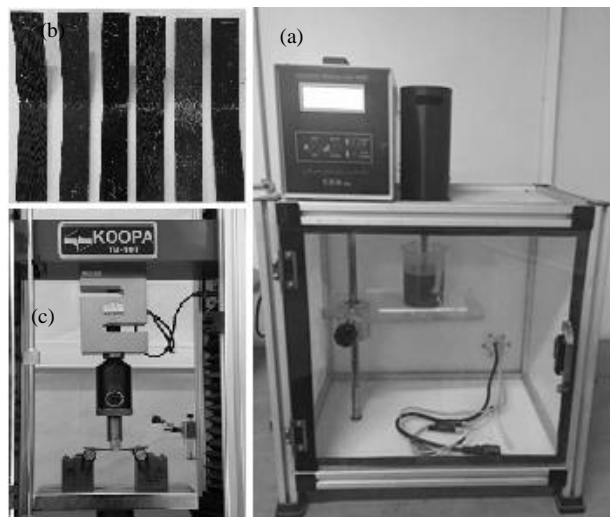


Fig. 2 Dispersing of graphene in epoxy and testing of bending samples. a) Ultrasonic operation, b) A number of tested bending samples and c) three-point bending test.

شکل 2 پراکنده‌سازی گرافن در اپوکسی و آزمون نمونه‌های خمش. (a) عملیات آلتراسونیک، (b) تعدادی از نمونه‌های خمش آزمایش شده و (c) آزمون خمش سه نقطه

### 3- نتایج و بحث

برای افزایش چسبندگی و پراکندگی مناسب‌تر گرافن در زمینه از عملیات اصلاح سطحی استفاده شد. شکل 3 نمودار تحلیل طیف‌سنجی مادون قرمز گرافن را در دو حالت عامل‌دار و بدون عامل نمایش می‌دهد. پیک‌هایی که با فلش سیاه‌رنگ نشان داده شده‌اند، حاکی از عامل‌دار شدن سطح گرافن می‌باشند. پیک با عدد موج  $677 \text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده پیوند گروه OH و حضور CH خارج از صفحه بر روی سطح گرافن می‌باشد. همچنین پیک‌های با اعداد موج  $1024 \text{ cm}^{-1}$  و  $1131 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب ارتعاشات ناشی از پیوندهای Si-O-Si و O-Si را نشان می‌دهند. وجود این پیک‌ها پیوند شیمیایی گرافن با عامل سیلانی و عامل‌دار شدن گرافن را اثبات می‌کند. البته پیک  $1024 \text{ cm}^{-1}$  در نمودار مربوط به گرافن بدون عامل نیز وجود دارد که ناشی از ارتعاشات پیوند C-C می‌باشد. پیک کوچک  $1222 \text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده ارتعاشات کششی پیوند C-N است. دو پیک پهن در اعداد موج  $1478 \text{ cm}^{-1}$  و  $1610 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب حضور گروه‌های  $\text{CH}_2$  و  $\text{CH}_3$  و ارتعاشات خمشی پیوند  $\text{NH}_2$  را در صفحات گرافنی نشان می‌دهند [24].

<sup>1</sup> Energy Dispersive X ray

<sup>2</sup> MAP Analysis

<sup>3</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>4</sup> TESCAN

<sup>5</sup> ASTM D790

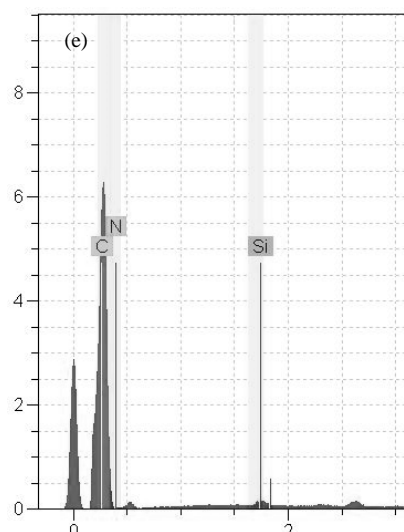
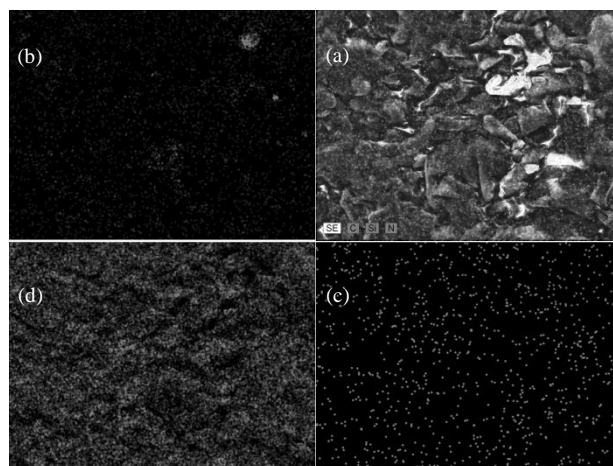
<sup>6</sup> Koopa

خواص رخ می‌دهد. از آنجایی که نانوذرات نسبت سطح به حجم بالایی دارند از انرژی سطحی بالایی برخوردار بوده و از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار می‌باشند. این مساله برای نانوذره‌های مانند گرافن که ساختار لایه‌ای داشته و در میان نانوذرات بیشترین سطح ویژه را دارد بسیار قابل توجه‌تر می‌باشد. با افزایش مقدار گرافن در زمینه، فاصله آن‌ها از یکدیگر کاهش یافته و از این رو برای کاهش آنتالپی سیستم که یک عمل خود به خودی است، نانوصفحات گرافن به یکدیگر چسبیده و تشکیل کلوخه‌های گرافن را می‌دهند. در نتیجه با کاهش مقدار سطح آزاد، انرژی سیستم کاهش یافته و سیستم به حالت تعادل نزدیک‌تر می‌شود. اما این به هم چسبیدن ذرات سبب ایجاد کلوخه‌هایی درشت می‌شود که می‌توانند همچون نقاط تمرکز تنش در زمینه یا در فصل مشترک زمینه و الیاف عمل نموده و سبب انهدام سریعتر و راحت‌تر قطعه شوند. برای جلوگیری از کلوخه شدن نانوذرات عملیات التراسونیک انجام شد، اما از آنجایی که پس از این عملیات و در حین پخت و ساخت نانوکامپوزیت زمان کافی برای کلوخه شدن وجود دارد، لذا به هم پیوستن صفحات گرافن جهت کاهش انرژی در این زمان برای رزین‌هایی با درصد بالای گرافن راحت‌تر اتفاق می‌افتد.

برای بررسی تاثیر عامل‌دار کردن بر روی توزیع مناسب‌تر گرافن در زمینه، استحکام خمشی نمونه حاوی 0.4% وزنی گرافن بدون عامل برای مقایسه با نمونه شامل 0.4% گرافن عامل‌دار تعیین شد. مطابق شکل 5-a، استحکام خمشی برای نمونه شامل 0.4% وزنی گرافن بدون عامل 271 مگاپاسکال محاسبه شد که نسبت به نمونه‌های فاقد گرافن و نمونه شامل 0.4% گرافن عامل‌دار به ترتیب برابر با 26.2 و 61.1 درصد کاهش در استحکام ایجاد شد. این نتیجه به خوبی تاثیر عامل‌دار کردن بر توزیع مناسب نانوذره در زمینه و افزایش کارایی آن را نشان می‌دهد. با عامل‌دار کردن گرافن میزان تمایل زمینه به تشکیل پیوند با آن افزایش می‌یابد و از این رو می‌توان مقادیر بیشتری از گرافن را در زمینه استفاده نمود که در نتیجه درصد بهینه بالاتری خواهیم داشت و افزایش خواص به دلیل استفاده از گرافن بیشتر و القای بیشتر خواص گرافن به نانوکامپوزیت بیشتر حاصل می‌گردد. اما در صورت عامل‌دار نبودن گرافن، مقدار بهینه آن به دلیل عدم پراکندگی مناسب و تمایل کم زمینه برای تشکیل پیوند با آن کاهش می‌یابد و پس از عملیات التراسونیک، کلوخه‌های گرافن در درصدهای پایین‌تری به دلیل عدم تمایل ایجاد پیوند با زمینه تشکیل می‌شوند.

مطابق با شکل 5-b با بیشتر شدن درصد گرافن عامل‌دار در زمینه، مدول خمشی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار مدول در 0.3% وزنی از گرافن عامل‌دار حاصل می‌شود که برابر با 34.2 گیگاپاسکال می‌باشد و نسبت به نمونه فاقد گرافن با مدول 9.7 گیگاپاسکال، 252.6% بهبود نشان می‌دهد. با افزایش بیشتر گرافن عامل‌دار به 0.5% وزنی، مدول خمشی به 31.8 گیگاپاسکال می‌رسد که به مقدار 7% نسبت به نمونه حاوی 0.3% گرافن عامل‌دار کاهش پیدا کرده است. در این حالت نیز نمونه‌هایی با 0.4% وزنی گرافن بدون عامل، اثر عدم عامل‌دار کردن در کاهش تاثیر این نانوذره را مشخص می‌کنند. از این رو نمونه حاوی گرافن بدون عامل 3.1% افزایش در مدول را نسبت به نمونه فاقد گرافن نشان می‌دهد، اما نسبت به نمونه مشابه خود یعنی نمونه حاوی 0.4% وزنی گرافن عامل‌دار، مدول خمشی 68.7% افت می‌نماید.

مطابق با شکل 5-c تاثیر نانوذره در افزایش انرژی شکست نیز مثبت بوده و در نمونه‌های شامل 0.4% وزنی از گرافن عامل‌دار با افزایش انرژی شکست به 10.7 ژول بر میلی‌متر مکعب میزان 44.6% بهبود نسبت به نمونه فاقد



**Fig. 4** Image and chart from SEM investigation of functionalized graphene powder, a) MAP Analysis, b) MAP Analysis for Si, c) MAP Analysis for N, d) MAP Analysis for C and e) Energy Dispersive X ray Analysis

شکل 4 تصویر و نمودار حاصل از بررسی پودر گرافن عامل‌دار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، (a) آنالیز صفحه‌ای، (b) آنالیز صفحه‌ای عنصر سیلیسیم، (c) آنالیز صفحه‌ای عنصر نیتروژن، (d) آنالیز صفحه‌ای عنصر کربن (e) آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پروتو ایکس

شکل 5 نمودارهای استحکام خمشی، مدول خمشی و انرژی شکست کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت حاوی درصدهای متفاوت گرافن را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای هر یک از درصدها، 4 نمونه مشابه در آن درصد مورد آزمون قرار گرفتند، لذا نوار خطا در بالای هر ستون جهت نمایش پراکندگی داده‌ها درج شده است. مطابق با شکل 5-a، استحکام خمشی از 367 مگاپاسکال برای نمونه فاقد گرافن به طور پیوسته با افزایش درصد گرافن عامل‌دار زیاد شد و در 0.4% وزنی به 696 مگاپاسکال رسید که برابر با 89.6% بهبود در استحکام خمشی می‌باشد. با افزایش مقدار گرافن عامل‌دار به 0.5% وزنی، استحکام خمشی به 594 مگاپاسکال رسید که به میزان 14.6% نسبت به نمونه شامل 0.4% وزنی گرافن عامل‌دار کاهش یافت که دلیل آن می‌تواند کلوخه شدن صفحات گرافن در زمینه باشد.

با افزایش مقدار نانوذرات تا مقدار مشخصی، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت به دلیل تاثیر مثبت حداکثری نانوذرات که در توضیح تصاویر میکروسکوپی ذکر می‌شود، افزایش می‌یابد و از مقدار بهینه به بعد کاهش در

فاصله چندانی با آن‌ها ندارند که بیانگر چسبندگی بیشتر الیاف با زمینه است. افزودن گرافن عامل‌دار سبب ایجاد فصل‌مشترک قوی‌تر میان الیاف و زمینه شده و به این صورت انتقال بار از زمینه به الیاف بهتر صورت گرفته و خواص مکانیکی به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد.

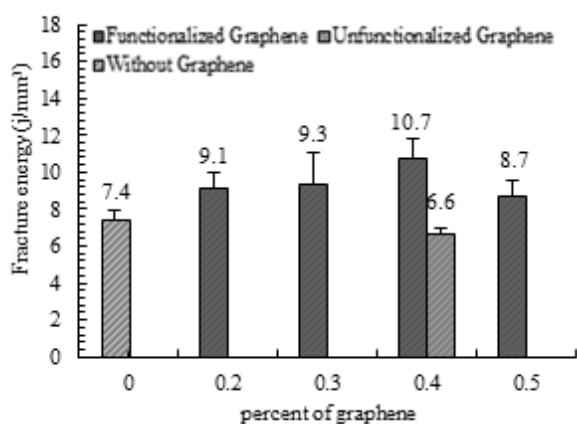
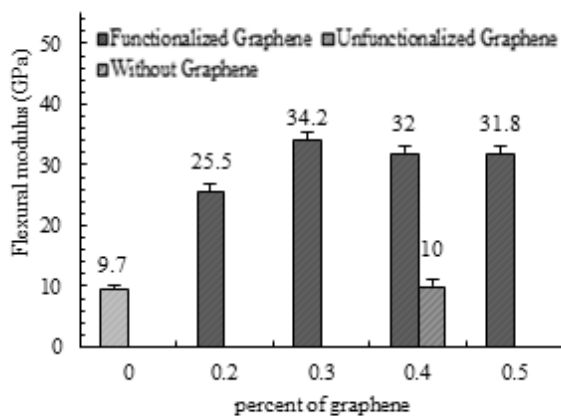
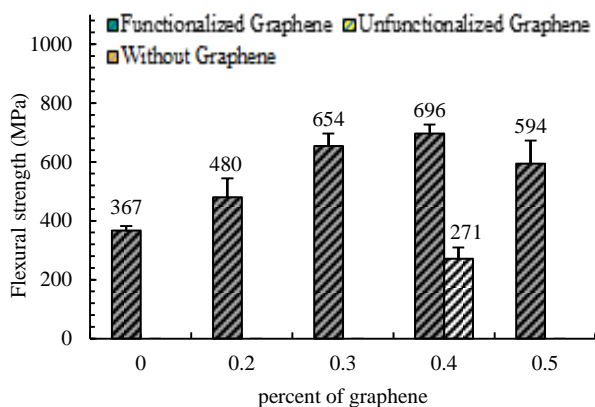


Fig. 5 The effect of graphene on the flexural properties of basalt fibers\ epoxy nanocomposites. a) Flexural strength, b) Flexural modulus and c) Fracture energy

شکل 5 تاثیر گرافن بر خواص خمشی نانوکامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت. (a) استحکام خمشی، (b) مدول خمشی و (c) انرژی شکست

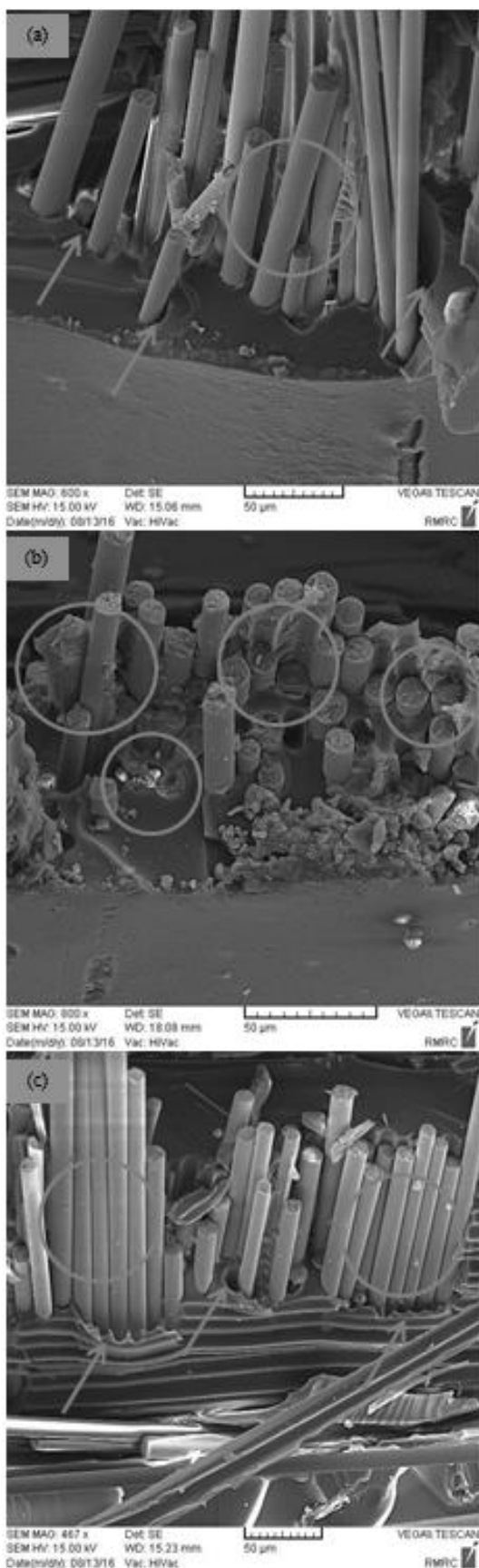
گرافن با انرژی شکست 7.4 ژول بر میلی‌متر مکعب ایجاد شد. همچنین نمونه شامل گرافن بدون عامل با انرژی شکست 6.6 ژول بر میلی‌متر مکعب نسبت به نمونه فاقد گرافن و نمونه بهینه (حاوی 0.4% وزنی گرافن عامل‌دار) به ترتیب 10.8 و 38.3 درصد کاهش در انرژی شکست را نشان داد.

به طور کلی مطابق با نتایج شکل 5 و مقایسه این نتایج با نتایج به دست آمده برای کامپوزیت‌های اپوکسی-الیافی حاوی گرافن در مقالات دیگر [22,21] مشخص است که میزان بهبود در خواص خمشی که در این پژوهش حاصل شد به میزان قابل توجهی بیشتر از دیگر پژوهش‌ها می‌باشد.

در پژوهشی، بولوت [22] به بررسی تاثیر افزودن گرافن بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف بازالت/اپوکسی پرداخته است. در تحقیق مذکور نانوصفحات گرافن بدون عامل در زمینه اپوکسی با استفاده از همزن مکانیکی پراکنده شدند و از عملیات التراسونیک نیز استفاده نشد اما زمان پخت نانوکامپوزیت‌ها در حد چند ساعت و بسیار کمتر از زمان پخت کامل نمونه‌های این پژوهش که به مدت 1 هفته می‌باشد، بوده است. لذا از طرفی به دلیل عدم استفاده از التراسونیک می‌توان گفت که شاید پراکندگی به دست آمده برای نانوکامپوزیت ساخته شده در تحقیق بولوت کمتر است اما به دلیل زمان کمتر پخت امکان به هم پیوستن صفحات گرافن نیز در نانوکامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد.

نتایج نشان داد که گرافن بیشترین اثر خود را در درصد وزنی 0.1 نشان داد که استحکام خمشی و مدول خمشی در این درصد، به ترتیب 30.2 و 67.9 درصد افزایش یافتند. با مقایسه نتایج نشان‌داده شده در شکل 5 و نتایج به دست آمده از تحقیق بولوت، مشخص است که میزان افزایش استحکام خمشی و مدول خمشی در پژوهش حاضر به ترتیب 89.6 و 252.6 درصد بوده و به مقادیر 39.4 و 184.7 درصد بیشتر از افزایش استحکام و مدول خمشی در تحقیق مذکور می‌باشد. همچنین بیشترین بهبود خواص خمشی در تحقیق بولوت در نانوکامپوزیت حاوی 0.1% گرافن حاصل شد، اما در تحقیق حاضر نانوکامپوزیت حاوی 0.4% گرافن عامل‌دار بهترین خواص خمشی را نشان داد. با توجه به این که بولوت از گرافن بدون عامل برای تقویت کامپوزیت خود استفاده کرد، می‌توان نتیجه گرفت که عامل‌دار نبودن گرافن و عدم استفاده از عملیات التراسونیک جهت افزایش پراکندگی گرافن سبب کاهش خواص مکانیکی در درصد‌های بالاتر از 0.1% وزنی شده است. همچنین افزایش خواص خمشی به دست آمده از افزودن گرافن بدون عامل در تحقیق بولوت به میزان افزایش خواص حاصل از افزودن گرافن عامل‌دار در تحقیق حاضر نمی‌باشد. لذا پژوهش بولوت تاییدکننده افت شدید خواص خمشی که با افزودن گرافن بدون عامل به میزان 0.4% وزنی در پژوهش حاضر به دست آمد، می‌باشد.

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های خمشی را نشان می‌دهد. شکل 6-a مربوط به نمونه بدون گرافن می‌باشد. مشاهده می‌شود که سطح الیاف بازالت در این تصویر عاری از پوشش رزین اپوکسی است. این مناطق با دوایر زرد نشان داده شدند. همچنین فلش‌های زرد جدایش میان زمینه و الیاف را نشان می‌دهند. به طور کلی این تصویر نسبت به شکل 6-b که مربوط به نمونه حاوی 0.4% وزنی گرافن عامل‌دار است، چسبندگی کمتری را به زمینه نشان می‌دهد. یکی دیگر از تفاوت‌های میان این دو تصویر در اندازه الیاف خارج شده از سطح می‌باشد، طول الیاف بیرون‌زده در شکل 6-a بیشتر از شکل 6-b است و این نشان می‌دهد که الیاف در شکل 6-a راحت‌تر از زمینه خارج شده‌اند. در شکل 6-b مناطق زیادی از چسبندگی مناسب وجود دارد و همچنین رزین موجود در پای الیاف



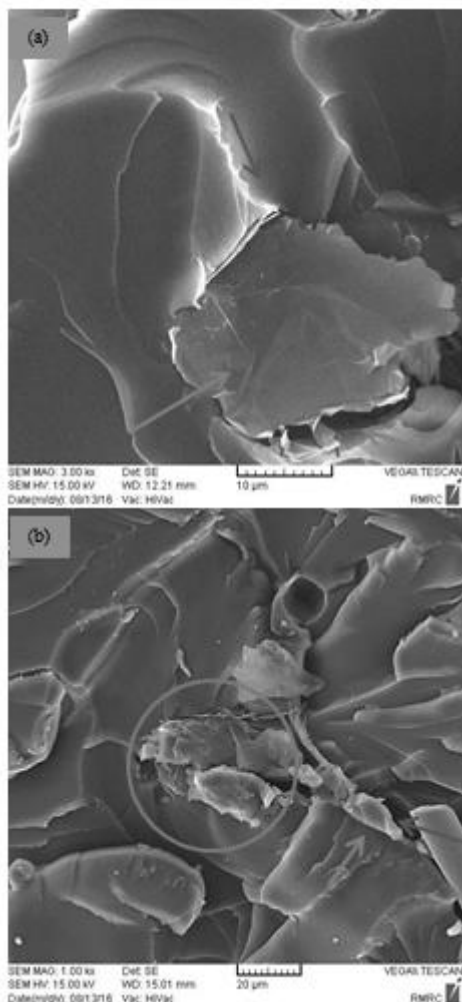
شکل 6-c که مربوط به نمونه حاوی گرافن بدون عامل است، حالتی مشابه با شکل 6-a را نمایان می‌کند، علی‌رغم آن گویی این تصویر شرایطی ضعیف‌تر از شکل 6-a را به نمایش می‌کشد. مطابق با نتایج شکل 5 این نمونه تقریباً در تمام خواص به دست آمده نشان داده است. این تصویر می‌تواند شاهد خوبی برای این نتایج باشد، چون مطابق با آن، چسبندگی میان الیاف و زمینه به خوبی صورت نگرفته است و فاصله میان الیاف و زمینه که با فلش‌های زرد نشان داده شده، بیش از حد بهینه است. همچنین طول الیاف بیرون‌زده از سطح شکست زیاد می‌باشد. از آنجایی که در این نمونه بر روی سطح گرافن گروه عاملی وجود نداشت، لذا چسبندگی خوبی با زمینه و الیاف ایجاد نشد و همچنین پراکندگی مناسبی به وجود نیامد.

مطابق با اطلاعات منتشر شده توسط شرکت تولیدکننده الیاف بازالت، بر روی سطح این الیاف عامل سیلانی وجود دارد و این سبب افزایش چسبندگی میان آن‌ها و زمینه و گرافن در صورت عامل‌دار بودن آن می‌گردد. از آنجایی که شکل 6-c مربوط به نمونه حاوی گرافن بدون عامل است، لذا گرافن آن چسبندگی مناسبی با زمینه و الیاف ندارد. در صورت عامل‌دار بودن گرافن مقدار بیشتری از آن می‌تواند در کامپوزیت استفاده شود و در درصد‌های بالاتری کلوخه تشکیل می‌گردد. در واقع میزان پراکندگی گرافن در زمینه را مقدار تمایل اجزای دیگر مانند زمینه و الیاف تعیین می‌نمایند. برای گرافن عامل‌دار این تمایل بیشتر است، زیرا سازگاری بیشتری با زمینه و الیاف دارد و این اجزا مقدار بیشتری از این فاز را می‌طلبند. اما برای گرافن بدون عامل قضیه برعکس می‌باشد، از این رو است که در درصد‌های پایین‌تر کلوخه تشکیل می‌شود. وجود بیشتر گرافن در زمینه در صورت عامل‌دار بودن سبب عملکرد بیشتر مکانیزم‌های افزایش چقرمگی و استحکام می‌گردد.

شکل 6-d نمونه حاوی 0.5% وزنی گرافن عامل‌دار را نشان می‌دهد. مطابق نمودارهای شکل 5 در این درصد تمام خواص کاهش می‌یابند. علت اصلی این نتایج، کلوخه شدن صفحات گرافن می‌باشد. صفحات گرافن تمایل دارند تا از طریق پیوند واندوالس با یکدیگر اتصال برقرار کرده و کلوخه‌ها را به وجود آورند. این حالت در تمام درصد‌های گرافن وجود دارد، اما با افزایش مقدار آن کلوخه‌ها درشت‌تر شده و از مقداری به بعد محلی برای تمرکز تنش و رشد ترک می‌شوند. همچنین احتمال شکست و ورقه‌ورقه شدن این کلوخه‌ها افزایش می‌یابد. مقدار بیشتر از این کلوخه‌ها در اطراف الیاف قرار می‌گیرد و سبب ضعیف شدن فصل مشترک می‌شوند. همان‌طور که واضح است، در شکل 6-d دایره سبز محل کلوخه‌های گرافن را نشان می‌دهند. با توجه به فلش‌های زرد می‌توان گفت که از چسبندگی میان الیاف و زمینه هم کاسته شده است. با افزایش درصد گرافن هم فصل مشترک و هم زمینه ضعیف‌تر می‌شوند و به این صورت خواص کاهش می‌یابند.

پاتاک و همکارانش [25] خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن حاوی اکسید گرافن را مورد بررسی قرار دادند. اکسید گرافن به دلیل داشتن گروه‌های عاملی بر روی سطحش، پراکندگی مناسب‌تری در زمینه و برهمکنش بیشتری با الیاف کربن ایجاد می‌کند. در این پژوهش الیاف کربن نیز دارای عامل بر روی سطح خود بودند، به همین جهت چسبندگی اکسید گرافن، هم به زمینه و هم به الیاف به خوبی صورت گرفت و بهبود خواص به مقدار چشم‌گیری حاصل شد. تصاویری مانند چسبندگی بهتر رزین به الیاف در درصد بهینه اکسید گرافن و الیاف بیرون‌زده از سطح با طول کمتر در این تحقیق نیز مشاهده شد که در راستای نتایج تحقیق حاضر و تصاویر شکل 5-a و شکل 5-b است. بهترین درصد وزنی اکسید گرافن 0.3 گزارش شد که در آن به ترتیب استحکام و مدول خمشی، 66 و 70 درصد بهبود یافتند.

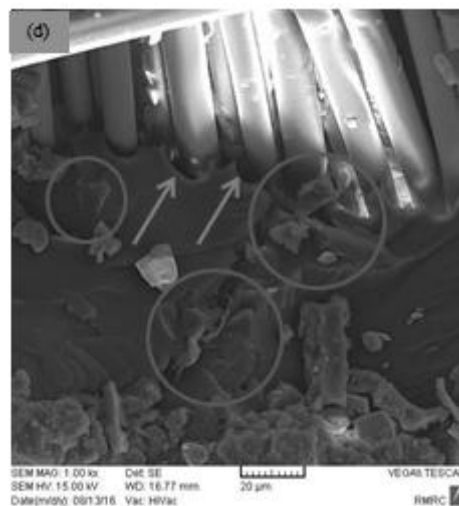
برخورد کرده و پس از متوقف شدن با اعمال نیروی بیشتر با تغییر مسیر در جهت موازی با لایه گرافنی رشد نموده است. به طور کلی تقویت زمینه توسط نانوصفحات گرافن که به طور مناسب در همه جا پراکنده شده‌اند، سبب ایجاد تعداد بسیاری از پدیده‌هایی همچون قفل شدن ترک و یا انحراف آن می‌گردد که به طور کلی استحکام و چقرمگی نانوکامپوزیت را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد.



**Fig. 7** SEM images from the fracture surface of basalt fibers\ epoxy composite reinforced with 0.4 wt.% functionalized graphene include a) crack deflection and b) crack pinning mechanisms

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت حاوی 0.4% گرافن عامل‌دار شامل مکانیزم‌های (a) انحراف ترک و (b) قفل شدن ترک

غالباً خواص در جهت خارج از صفحه مانند استحکام خمشی بیشتر توسط زمینه تعیین می‌شوند و خواص در راستای صفحه کامپوزیت را الیاف تقویت‌کننده مورد استفاده در زمینه مشخص می‌نمایند [26-27]. بنابراین از آنجایی که افزودن گرافن عامل‌دار سبب افزایش خواص زمینه می‌شود، بهبود خواص خمشی به مقدار قابل توجه (که در این پژوهش رخ داده است)، امری منطقی و قابل توجیه می‌باشد. به علاوه از آنجایی که گرافن عامل‌دار چسبندگی الیاف با زمینه را بیشتر می‌کند، لذا نقش الیاف در افزایش خواص خمشی بیشتر می‌شود. در این حالت رفتار خمشی نه تنها به دلیل افزایش



**Fig. 6** SEM images from the fracture surface of graphene\ basalt fibers\ epoxy nanocomposites. a) Sample without graphene, b) Sample reinforced with 0.4 wt.% functionalized graphene, c) Sample reinforced with 0.4 wt.% unfunctionalized graphene and d) Sample reinforced with 0.5 wt.% functionalized graphene.

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نانوکامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت/گرافن. (a) نمونه بدون گرافن، (b) نمونه شامل 0.4% وزنی گرافن عامل‌دار، (c) نمونه شامل 0.3% گرافن بدون عامل و (d) نمونه حاوی 0.5% وزنی گرافن عامل‌دار

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکست نمونه حاوی 0.4% وزنی گرافن عامل‌دار را نشان می‌دهد. در شکل 7-a، فلش‌های سبز جهت اشاعه ترک را نشان می‌دهند. مسیر ترک با رسیدن آن به ورق گرافنی تغییر کرده است. البته این‌طور به نظر می‌رسد که ترک یا از میان ورق گرافنی که از چندین تک‌لایه تشکیل شده است، عبور کرده و آن را متورق کرده است و یا این که از فصل مشترک گرافن و زمینه گذشته است. در این تصویر سطح لایه گرافنی به خوبی مشخص است. این تصویر نشان‌دهنده منحرف شدن ترک توسط گرافن می‌باشد. انحراف ترک انرژی لازم برای پیشروی آن را بیشتر می‌نماید و از این رو با افزایش انرژی جذب شده توسط نمونه، چقرمگی آن افزایش می‌یابد. از آنجایی که نیروی میان لایه‌های گرافنی از نوع پیوند واندروالسی و ضعیف بوده و پیوند میان کربن‌ها در هر لایه گرافن از نوع کووالانسی و بسیار قوی می‌باشد، ترک از حالت عمود بر لایه گرافن به حالت موازی با آن تغییر مسیر داده تا بتواند با عبور از میان لایه‌های گرافن راحت‌تر آن را پشت سر بگذارد. فلش‌های زرد، سطوح جدا شده گرافن از زمینه را نشان می‌دهند که سبب صرف انرژی می‌شوند.

شکل 7-b پدیده دیگری که سبب افزایش چقرمگی و استحکام نانوکامپوزیت شده است را نشان می‌دهد. فلش سبز، جهت اشاعه ترک را مشخص می‌کند. واضح است که با نزدیک شدن ترک به منطقه نشان داده شده با دایره آبی، عرض آن کاهش می‌یابد و در مرکز دایره نوک ترک کاملاً کور می‌شود. در این منطقه رزین اپوکسی به خوبی با گرافن عامل‌دار، تقویت شده و مانع از عبور ترک و اشاعه آن شده است، لذا به نیرو و انرژی بیشتری برای عبور از این منطقه لازم است. تصویر مذکور نمایش خوبی از قفل شدن ترک در مقیاس میکرومتری را در کامپوزیت حاوی نانوصفحات گرافن نشان می‌دهد. همچنین فلش زرد یک دیواره گرافنی که با رزین پوشیده شده را نشان می‌دهد که سبب تغییر مسیر ترک در جهت عمودی شده است. گویا مشابه با شکل 7-a در این مکان نیز ترک به طور عمودی به لایه گرافنی



- خواص زمینه بهبود پیدا کرده، بلکه به دلیل چسبندگی بیشتر الیاف و زمینه نیز افزایش چشمگیری را نشان داده است. کوارزیمین و همکارانش [28] در یک مقاله مروری به بررسی مکانیزم‌های افزایش چقرمگی در نانوکامپوزیت‌ها پرداختند. مطابق با این تحقیق برای گرافن، انحراف ترک تنها مکانیزم موجود در افزایش چقرمگی نمی‌باشد. علی‌رغم انحراف ترک، سطح شکست نمونه‌ها دارای سطوح و رخ‌های شکست کوچکی می‌باشد که به دلیل رشد و اشاعه ترک در سطوحی با ارتفاع متفاوت ایجاد می‌شوند. به طور کلی ترک می‌تواند منحرف شود، یا این که شاخه‌ای گردد، همچنین سبب از هم جدا شدن لایه‌های گرافن شود (مانند شکل 6-a) و یا این که از فصل مشترک میان گرافن و زمینه عبور نماید و یا قفل شود.
- 4- نتیجه‌گیری**
- در این پژوهش اثر گرافن عامل‌دار (اصلاح سطحی شده با عامل سیلانی تری‌آمینوپروپیل‌تری‌متوکسی‌سیلان) بر خواص خمشی نانوکامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نهایی حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:
- افزودن گرافن عامل‌دار به کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت سبب بهبود خواص خمشی می‌شود. نانوکامپوزیت تقویت‌شده با 0.4% وزنی گرافن عامل‌دار (نمونه بهینه)، به ترتیب 89.6، 252.6 و 44.6 درصد افزایش در استحکام خمشی، مدول خمشی و انرژی شکست را در مقایسه با نمونه فاقد گرافن از خود نشان داد. مقادیر بهبود به دست آمده در این پژوهش به طور قابل توجه‌ای بیش از دیگر مقالاتی می‌باشد که در آن‌ها از گرافن یا گرافن عامل‌دار برای تقویت کامپوزیت‌های اپوکسی-الیافی استفاده شده است.
  - افزودن گرافن بدون عامل به مقدار 0.4% (برابر با درصد بهینه به دست آمده برای گرافن عامل‌دار) سبب کاهش استحکام خمشی و انرژی شکست و افزایش ناچیزی در مدول خمشی شد.
  - با عامل‌دار کردن گرافن پراکندگی آن در زمینه و چسبندگی آن با زمینه و الیاف بیشتر شده و لذا عامل‌دار کردن گرافن سبب افزایش کارایی آن در بهبود خواص می‌شود. همچنین دلیل کاهش خواص در اثر افزودن گرافن بدون عامل به عدم توزیع مناسب آن در زمینه باز می‌گردد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که گرافن در حالت بدون عامل باید در مقادیر کمتری از گرافن عامل‌دار به کامپوزیت افزوده شود.
  - افزایش چسبندگی میان الیاف بازالت و اپوکسی، بهبود خواص زمینه، انحراف ترک و قفل شدن آن توسط نانوصفحات گرافن از دلایل افزایش خواص خمشی نانوکامپوزیت می‌باشند.
  - مطابق تصاویر میکروسکوپی، میزان چسبندگی الیاف به زمینه و همچنین میزان بیرون کشیده شدن الیاف برای نمونه بهینه (حاوی 0.4% گرافن عامل‌دار) نسبت به نمونه فاقد گرافن و نمونه حاوی گرافن بدون عامل کاملاً تغییر یافته است. در این پژوهش هیچ تغییری بر روی الیاف برای ساخت نمونه‌هایی با گرافن عامل‌دار، بدون عامل و نمونه فاقد گرافن صورت نگرفته، بنابراین افزایش چسبندگی و کاهش طول الیاف بیرون کشیده شده در نمونه بهینه، ناشی از عامل‌دار بودن گرافن می‌باشد که سبب ایجاد فصل مشترک قوی‌تر میان الیاف و اپوکسی شده است.
- 5- مراجع**
- [1] Lee, C. Wei, X. Kysar, J. W. and Hone, J., "Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene" science, Vol. 321, No. 5887, pp. 385-388, 2008.
- [2] Paul, D. and Robeson, L. M., "Polymer Nanotechnology: Nanocomposites" Polymer, Vol. 49, No. 15, pp. 3187-3204, 2008.
- [3] Gottler, L., Lee, K. and Thakkar, H., "Polym Rev 2007, 47, 291" CrossRef CAS Web of Science Times Cited, Vol. 13.
- [4] Gao, L. Zhou, X. and Ding, Y., "Effective Thermal and Electrical Conductivity of Carbon Nanotube Composites" Chemical Physics Letters, Vol. 434, No. 4, pp. 297-300, 2007.
- [5] Liu, W. Hoa, S. V. and Pugh, M., "Fracture Toughness and Water Uptake of High-Performance Epoxy/Nanoclay Nanocomposites" Composites Science and Technology, Vol. 65, No. 15, pp. 2364-2373, 2005.
- [6] Boo, W. Sun, L. Liu, J. Clearfield, A. Sue, H. J. Mullins, M. and Pham, H., "Morphology and Mechanical Behavior of Exfoliated Epoxy/A-Zirconium Phosphate Nanocomposites" Composites science and technology, Vol. 67, No. 2, pp. 262-269, 2007.
- [7] Ma, P. C. Siddiqui, N. A. Marom, G. and Kim, J. K., "Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-Based Nanocomposites: A Review" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 41, No. 10, pp. 1345-1367, 2010.
- [8] Wang, Z. Colorad, H. A. Guo, Z. H. Kim, H. Park, C. L. Hahn, H. T. Lee, S. G. Lee, K. H. and Shang, Y. Q., "Effective Functionalization of Carbon Nanotubes for Bisphenol F Epoxy Matrix Composites" Materials Research, Vol. 15, No. 4, pp. 510-516, 2012.
- [9] Cui, L. J. Wang, Y. B. Xiu, W. J. Wang, W. Y. Xu, L. H. Xu, X. B. Meng, Y. Li, L. Y. Gao, J. and Chen, L.-T., "Effect of Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotube on the Curing Behavior and Mechanical Property of Multi-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Composites" Materials & Design, Vol. 49, pp. 279-284, 2013.
- [10] Yasmin, A. and Daniel, I. M., "Mechanical and Thermal Properties of Graphite Platelet/Epoxy Composites" Polymer, Vol. 45, No. 24, pp. 8211-8219, 2004.
- [11] Madhukar, M. S. and Drzal, L. T., "Fiber-Matrix Adhesion and Its Effect on Composite Mechanical Properties: I. Inplane and Interlaminar Shear Behavior of Graphite/Epoxy Composites" Journal of Composite Materials, Vol. 25, No. 8, pp. 932-957, 1991.
- [12] Rafiee, M. A. Rafiee, J. Wang, Z. Song, H. Yu, Z. Z. and Koratkar, N., "Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content" ACS nano, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.
- [13] Miller, S. G. Bauer, J. L. Maryanski, M. J. Heimann, P. J. Barlow, J. P. Gosau, J. M. and Allred, R. E., "Characterization of Epoxy Functionalized Graphite Nanoparticles and the Physical Properties of Epoxy Matrix Nanocomposites" Composites Science and Technology, Vol. 70, No. 7, pp. 1120-1125, 2010.
- [14] Chiang, C. L. and Hsu, S. W., "Synthesis, Characterization and Thermal Properties of Novel Epoxy/Expandable Graphite Composites" Polymer International, Vol. 59, No. 1, pp. 119-126, 2010.
- [15] Rafiee, M. A. Rafiee, J. Srivastava, I. Wang, Z. Song, H. Yu, Z. Z. and Koratkar, N., "Fracture and Fatigue in Graphene Nanocomposites" small, Vol. 6, No. 2, pp. 179-183, 2010.
- [16] Ahmadi-Moghadam, B. Sharafimasoooleh, M. Shadlou, S. and Taheri, F., "Effect of Functionalization of Graphene Nanoplatelets on the Mechanical Response of Graphene/Epoxy Composites" Materials & Design, Vol. 66, pp. 142-149, 2015.
- [17] Dhand, V. Mittal, G. Rhee, K. Y. Park, S. J. and Hui, D., "A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 73, pp. 166-180, 2015.
- [18] Eslami-Farsani, R. Reza Khalili, S. M. and Najafi, M., "Effect of Thermal Cycling on Hardness and Impact Properties of Polymer Composites Reinforced by Basalt and Carbon Fibers" Journal of Thermal Stresses, Vol. 36, No. 7, pp. 684-698, 2013.
- [19] Daghig, V. Khalili, S. and Farsani, R. E., "Creep Behavior of Basalt Fiber-Metal Laminate Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 91, pp. 275-282, 2016.
- [20] Lopresto, V. Leone, C. and De Iorio, I., "Mechanical Characterisation of Basalt Fibre Reinforced Plastic" Composites Part B: Engineering, Vol. 42, No. 4, pp. 717-723, 2011.
- [21] Kamar, N. T. Hossain, M. M. Khomenko, A. Haq, M. Drzal, L. T. Loos, A., "Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites with graphene nanoplatelets, Composites Part A" Applied Science and Manufacturing, Vol. 70, pp. 82-92, 2015.

- [22] Bulut, M., "Mechanical Characterization of Basalt/Epoxy Composite Laminates Containing Graphene Nanopellets" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 122, pp. 71-78, 2017.
- [23] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016. (In Persian)
- [24] Coates, J., "Interpretation of Infrared Spectra, a Practical Approach" *Encyclopedia of analytical chemistry*, 2000.
- [25] Pathak, A. K., Borah, M., Gupta, A., Yokozeki, T. and Dhakate, S. R., "Improved Mechanical Properties of Carbon Fiber/Graphene Oxide-Epoxy Hybrid Composites" *Composites Science and Technology*, Vol. 135, pp. 28-38, 2016.
- [26] Davim, J. P. and Reis, P., "Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (Cfrp) Using Design Experiments" *Composite structures*, Vol. 59, No. 4, pp. 481-487, 2003.
- [27] Choi, N., Kinloch, A. and Williams, J., "Delamination Fracture of Multidirectional Carbon-Fiber/Epoxy Composites under Mode I, Mode II and Mixed-Mode I/II Loading" *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 1, pp. 73-100, 1999.
- [28] Quaresimin, M., Schulte, K., Zappalorto, M. and Chandrasekaran, S., "Toughening Mechanisms in Polymer Nanocomposites: From Experiments to Modelling" *Composites Science and Technology*, Vol. 123, pp. 187-204, 2016.



## بررسی ریزساختار نانو الیاف نانوکامپوزیت پلی وینیل الکل - نانورس

مژگان الهامی<sup>1</sup>، سیما حبیبی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی نساجی/علوم الیاف، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، گروه نساجی، تهران

2- استادیار، مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، گروه نساجی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 3319118651، sima.habibi@gmail.com

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/8/29

پذیرش: 96/11/7

### کلیدواژگان:

نانو الیاف

الکتروپسپین

پلی وینیل الکل

نانورس

نانوکامپوزیت

### چکیده

باتوجه به جایگاه فناوری نانو به ویژه محصولات همچون نانوالیاف و نانوکامپوزیتها و با در نظر گرفتن کاربردهای گسترده پلیمر پلی وینیل الکل و نانوذره نانورس، نانو الیاف نانوکامپوزیتی با درصدهای وزنی مختلف از نانو رس اصلاح شده در شرایط یکسان الکتروپسپین شد. رسیدن به نانوالیافی با ساختاری بدون بید و توزیع قطر تقریباً یکنواخت، می تواند کارایی بسیاری برای نانوالیاف تولیدی به همراه داشته باشد که هدف اصلی این تحقیق محسوب می گردید. به منظور مشاهده ریز ساختار نانوالیاف پلی وینیل الکل/ نانو رس و هم چنین به منظور بررسی امتزاج پذیری و تغییرات حاصله در پلیمر اولیه از دستگاه میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) و طیف سنجی اشعه مادون قرمز (FTIR/ATR) استفاده شده است. همچنین دستگاه آنالیز توزین حرارتی (TGA) برای مطالعه نحوه رفتار نانوالیاف در مقابل حرارت به کار گرفته شد. همچنین مورفولوژی و نحوه پراکندگی نانو ذرات نانورس در بستر پلیمری پلی وینیل الکل با استفاده از آزمون طیف سنجی پرتوی اشعه ایکس (XRD) بررسی شده است. نتایج حاکی از شکل گیری نانوالیاف نانوکامپوزیتی با متوسط قطر حدود 300 نانومتر است که صفحات رس به صورت کامل در بستر پلی وینیل الکل باز شده اند.

## A Study on morphology of poly (vinyl alcohol)-organoclay nanocomposite nanofibers

Mozhgan Elhami, Sima Habibi\*

Azad Islamic University Yadegar-e-Imam Khomeini (Rah) shahr-e-Rey branch, Textile department, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 3319118651 Tehran, Iran, sima.habibi@gmail.com

### Keywords

Nano fiber  
Electrospinning  
Polyvinyl alcohol  
Organo- Clay  
Nanocomposite

### Abstract

Considering the importance of nanotechnology, especially nanofibers and nanocomposites ; as its most eligible products and the vast applications of polyvinyl alcohol (PVA) and nanoclay ( modified organo-clay), the main objective of this work was study on effect of polymer blends (PVA as matrix) and nano-filler ( organo-clay as disperse phase) concentrations and electrospinning parameters , on morphology of resulted nanocomposite nanofibers. It is noteworthy that bead less nanofibers with even diameter distributions can make the final products application more valuable. In order to investigate the microstructure and morphology and the miscibility and chemical bonding of polyvinyl alcohol / organo-clay nanocomposite nanofibers, the scanning electron microscope (SEM), and the Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) were used, respectively. Also, the thermal gravimetric analysis (TGA) was employed to investigate thermal behavior of nanocomposite nanofiber samples. The X-Ray Diffraction (XRD) data demonstrated the exfoliation of organo-clay layers in poly vinylalcohol matrix and nanofibers nanocomposite were electrospun with diameter about 300 nm.

### 1-مقدمه

[1-2] نانوالیاف تولید شده به روش الکتروپسپین به موجب برخورداری از ویژگی‌های منحصر به فردی همچون نسبت سطح به حجم بالا، تخلخل زیاد و منافذ بسیار ریز شدیداً مورد توجه هستند. از میان روشهای تولید نانوالیاف، الکتروپسپین روشی ساده و ارزان برای تولید نانوالیاف از محلول پلیمری است. در این روش نانوالیاف با نیروی محرکه الکتروستاتیکی تولید می شوند. ابعاد و ریزساختار الیاف تولید شده در الکتروپسپین با متغیرهای مختلفی کنترل شدنی است. از جمله این متغیرها، گرانیروی محلول، ولتاژ، سرعت تغذیه و رسانایی محلول هستند. روش الکتروپسپین بسیار تطبیق پذیر بوده و بسیاری از مواد پلیمری با محدوده گسترده ای از قطر الیاف، با این روش تولید می شوند [3].

طی فرآیند الکتروپسپین، ولتاژ بالایی در محدوده کیلوولت به یک سیال پلیمری اعمال شده و بارهای الکتریکی، درون سیال القا می‌شوند. هنگامی که

فناوری نانو در عصر حاضر به عنوان رویکردی نوین در تمامی رشته های علمی، منشا دستیابی به پیشرفت و تحولات شگرفی شده است. این فناوری در عرصه تولید الیاف نیز همانند بسیاری از صنایع دیگر نمود یافته و امروزه شاهد تولید ساختارهای جدید تحت عنوان «ساختارهای نانولیفی» و «الیاف نانوکامپوزیتی» می باشیم. با توجه به ویژگی های بی همتای مواد و پلیمرها در سطح نانو، نانو الیاف و نانو مواد در زمینه های مختلفی از جمله: پزشکی، آرایشی، صنایع غذایی، صنایع بسته بندی، پوشاک، خودروسازی و .. گستره کاربردی وسیعی یافته اند. نسبت سطح به حجم بسیار زیاد، قابلیت عامل دار کردن سطوح و خواص مکانیکی عالی از قبیل استحکام کششی و خواص محافظتی از خواص مورد توجه نانوالیاف در مقایسه با الیاف معمولی است.

### Please cite this article using:

Elhami, M. and Habibi, S., "A Study on morphology of Poly (vinyl alcohol)-organoclay nanocomposite nanofibers", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 325-330, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

رس به صورت ذاتی سرعت سوختن را کاهش داده و به واسطه تشکیل ذغال در حین سوختن، اشتعال پذیری این دسته از الیاف را نیز کاهش می دهد [4-9]. با در نظر گرفتن موارد اشاره شده، هدف از این تحقیق الکتروریسی نانوالیاف نانوکامپوزیت پلی وینیل الکل به همراه نانورس اصلاح شده و بررسی مورفولوژی نانوالیاف حاصله می باشد. بدین منظور پلی وینیل الکل با درصدهای مختلف نانورس الکتروریسی شد و مورفولوژی نانوالیاف حاصله با استفاده از آزمونهای XRD، SEM و FTIR و خواص حرارتی آن با استفاده از TGA بررسی شد. شکل 1 نحوه توزیع و پراکندگی صفحات رس در فرایند اختلاط را نشان می دهد.

## 2-تجربی

### 1-1-مواد مصرفی

پلی وینیل الکل (PVA) با وزن مولکولی 85000-124000 گرم بر مول و درجه هیدرولیز 87-89 درصد از شرکت MSDS (آلمان) خریداری شده و مورد استفاده قرار گرفت. رس اصلاح شده با DK2 (مونت موریلونیت) خریداری شده از آمریکا شرکت Nanolin تهیه گردیده شد.

### 2-2-دستگاهها

برای تهیه نانوالیاف از دستگاه الکتروریسی ساخت شرکت ژاپنی KATO TECH LTD استفاده گردید. به منظور بررسی سطح و قطر نانو الیاف و بررسی درجه توزیع الیاف از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مدل AIS 2100 ساخت شرکت Seron Technology استفاده شده است. به منظور شناسایی ساختمان و گروه های عاملی مواد و الیاف از دستگاه اسپکتروسکوپی اشعه مادون قرمز FTIR/ATR مدل Spectrum ساخت شرکت Perkin Elmer استفاده شد. همچنین برای شناسایی ریز ساختارهای نانو رس ها از آزمون پراش اشع ایکس (XRD) استفاده شد. نمونه ها در زاویه  $2\theta=10-20$  درجه مورد آزمایش قرار گرفت و جنس آند دستگاه مس  $\lambda=1.54$  آنگسترم بوده است. دستگاه مورد استفاده ساخت شرکت Philips مدل PW1800 استفاده شد.

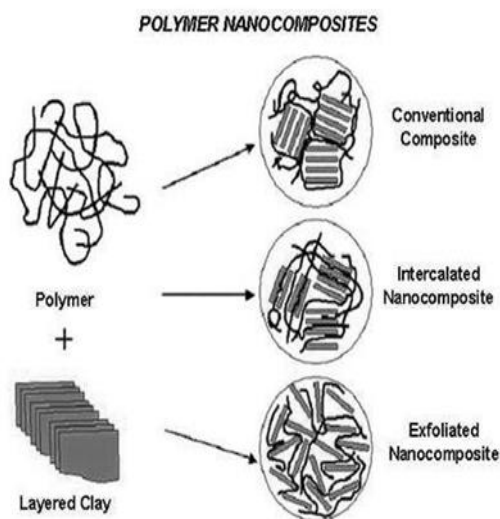


Fig.1 Schematic image of the distribution and distribution of clay in the mixing process[10]

شکل 1 تصویر شماتیک نحوه توزیع و پراکندگی رس در فرآیند اختلاط [10]

میزان بارهای الکتریکی درون سیال به یک حد بحرانی برسد، جتی از سیال به شکل مخروط تیلور از قطره کوچکی که در نوک سوزن قرار گرفته، خارج می شود. جت مذکور به سمت ناحیه دارای پتانسیل الکتریکی کمتر (جمع کننده ثابت یا دوار متصل به زمین) حرکت خواهد کرد. ریزساختار الیاف الکتروریسی شده تحت تاثیر پارامترهای متعددی قرار دارد، چنان که توسط این فرآیند امکان تولید طیف گسترده ای از الیاف (از الیاف دارای ساختار مهره ای گرفته تا الیاف دارای سطح متخلخل) وجود دارد. به طور کلی اجزای سیستم الکتروریسی عبارتند از یک لوله موئین یا سرنگ جهت نگه داشتن ماده پلیمری، دو الکترود و یک منبع جریان مستقیم که ولتاژی در محدوده کیلوولت را فراهم می کند. پارامترهای متعددی بر خواص پلیمر و محلول آن از جمله وزن مولکولی، ویسکوزیته، هدایت الکتریکی، کشش سطحی و همچنین شرایط الکتروریسی مانند ولتاژ الکتریکی اعمال شده، فاصله نوک سوزن تا جمع کننده، نرخ تغذیه و غیره تاثیرگذار هستند [4-5].

در چند دهه ای اخیر کامپوزیت های پایه پلیمری به دلیل داشتن خواص فوق العاده از محبوبیت فراوانی برخوردار بوده اند. نانوالیاف نانوکامپوزیتی، گونه جدیدی از مواد نانوکامپوزیتی پلیمری است که در آن شاهد پراکندگی نانوذرات در یک بستر پلیمری هستیم. از یک سو مکانیزم بهبود خواص در کامپوزیت های متداول از قوانین اختلاط پیروی می کند و از سوی دیگر بهبود خواص در نانوکامپوزیت ها، مرهون هم افزایی خواص بهینه نانو ذره و بستر پلیمری است. با کاهش اندازه فیلر، میزان تاثیر و برهم کنش میان فیلر و بستر پلیمری به طرز شگفت انگیزی افزایش می یابد و بر همین اساس، خواص نانوکامپوزیت ها به مراتب بهتر از کامپوزیت های رایج خواهد بود [4-6]. پلی وینیل الکل را می توان یک کوپلیمر که از منومرهای وینیل استات و وینیل الکل تشکیل شده است، در نظر گرفت. گونه های پلی وینیل الکل بستگی به درجه پلیمریزاسیون و درصد هیدرولیز آنها دارد. برخی خواص پلی وینیل الکل نظیر مقاومت در برابر آب، مقاومت در برابر پارگی و در برابر حلال با افزایش درجه هیدرولیز افزایش می یابد، اما انعطاف پذیری، خواص چسبندگی و توانایی تفرق کاهش می یابد. بالا رفتن وزن مولکولی (یا درجه پلیمریزاسیون) منجر به افزایش ویسکوزیته محلول، قدرت کشش، توانایی تفرق، انعطاف پذیری و مقاومت در برابر پارگی می شود. درصد هیدرولیز به راحتی می تواند در حلال واکنش هیدرولیز کنترل شود. درجه پلیمریزاسیون پلی وینیل الکل به میزان زیادی به شرایط پلیمریزاسیون پلی وینیل استات بستگی دارد [7]. پلی وینیل الکل فقط در حلال های بسیار قطبی مانند آب، دی متیل سولفوکساید، استامید، گلیکول و دی متیل فرمامید حل می شود [8].

سیلیکات های لایه ای دیسپرس شده یا همان «نانورس» که غالباً برپایه مونت موریلونیت هستند، به عنوان یک فاز تقویت کننده در ماتریس پلیمری، یکی از مهم ترین اشکال «نانوکامپوزیت های هیبرید آلی-غیر آلی» است. شکل 1 نحوه توزیع ذرات رس اصلاح شده در بستر پلیمری را نشان می دهد. حضور رس اصلاح شده در ماتریس پلیمری، سبب بهبود کارایی پلیمر در نقش لیف جهت کاربردهای مختلف نساجی می شود. رس دارای نقش موثری در بهبود خواص فیزیکی همچون مدول و استحکام، کاهش جمع شدگی حرارتی و رفتار الکترواستاتیک کنترل شده است. علاوه بر این، حضور رس آبدوست باعث بهبود قابلیت جذب رطوبت، رنگ پذیری، زیست تخریب پذیری و مقاومت شیمیایی می شود. الیاف نانو کامپوزیتی بر پایه رس در شرایط جوی، از مقاومت خوبی در برابر فرسایش برخوردار هستند که این امر ناشی از حضور صفحات رس به عنوان سدی در برابر تابش فرابنفش است.

جدول 1 مشخصات محلول و شرایط الکتروسی

Table 1 Solution specification and electrospinning parameters

شماره	نسبت مواد	نرخ تغذیه Mm/min	فاصله cm	ولتاژ KV	زمان min
S1	PVA8%	0/06	10	30	40
S2	PVA8%+Clay1%	0/06	10	30	40
S3	PVA8%+Clay3%	0/06	10	30	40
S4	PVA8%+Clay5%	0/06	10	30	40

## 3- نتایج و بحث

## 3-1- بررسی مورفولوژی نانو الیاف با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

شکل 3 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های نانوالیاف الکتروسی شده را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود متوسط قطر نانوالیاف در نمونه PVA خالص  $280 \pm 18.93 \text{ nm}$  و ساختار الیاف بدون بید و هموار می باشد. شکل 4 نمودار توزیع متوسط قطر نانوالیاف را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود، با افزایش میزان نانورس از 1٪ به 5٪ متوسط قطر الیاف افزایش می یابد. چنانچه قطر از نمونه به ترتیب برای نمونه های 1، 3 و 5٪ به ترتیب  $283 \pm 45.09 \text{ nm}$  و  $290 \pm 85.24 \text{ nm}$  و  $300 \pm 68.4 \text{ nm}$  می باشد. با اینگونه به نظر می رسد که ذرات رس با افزایش قطبیت محلول امکان کاهش قطر نانوالیاف را به همراه داشته باشند اما تشکیل شبکه ای در داخل نانوالیاف، همچون سدی ممانعتی، مانع خروج آب به عنوان حلال از ساختار نانوالیاف گشته و جت الیاف در فاصله میان نوک سوزن و صفحه جمع کننده زمان کافی جهت از دست دادن کامل حلال آب را نداشته، در نتیجه برخورد نانوالیاف به صورت خیس به صفحه جمع کننده، قطر الیاف افزایش یافته است حضور نانو رس باعث ایجاد شبکه در داخل پلیمر PVA می شود.

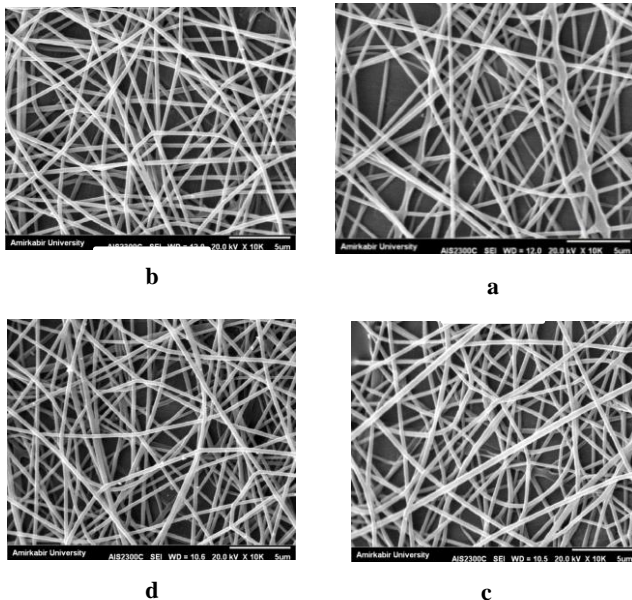


Fig.3 SEM image of Poly (vinyl alcohol)-nanoclay nanofibers composite (A) PVA 8% (B) PVA 8%/ Nano Clay 1% (C) PVA 8%/ Nano Clay 3% (D) PVA 8%/ Nano clay 5%

شکل 3 تصاویر SEM نانو الیاف نانو کامپوزیت پلی وینیل الکل - نانورس (a) پلی وینیل الکل 8٪ (b) پلی وینیل الکل 8٪ نانو رس 1٪ (c) پلی وینیل الکل 8٪ نانو رس 3٪ (d) پلی وینیل الکل 8٪ نانو رس 5٪

دستگاه آنالیز توزین حرارتی روشی برای بررسی و کشف نحوه ی رفتار یک ماده در مقابل حرارت می باشد. مدل دستگاه استفاده شده PYRIS Diamond ساخت شرکت Perkin Elmer می باشد.

## 3-2- روشها

عملیات تولید نانوالیاف مطابق شکل گرافیکی 2 با استفاده از دستگاه الکتروسی در شرایط مختلف انجام گرفت. این دستگاه قابلیت تولید ولتاژ 0-45 kV را دارا می باشد. سوزن استفاده شده 18 گیج و صفحه جمع کننده به صورت غلتک دوار است که جهت جمع آوری نمونه ها، سطح آن با فویل آلومینیوم پوشش داده شده است. پودر پلی وینیل الکل را با غلظت 8٪ (W/V) در حلال آب مقطر حل کرده و جز دوم نانو رس اصلاح شده را با درصدهای وزنی مختلف (1 و 3 و 5) به محلول حاصل اضافه شد. عملیات الکتروسی در شرایط یکسان برای تمام نمونه ها انجام شد. مشخصات محلول و شرایط الکتروسی در جدول 1 آورده شده است.

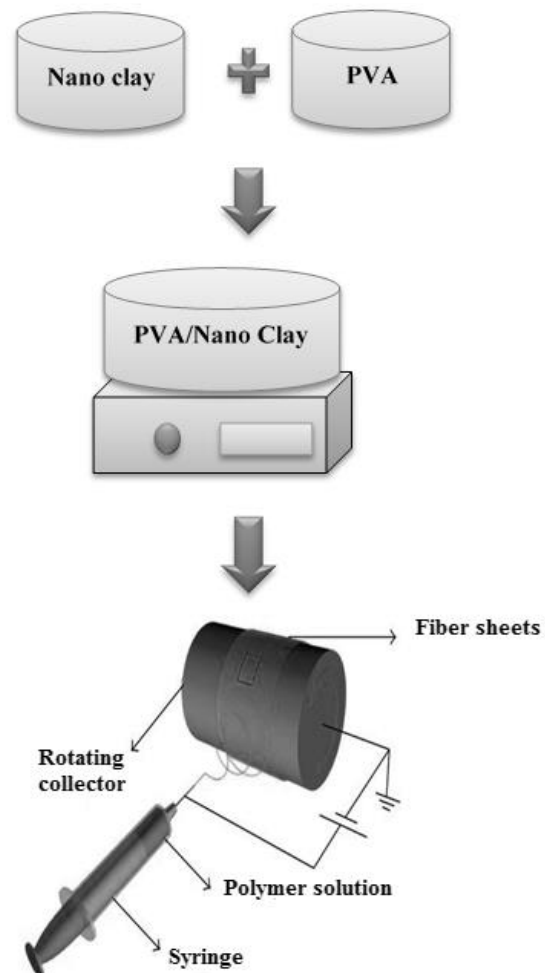


Fig.2 Graphical abstract of procedure

شکل 2 چکیده گرافیکی فرآیند آزمایش

3-3-آزمون تفرق اشعه ایکس(XRD)

شکل 6 طیف XRD نانورس اصلاح شده را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود نانورس اصلاح شده پیک مشخصه وسیعی در زاویه تفرق  $2\theta$  به مقدار 4.171 را نشان می دهد که طبق قانون براگ  $n\lambda = 2d \sin \theta$  بیان کننده فاصله بین لایه ای صفحات رس 2.167nm می باشد.

همان طور که در شکل 7 مشاهده می شود بعد از اضافه شدن نانو ذرات رس اصلاح شده به پلیمر در تمام نمودارها پیک شاخص صفحات نانورس از بین رفته است. با توجه به ماهیت آلی اصلاح کننده رس استفاده شده در این تحقیق در نمونه های نانوکامپوزیتی، در اثر نفوذ زنجیرهای پلیمری به داخل صفحات رس اصلاح شده و تحت تنش الکتروسیسی، صفحات نانورس کاملا از هم باز شده و ساختار لایه لایه (اکسفولیت) شکل گرفته است و در سه غلظت مختلف 1 و 3 و رفتار مشابه داشته اند.

لازم به ذکر است که افزایش قطر در نتیجه پارامترهای دیگری همچون افزایش ویسکوزیته در نتیجه حضور نانورس نیز می تواند باشد. در نمونه 5/ رس علاوه بر این تجمع نانوذرات می تواند بر افزایش قطر تاثیر مضاعف داشته باشد. هرچند که در نهایت ساختار نانو الیاف نانوکامپوزیتی یکنواخت و بدون معایب دانه تسییحی و بدون بید حاصل گردیده است.

2-3-نتایج آزمون طیف سنجی مادون قرمز FTIR

همان گونه که در تصویر 5 مربوط به طیف FTIR پلی وینیل الکل مشاهده می شود، نوار جذبی در ناحیه ی  $3399\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه های OH، نوار جذبی در ناحیه  $2939\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه های CH، نوار های جذبی مشاهده شده در ناحیه  $1735\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه کششی  $\text{C=O}$ ، و نوار در ناحیه  $1432\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه های  $\text{CH}_3$  (حرکات خمشی) و  $1091\text{cm}^{-1}$  مربوط به الکل نوع دوم می باشد. در طیف های FTIR، PVA، خالص، نوار جذبی مربوط به ارتعاش کششی پیوند OH در محدوده  $3200-3500\text{cm}^{-1}$  (پیوند های قوی هیدروکسیل برای الکل آزاد) از نوارهای جذبی اصلی مشاهده شده در این طیف می باشد. و همان گونه که از طیف های جذبی مشاهده می شود عملیات الکتروسیسی تاثیرری روی گروه های عاملی ندارد و فقط شدت آنها تغییر کرده است.

همان طور که انتظار می رود حضور گروه های O-Si و H-O-Al و OH-S و OH-Al، O-H مشاهده می شود، نوار جذبیدر ناحیه  $844\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه های کششی  $\text{AlMgOH}$  و  $1038.82\text{cm}^{-1}$  مربوط به Si-O می باشد. نوار جذبی مشاهده شده در  $3626.08\text{cm}^{-1}$  مربوط به گروه کششی O-H در  $\text{Al-OH}$  و Si-OH می باشد. حذف نوار جذبی در محدوده  $519\text{cm}^{-1}$  در نمونه نانورس و همپوشانی آن با نوار جذبی در محدوده  $606\text{cm}^{-1}$  دلیل بر همپوشانی گروههای عاملی در هر دو ماده است. به دلیل عدم ایجاد پیک جدید، هر دو ماده از طریق پیوند هیدروژنی با هم وارد واکنش شده اند.

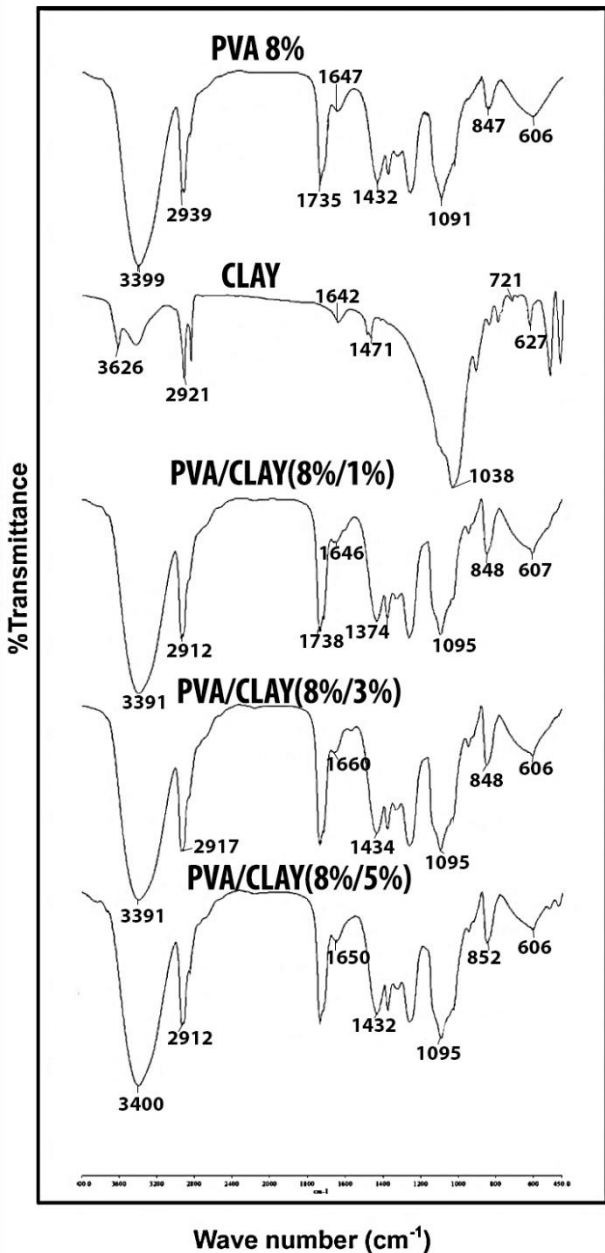


Fig5 comparison of fourier transform infrared spectrometer results

شکل 5 مقایسه نتایج آزمون طیفسنجی مادون قرمز

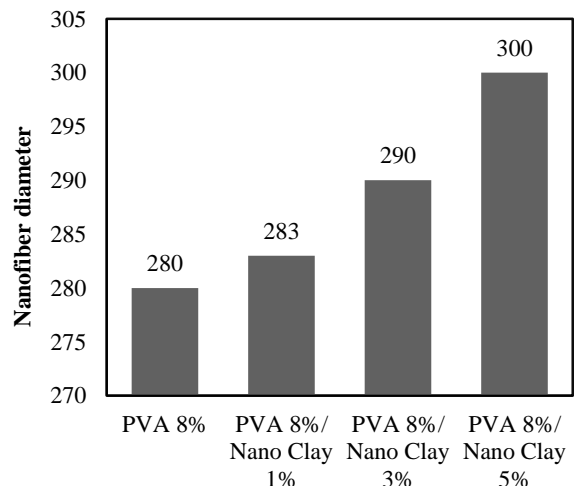


Fig.4 Diagram of diameter Changes with Nano Clay Concentration

شکل 4 نمودار مقایسه تغییرات قطر با غلظت نانو رس

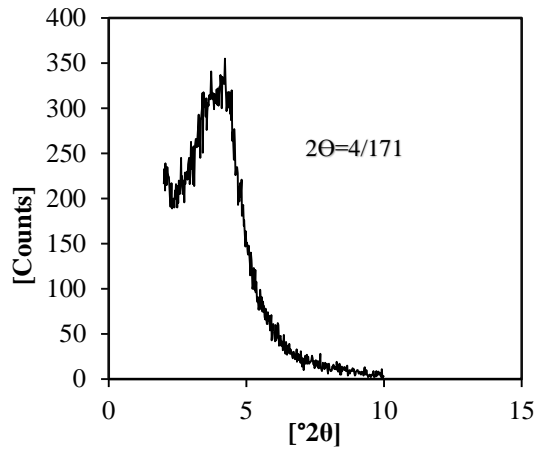


Fig. 6 XRD diagram of organo-clay

شکل 6 دیاگرام تفرق اشعه ایکس نانو رس

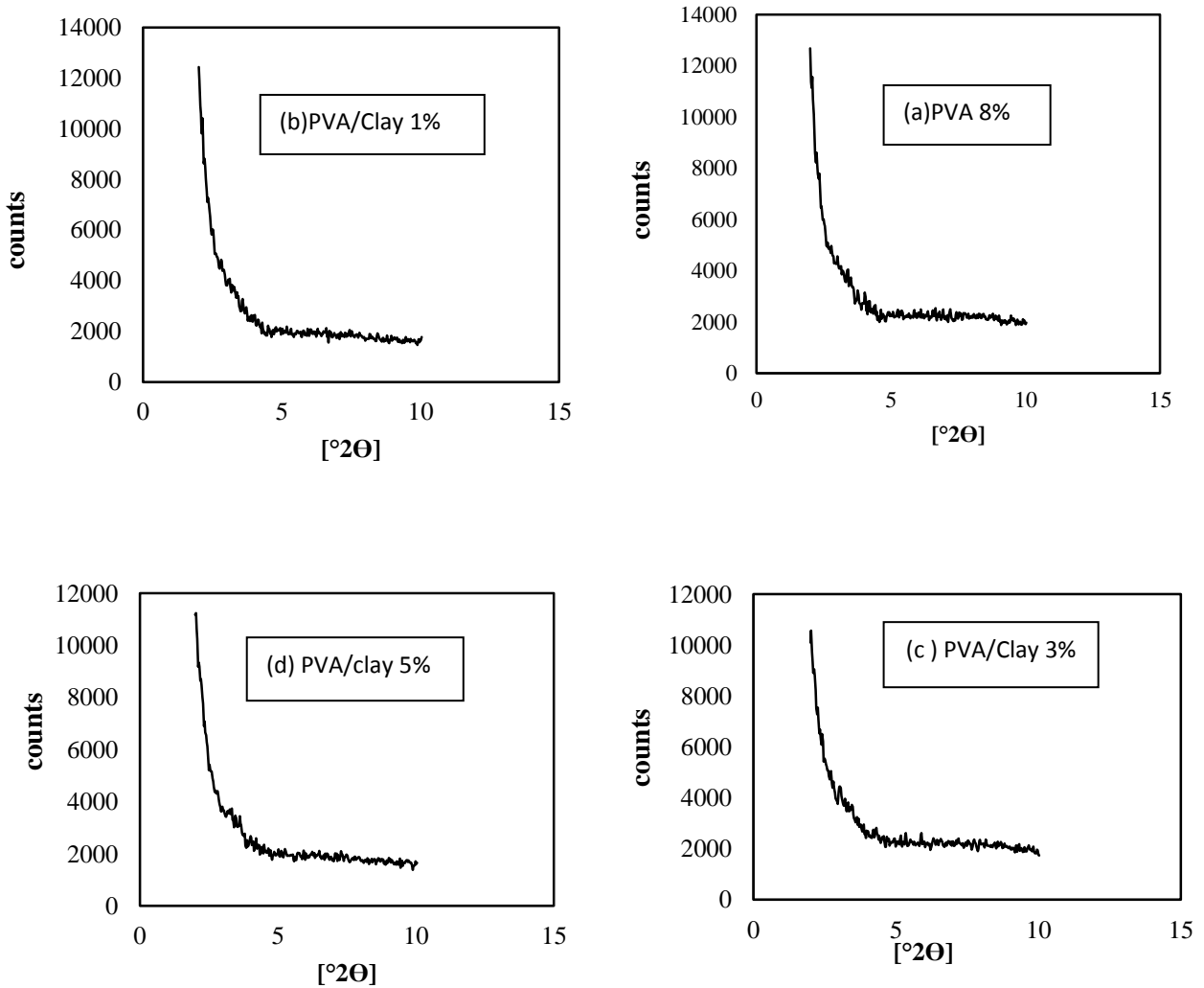


Fig. 7 XRD Diagram (a) PVA 8% (b) PVA/Nano Clay (8%/1%) (c) PVA/Nano Clay (8%/3%) (d) PVA/Nano Clay (8%/5%)

شکل 7 دیاگرام تفرق اشعه ایکس (الف) پلی وینیل الکل ۸٪ (ب) پلی وینیل الکل ۸٪ نانو رس ۱٪ (ج) پلی وینیل الکل ۸٪ نانو رس ۳٪ (د) پلی وینیل الکل ۸٪ نانو رس ۵٪

نانوالیاف نانوکامپوزیتی حاصل از پلیمر پلی وینیل الکل و نانورس اصلاح شده بررسی شد. مشاهدات براساس مناسب ترین نانوالیاف به لحاظ وجود اقلیت بید، برخورداری از یکنواختی بالا و میانگین قطر اندک، حاکی از آن است که تفاوت معنا دار چندانی میان نمونه های ناولیافی نانوکامپوزیتی وجود ندارد. هرچند که در مقدار اندک 1٪ از نانورس، نانوالیاف با میانگین قطری کمتر و یکنواخت تر تولید شده اند. هم چنین این دو ماده بدون جدا شدن فازی با هم ترکیب شده و ساختاری یکنواخت تشکیل داده اند، در نهایت ساختار نانو الیاف یکنواخت و بدون معایب دانه تسبیحی و بدون بید حاصل گردید. همچنین نتایج حاصل از FTIR و XRD نشان می دهد، صفحات نانو ذرات رس پس از وارد شدن به پلیمر به طور کامل باز شده اند.

5- منابع

[1] FANG Jian, NIU HaiTao, LIN Tong & WANG Xungai. "Application of Electrospun Nanofibers", Springer, 2265-2286. 2008.

[2] Jian Fang, Xungai Wang and Tong Lin. "Functional Applications of Electrospun Nanofibers", Nanofibers -Production, Properties and Functional Applications, Dr. Tong Lin (Ed.), ISBN: 978-953-307-420-7, 2011.

[3] Andradý A. L., "Science and Technology of Polymer Nano Fibers", John Wiley and sons Inc, 2008.

[4] Habibi, S., "Nanotechnology in Textile", Amir Kabir university, pp. 1-73, 2013. (In Persian)

[5] Rahnama, H. Mehrdad-Shorkrieh, M., "Exact Micromechanical Stress Analysis of Long Fiber Composites Under Uniform Tensile Loading" Journal of Technology of Composite, Vol 2, No 3, pp.1-10, 2015. (In Persian)

[6] Rafiee, R. Mazhar, B., "Modeling Creep in Long Fiber Reinforced Laminated Composites using Micromechanical Rules", Journal of Technology of Composite, Vol 3, No 4, pp.409-418, 2016. (In Persian)

[7] Baker, M. P. Walsh, S. Schwartz, Z. Boyan, D., "A Review of Polyvinyl Alcohol and its uses in Cartilageand Orthopedic Applications", society for biomaterials, Vol.100B, 1451-7, 2012.

[8] Yun Ok Kang. Chitosan-Coated Poly (vinyl alcohol) Nanofibers ForWound Dressings. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 568-576, 2009.

[9] Golgoon, A. Aliofkhaezai, M. Toorani, M., "The Structure and Corrosion Properties of Polyester-Clay Nanocomposite Coatings and Effect of Curing on Coatings Properties", Journal of Technology of Composites, Vol 3, No 1, pp.51-58, 2016. (In Persian)

[10] I. F. amaral, P. L. "Chemical modification of chitosan by phosphorylation: an XPS, FTIR and SEM study". J. Biomater. Sci. Polymer Edn, pp1575-1593, 2005.

3-4-آنالیز توزین حرارتی (TGA)

اشکال 8 و 9 دیاگرام آنالیز حرارتی TGA نمونه پلی وینیل الکل خالص و نمونه نانوالیاف نانوکامپوزیتی حاوی رس را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود دمای شروع تخریب از 220 درجه سانتی گراد در نمونه نانوالیاف خالص PVA به 250 درجه سانتی گراد در نمونه حاوی 3٪ نانو رس افزایش یافته است. چنین به نظر می رسد که حضور نانو رس به عنوان یک عامل هسته زا در حین فرایند الکترورسی باعث افزایش مناطق کریستالی و در نتیجه افزایش دمای شروع تخریب شده است.

با توجه به شکل 9 آنالیز وزنی TGA حاکی از آن است که میزان کاهش وزن در نمونه نانو الیاف PVA 0.798mg، و در نمونه نانو الیاف نانوکامپوزیتی PVA و نانو رس اصلاح شده 0.786mg می باشد که این تفاوت وزن بیشتر از باقیمانده ماده در انتهای فرایند حرارت دهی مربوط به ماده معدنی رس می باشد که میزان 0.078mg بوده و در اثر حرارت تخریب نشده است.

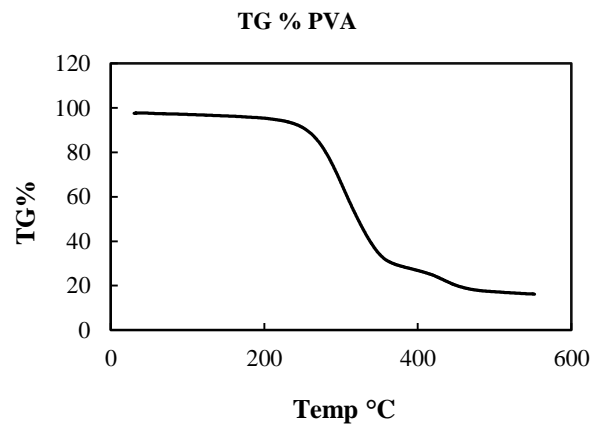


Fig.8 TGA graphs of PVA 8%

شکل 8 آنالیز توزین حرارتی پلی وینیل الکل 8٪

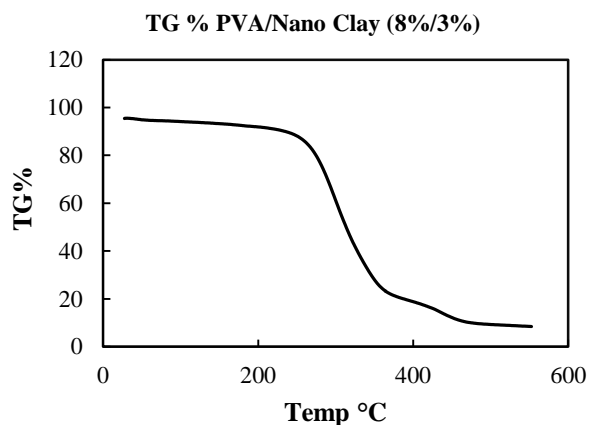


Fig.9 TGA graphs of PVA/Nano Clay (8%/3%)

شکل 9 آنالیز توزین حرارتی پلی وینیل الکل 8٪ نانو رس 3٪

4- نتیجه گیری

هدف اصلی تحقیق تولید و بررسی ریز ساختار نانو الیاف نانوکامپوزیتی پلی وینیل الکل در حضور نانو ذرات رس بود به منظور کاربردهای بعدی است. بدین منظور امکان الکترورسی و همچنین مشاهده و تحلیل ریز ساختار





## مدل تحلیلی برای پیش بینی پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی با رویه FML تحت ضربه با سرعت پایین

کرامت ملک زاده فرد<sup>1\*</sup>، امیر حسین آذرنیا<sup>2</sup>، ناصر ذوالقدر<sup>3</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی هوافضای دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
2- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا-سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
3- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا-سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 1774-15875، kmalekzadeh@mut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/2/7

پذیرش: 96/5/10

### کلیدواژگان:

ضربه با سرعت پایین  
ورق ساندویچی با رویه الیاف-فلز  
قانون تماس اصلاح شده جدید  
انرژی پتانسیل کل

### چکیده

در این مقاله پاسخ ورق ساندویچی با رویه الیاف-فلز تحت ضربه سرعت پایین توسط ضربه زننده صلب استوانه ای، براساس قانون برخورد اصلاح شده بررسی شده است. ورق ساندویچی از رویه های فلز-الیاف با یک هسته صلب-پلاستیک در نظر گرفته شده است. مقاومت له شدگی هسته در جهت عمودی ثابت فرض می شود. با استفاده از اصل انرژی پتانسیل مینیمم و مدل بالانس انرژی، یک حل تحلیلی جهت دستیابی به پارامترهای مجهول تماس در قانون برخورد غیر خطی هرگز ارائه گردیده است. در روش مذکور، ماکزیمم نیروی برخورد با کمک مدل جرم و فنر دو درجه آزادی در یک فرایند تکرار بدست می آید. با کمک این شیوه، محدوده معتبری، جهت استفاده از قانون هرگز برای ورق‌های ساندویچی با رویه الیاف-فلز تحت ضربه سرعت پایین، ارائه می گردد. قانون برخورد اصلاح شده نشان می‌دهد که برای هر مسئله برخورد مقادیر ضرایب در قانون تماس، منحصره فرد می باشد. نتایج بدست آمده از این روش، تطابق خوبی با دیگر نتایج تجربی و تحلیلی دارد. نتایج نشان می دهد که برخی پارامترهای فیزیکی و هندسی از قبیل چیدمان لایه ها، جرم و سرعت ضربه زننده در سطح انرژی ثابت و ابعاد سازه هدف، فاکتورهای مهمی هستند که در پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی با رویه فلز-الیاف اثرگذار می باشند.

## Analytical modeling to predict dynamic response of Fiber-Metal Laminated Panel subjected to low velocity impact

Keramat Malekzadeh-Fard\*, Amir hossein Azarnia, Naser Zolghadr

Department of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B.15875-1774, kmalekzadeh@mut.ac.ir

### Keywords

Low-velocity impact  
Fiber Metal Laminate  
New analytical law  
Total potential energy

### Abstract

This paper presents a new analytical method for low velocity impact on sandwich plates with Fiber Metal Laminate (FML) face sheets subjected to static indentation of a blunt end cylindrical indenter. The sandwich plate was composed of laminated face sheets and a rigid-plastic core. The core-crushing strength in the vertical direction was assumed constant. In this method, using of principle of minimum potential energy and the use of energy-balance model between indenter and sandwich plate, contact unknown coefficients corresponding with Hertzian contact law are obtained. The elastic strain energy resulting from bending in the sandwich plate and external work due to indentation load are evaluated using an appropriate shape function for the sandwich plate deformation. The maximum contact force using two-degree-of-freedom (2DOF) spring-mass model was found through an iterative process. Limitation of using Hertzian contact law for sandwich plates is determined. The results are in good agreement with the experimental and numerical results. The results indicated that some of parameters such as the layer sequence, mass and velocity of impactor in a constant impact energy level and aspect ratio of sandwich plate are important factors affecting the dynamics response of the sandwich panel.

### 1- مقدمه

مزایای این مواد به علت مقاومت ضعیف در برابر ضربه تحت الشعاع قرار گیرد. برای پیشگیری از این معضل استفاده از مواد مرکب الیاف-فلز در اینگونه از سازه ها رو به افزایش است. مواد مرکب الیاف-فلز در واقع یک سری از مواد لایه ای هستند که از ترکیب لایه های فلز مختلف با لایه های کامپوزیت ساخته شده اند تا نسبت به مواد صرفا کامپوزیتی یا مواد فلزی توانایی تحمل آسیب های خارجی همراه با مقاومت در برابر ضربه مناسبی از خود نشان

ارموزه، استفاده از ورق های ساندویچی در بسیاری از سازه های دریایی، فضایی، خودروها و حتی در سازه های متداول عمومی شایع است. با بکارگیری این سازه ها، می توان با افزایش ناچیز وزن سازه، ممان اینرسی مقاطع آن را بطور قابل توجهی افزایش داد. یکی از مهمترین معایب اینگونه ورق ها، عدم استحکام سازه در برابر پدیده ضربه می باشد که باعث گردیده

### Please cite this article using:

Malekzadeh-Fard, K. Azarnia, A. H. and Zolghadr, N., "Analytical modeling to predict dynamic response of Fiber-Metal Laminated Panel subjected to low velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 331-342, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

چوی و همکارانش [8] رابطه هرتز را که جهت محاسبه نیروی تماس استفاده می‌شد به فرم خطی نوشتند و در رابطه جدید برای محاسبه سفتی تماس مجهول از قانون پایستاری انرژی استفاده نمودند. این رویکرد مبنی بر فرض عدم اتلاف انرژی در مدت‌زمان پدیده ضربه ارائه شد. آن‌ها نشان دادند که استفاده از فرم خطی شده قانون تماس را می‌توان با تقریب بسیار خوبی در حل مسائل ضربه بکار برد.

کاپرینو [9] رفتار لمینت آلومینیم-فایبرگلاس را تحت ضربه سرعت پایین بصورت تجربی بررسی نمود. ایشان جهت مقایسه تست مشابه ای را برای ورق صرفاً آلومینیم با ضخامت مشابه انجام داد و جهت بهبود کیفیت ترکیب آلومینیم کربن را جهت جذب بهتر انرژی پیشنهاد داد. وی همچنین اثبات کرد که منحنی نیرو-جا به جایی کلی سازه با لایه فلز-الیاف به جرم و سرعت ضربه زننده به صورت جداگانه بستگی نداشته و تنها به انرژی ضربه بستگی دارد. چای و زو [10] به‌مرور کاملی بر روش‌های عددی، تحلیلی و تجربی در ضربه بر روی پانل‌های ساندویچی چندلایه مرکب پرداختند. مسئله ضربه با سرعت پایین را در سه دسته جرمی به‌طور مفصل بررسی نمودند. آنها همچنین اثرات فاکتورهای کلیدی در ضربه مانند ضخامت رویه، زاویه ضربه زننده، اثرات نرخ کرنش، سرعت، جرم و هندسه ضربه زننده و نیز شرایط مرزی را بررسی نمودند. کانتول و همکاران [11] پاسخ ضربه با سرعت بالا روی ورق‌های ساندویچی با رویه الیاف-فلز و هسته پلی اتیلن بصورت تجربی بررسی کردند. آنها در رویه‌ها از دو نوع آلیاژ آلومینیوم استفاده کردند که اثرات هر یک را بطور مفصل در پاسخ ضربه بررسی نمودند.

گون و همکاران [12] برخورد سرعت بالا بر روی صفحات الیاف-فلز را به دو روش تجربی و المان محدود مطالعه کردند. در این بررسی آسیب سازه نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. پایگانه و همکاران [13] به بررسی ضربه سرعت پایین بر روی ورق‌های FML بصورت تحلیل پرداختند و از قانون اصلاح شده هرتز جهت بررسی ضربه استفاده نمودند. آنها در ورق از تئوری مرتبه اول برشی بهره گرفتند. نتایج این بررسی نشان می‌داد که ورق‌های فلزی نزدیک به لایه مورد ضربه باعث افزایش مقاومت سازه می‌گردد.

حسینی و همکارانش [14] پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی-کامپوزیتی را تحت ضربه با سرعت پایین بررسی کردند. آنها ضربه زننده را بصورت جسم استوانه‌ای سرتخت در نظر گرفتند و خیز رویه‌ها را نیز چندین برابر خیز سازه فرض کردند. در مقایسه با مرجع [7] ترمهای نیروهای صفحه‌ای نیز در معادله نیروی برخورد در نظر گرفته شد. شکریه و فخار [15] به بررسی ضربه سرعت پایین روی پانل‌های ساندویچی با شرایط تکیه گاهی متفاوت با روشهای تحلیلی، عددی و تجربی پرداختند. آنها از دستگاه تست ضربه برای انجام آزمایش تجربی و از نرم افزار LS-Dyna برای بررسی عددی و برای مبحث تحلیلی از مدل جرم-فنر-دشپات دو درجه آزادی استفاده نمودند. نتایج شبیه‌سازی عددی به تست تجربی بسیار نزدیک بود اما روش تحلیلی در سرعت‌های بالاتر از دقت مناسبی برخوردار نبود.

موریتتر [16] یک مدل تحلیلی شبه استاتیکی برای مطالعه ضربه با سرعت پایین روی ورق‌های هیبریدی تحت ضربه زنده کرووی ارائه داد. وی با اعمال اثرات نرخ کرنش در معادلات و اثر پلاستیسیته فلز سناریوی آسیب بین لایه ای را بیان کرد. وو و همکارانش [17] به بررسی ضربه با سرعت پایین روی ورق‌های فلز-الیاف با الیاف کربن پرداختند و اثرات خواص آلیاژ آلومینیوم را در سازه بررسی کردند و مدل مورد نظر را با نتایج المان محدود مقایسه نمودند.

دهند. این نسل جدید از مواد مرکب در چند سال اخیر، در ساختارهای ساندویچی جایگاه ویژه‌ای داشته و مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.

مهمترین مطالعات اولیه تجربی و تحلیلی توسط آقای ولت [1] برای تعیین پاسخ ضربه روی ورق‌های الیاف-فلز انجام شد که در آن اثر بارگذاری استاتیکی و همچنین ضربه سرعت بالا و سرعت پایین بررسی گردید. در پژوهش انجام شده سه مدل خطی الاستیک و غیر خطی الاستیک و مدل غیر خطی الاستیک-پلاستیک برای ضربه سرعت پایین در نظر گرفته شد.

بررسی جامع و مروری کامل بر دینامیک پدیده ضربه و پاسخ مواد و سازه‌های چندلایه مرکب به بار ضربه‌ای و نیز بررسی آسیب و نحوه رشد آسیب و کاهش استحکام باقیمانده و مودهای شکست در مقاله‌ای توسط ابریت [2] بیان گردید. وی انواع مدل‌های ارائه شده روی آنالیز ضربه در صفحات چند لایه را طبقه بندی نمود و به روشنی دامنه و محدوده کاربرد هر یک از مدل‌ها را بیان داشت. ویلیام سون و لاگاس [3] تست تجربی جهت بررسی رفتار موضعی و کلی پانل ساندویچی را در ضربه سرعت پایین بررسی کردند. همچنین آنها آسیب ناشی از ضربه را در رویه و هسته مورد مطالعه قرار دادند.

امور و کروز [4] روش حل نیمه‌تحلیلی را برای پدیده برخورد و ضربه روی یک صفحه چندلایه مرکب ساندویچی به‌صورت دینامیکی ارائه دادند، آن‌ها در روابط خود از رابطه برخورد هرتز استفاده نمودند.

پیرسون و وزیری [5] به کمک تئوری برشی مرتبه اول، ترکیب اثرات تغییر شکل برشی عرضی، اینرسی‌های چرخشی و قانون برخورد غیرخطی هرتز مسئله ضربه با سرعت پایین را تحلیل کردند. آن‌ها برای حل از سری‌های فوریه دوگانه استفاده نمودند و فرکانس‌های طبیعی مربوط به اینرسی‌های چرخشی را نیز در نظر گرفتند و بدین طریق حل خود را توسعه دادند.

از منظر نسبت جرمی السون [6] ضربه را به دو دسته کلی موج ضربه زننده و مرز کنترل شده دسته بندی کرد. در دسته اول نسبت جرم ضربه زننده به جرم سازه آنقدر کوچک است که ضربه ماهیت دینامیکی پیدا می‌کند. بدین معنی که امواج برشی و خمشی فرصت پیدا کرده تا از محل وقوع ضربه به طرف مرز سازه انتشار یافته و پس از برخورد با مرز، در بازگشت به محل وقوع ضربه برگردند و سبب تغییر در رفتار نیروی تماس شوند. در مورد ورق‌های کامپوزیتی، نسبت جرم ضربه زننده به جرم ورق باید کوچکتر از یک چهارم جرم بزرگترین ناحیه متأثر از امواج قبل از رسیدن به مرزها باشد. در دسته دوم جرم ضربه زننده به جرم سازه بزرگ است لذا خیز در محل ضربه با نیروی تماس کم و بیش هم فاز است در نتیجه اثر انتشار امواج قابل صرف‌نظر است. هوفت و پارک [7] سازه مورد بررسی را به‌صورت یک ورق ساندویچی مستطیلی با رویه‌های چندلایه‌ای ارتوتروپیک متقارن فرض کردند. بارگذاری تماسی در مرکز ورق در نظر گرفته شد و نفوذکننده به‌صورت یک استوانه صلب سر تخت فرض گردید. سه حالت ممکن برای فرورفتگی رویه بالایی بررسی شد: ورق روی یک بستر الاستیک، ورق روی یک بستر صلب-پلاستیک، غشا روی یک بستر صلب-پلاستیک.

در مدل‌های ورق روی یک بستر صلب-پلاستیک و غشا روی یک بستر صلب-پلاستیک، با بکارگیری یک تابع شکل مناسب برای خیز رویه، مقادیر انرژی کرنشی الاستیک رویه و کار پلاستیک تلف شده در اثر له شدن هسته هانی کوم و همچنین کار خارجی ناشی از نیروی نفوذکننده محاسبه گردید. سپس با استفاده از اصل مینیمم انرژی پتانسیل، رابطه بین نیروی برخورد و خیز عرضی تعیین شد.

$$\alpha = \begin{cases} \delta & 0 \leq x^2 + y^2 \leq R^2 \\ \delta \left[ 1 - \left( \frac{x-R}{\xi-R} \right)^2 \right]^2 \left( 1 - \left( \frac{y-R}{\xi-R} \right)^2 \right)^2 & R^2 \leq x^2 + y^2 \leq \xi^2 \end{cases} \quad (2)$$

که  $\delta$  مقدار خیز در ناحیه دایروی زیر نفوذ کننده و  $\xi$  شعاع ناحیه تغییر شکل یافته می باشد. تابع فوق فقط در یک چهارم مثبت صفحه مختصات تعریف می شود و فرض می شود که نسبت به هر دو محور مختصات متقارن باشد. تابع فرض شده شرایط مرزی خیز و شیب صفر در مرز ناحیه تغییر شکل را برآورده می سازد. با قرار دادن معادله (2) در (1) خواهیم داشت:

$$U = \frac{F_1 \delta^2}{(R - \xi)^2} \quad (3)$$

که در آن

$$F_1 = \frac{16384}{11025} [7D_{11} + 7D_{22} + 4D_{12} + 8D_{66}] \quad (4)$$

برای تحلیل مسئله از اصل انرژی پتانسیل مینیمم استفاده می شود. انرژی پتانسیل کل در فرایند فرورفتگی را می توان به فرم زیر نوشت:

$$\Pi = U + D - W \quad (5)$$

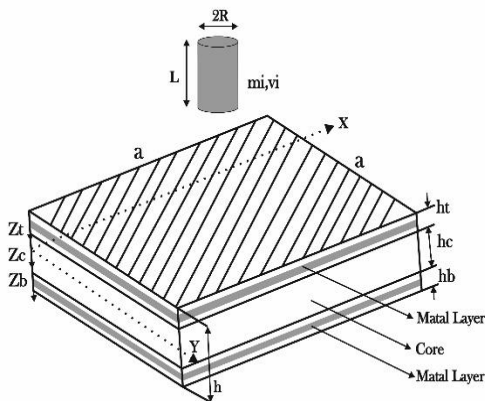


Fig.1 Basic model of the sandwich panel with FML layer subjected to static indentation of rigid cylinder

شکل 1 مدل اولیه ورق ساندویچی با رویه فلز-الیاف تحت ضربه زنده صلب استوانه ای

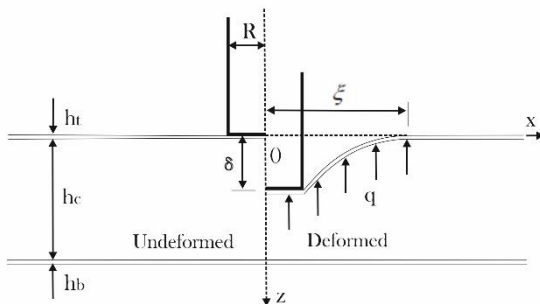


Fig.2 schematic profile of the deforming zone under a flat indenter

شکل 2 شماتیک منطقه تغییر شکل یافته تحت ضربه زنده استوانه ای سر تخت

در اکثر مقالات پیش از این، بررسی مسئله تماس در سرعت های پایین در ورق های ساندویچی و کامپوزیتی با رویه فلز-الیاف، با کمک تئوری تماس غیرخطی هرتز انجام می شد که پارامترهای تماس از تئوری تماس هرتز یا از طریق تست فرورفتگی استاتیکی بدست می آمد.

در روش حاضر این موضوع موشکافانه به صورت کاملاً تحلیلی بررسی شده بطوریکه ضرائب قانون فوق در ضربه سرعت پایین بر روی ورق های ساندویچی تعیین شده است. با نتایج بدست آمده اثبات گردیده است که قانون غیر خطی هرتز برای ورق های ساندویچی به لحاظ فرورفتگی موضعی و کلی سازه، از دقت مناسبی برخوردار نمی باشد.

در این مقاله یک قانون برخورد اصلاح شده جدید برای برخورد ضربه زنده با سرعت پایین بر روی ورق های ساندویچی با رویه فلز-الیاف ارائه می گردد. در این روش برای اولین بار با ارائه یک فرآیند حل تحلیلی جدید با استفاده از اصل انرژی پتانسیل مینیمم و استفاده از رابطه توانی غیرخطی تماس بین ضربه زنده و سازه هدف و تکرار تا همگرایی حل مسئله، ضرایب مجهول قانون توانی تماس به صورت صریح بدست می آید. نتایج بدست آمده از این روش، تطابق بسیار خوبی با دیگر نتایج تجربی و تحلیلی دارد.

## 2- روند استخراج معادلات قانون برخورد جدید توسعه یافته

پانل ساندویچی با رویه فلز-الیاف بطور شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است. رویه های بالا و پایین هر یک به ضخامت  $h_t$  و هسته با ضخامت  $h_c$  می باشند. پانل ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین جسم نفوذ کننده به شکل یک استوانه صلب سر تخت به شعاع R و طول L قرار دارد. در این مرحله بمنظور استخراج قانون برخورد -رابطه بین نیروی اعمالی از طرف نفوذ کننده و تغییر شکل موضعی (فرورفتگی) پانل ساندویچی-فرض می شود رویه ها بر روی یک بستر صلب قرار گرفته اند [7].

با این نوع شرط مرزی، از تغییر شکل کلی پانل ممانعت شده و فقط تغییر شکل موضعی امکان پذیر می گردد. همچنین فرض می شود مقاومت هسته در برابر له شدگی در راستای قائم مقداری ثابت باشد [14].

این ویژگی در اغلب هسته های لانه زنبوری و برخی هسته های فومی مشاهده می شود.

برطبق تئوری کلاسیک ورق، انرژی کرنشی سازه بواسطه خمش رویه ها

برابر است با: [10]

$$U = \frac{1}{2} \iint \left\{ D_{11} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2D_{12} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + 4D_{12} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} \right) + 4D_{26} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) + 4D_{66} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} d_A \quad (1)$$

که در آن  $D_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 6$ ) درایه های ماتریس سفتی چندلایه اورتوتروپیک است.  $d_A = d_x d_y$  و A مساحت سطح تغییر شکل یافته ورق است. همانطور که در شکل 2 نشان داده شده می توان تغییر شکل رویه بالایی در اثر جسم نفوذ کننده را با رابطه (2) تقریب زد [16]

$$F_{max} = \left( \frac{2D_1\delta}{(R-\xi)^2} \left( \frac{F_{max}}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \right) (n+1) + (\pi q R^2 + \frac{256}{255} q \delta (R-\xi)^2) (n+1) \quad (16)$$

با بازنویسی معادله (16) براساس پارامتر  $K$  داریم:

$$K^{\frac{-1}{n}} = \left( \frac{F_{max}^{\frac{n-1}{n}}}{\left( \frac{2D_1}{(R-\xi)^2} (n+1) \right)} \right) + \frac{\pi q R^2 + \frac{256}{255} q (R-\xi)^2}{\left( \frac{2D_1}{(R-\xi)^2} \right)} F_{max}^{\frac{-1}{n}} \quad (17)$$

## 1-2- مدل بالانس- انرژی

وقتی پانل ساندویچی با تکیه گاه ساده تحت ضربه سرعت پایین قرار دارد دو نوع تغییر شکل اتفاق می افتد: تغییر شکل موضعی رویه فوقانی در هسته  $\delta$ ، و تغییر شکل کلی ورق ساندویچی  $\Delta$ ،

در حال حاضر با توسعه مدل بالانس انرژی به استخراج رابطه جدید بین ماکزیمم نیروی برخورد و سفتی تماس پرداخته می شود. براساس فرضیات رفتار شبه استاتیکی، انرژی جنبشی اولیه پرتابه با صرف نظر از اثرات غشایی و آسیب برابر است با مجموع انرژی های ناشی از فرورفتگی موضعی و انرژی ناشی از تغییر شکل کلی سازه [10]. تغییر شکل کلی سازه هم معمولاً شامل خمش، تغییر شکل برشی و برای خیزهای بزرگ اثرات غشایی نیز مدنظر قرار می گیرد. بر این اساس با صرف نظر از اثرات غشایی داریم: [15]

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 = E_c + E_{bs} \quad (18)$$

$E_{bs}$  انرژی کرنشی سازه است که شامل اثرات خمشی و برشی است.  $m_i$  و  $v_i$  به ترتیب جرم و سرعت اولیه ضربه زننده می باشد. همچنین  $E_c$  انرژی فرورفتگی در منطقه تماس است که برابر است با: [10]

$$E_c = \int_0^{\alpha_{max}} F d\alpha = \frac{k \alpha_{max}^{n+1}}{n+1} = \frac{k^{\frac{-1}{n}} F_{max}^{\frac{n+1}{n}}}{n+1} \quad (19)$$

به منظور یافتن تغییر شکل کلی برای سازه هدف با ابعاد  $a \times a$  از روش مینیمم سازه انرژی پتانسیل کلی استفاده می شود. توابع شکل مربوط به خیز قائم  $w$  و چرخشها نسبت به محور  $X$  و  $Y$  به ترتیب  $\bar{\alpha}$  و  $\bar{\beta}$  می باشند و به صورت ذیل تعریف می شوند [7]:

$$w = \Delta f(x) f(y) \quad \frac{-a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, \quad \frac{-a}{2} \leq y \leq \frac{a}{2}$$

$$\bar{\alpha}(x, y) = \alpha_0 g(x) h(y) \quad \frac{-a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, \quad \frac{-a}{2} \leq y \leq \frac{a}{2}$$

$$\bar{\beta}(x, y) = \beta_0 h(x) g(y) \quad \frac{-a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, \quad \frac{-a}{2} \leq y \leq \frac{a}{2} \quad (20)$$

که در آن  $\Delta$ ،  $\alpha_0$  و  $\beta_0$  دامنه های توابع شکل خیز قائم و چرخشها می باشند. توابع  $f(x)$ ،  $f(y)$ ،  $g(x)$ ،  $g(y)$ ،  $h(x)$ ،  $h(y)$  به گونه ای انتخاب می شوند که شرایط مرزی مسئله را در لبه های سازه ارضا کنند. برای سازه هدف مورد نظر انرژی کرنشی مربوط به تغییر شکل های خمشی و برشی با گسترش روابط مرجع [7] و در نظر گرفتن پارامترهای  $D_{16}$  و  $D_{26}$  به صورت رابطه (21) بیان می شود، که در آن ماتریس سفتی خمشی و  $A_{ij}$  سفتی برشی عرضی سازه است. از جایگذاری نمودن توابع (20) در معادله (21)، انرژی کرنشی سازه به صورت عبارتی برحسب دامنه های خیز قائم و چرخشها بیان می شود. (رابطه (22))

که در آن  $D$  کار پلاستیک تلف شده در فرایند له شدن هسته و  $W$  کار انجام شده در اثر نیروی برخورد - کار خارجی انجام شده می باشد. کار مربوط به فرایند له شدن هسته، از مجموع کارهای مربوط به نواحی زیر نفوذ کننده و خارج نفوذ کننده بدست می آید [14]:

$$D = D_1 + D_2 \quad (6)$$

که در آن  $D_1$  و  $D_2$  به ترتیب کارهای مربوط به پدیده له شدن هسته در ناحیه زیر نفوذ کننده و ناحیه خارج نفوذ کننده می باشند و به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$D_1 = \pi q R^2 \delta \quad (7)$$

$$D_2 = 4 \int_R^\xi \int_R^\xi q \delta d_x d_y \quad (8)$$

با جایگذاری تابع تغییر شکل رویه در معادله (8) داریم:

$$D_2 = \frac{4}{9} q \delta (\xi - R)^2 \quad (9)$$

کار انجام شده بوسیله نیروی برخورد  $P$  برابر است با:

$$w = P \delta \quad (10)$$

از بررسی های تئوری و تجربی می توان نشان داد که تماس بین ضربه زننده و سازه هدف در طی فرایند بارگذاری با رابطه غیر خطی زیر تقریب زده می شود:

$$F = k \alpha^n \quad (11)$$

که در آن  $\alpha$  فرورفتگی سازه در اثر ضربه زننده،  $k$  سفتی غیر خطی برخورد و  $n$  پارامتر توانی است. کار حاصل از برخورد در منطقه تماس را می توان بصورت ذیل بیان کرد: [10]

$$E_c = \int_0^{\alpha_{max}} k \alpha^n d\alpha = \frac{k \alpha_{max}^{n+1}}{n+1} = \frac{\left( \frac{F_{max}}{\alpha^n} \right) \alpha_{max}^{n+1}}{n+1} = \frac{F_{max} \alpha_{max}}{n+1} \quad (12)$$

که در آن  $F_{max}$  ماکزیمم نیروی فرورفتگی می باشد. با فرض اینکه بتوان یک نیروی متوسط در طول مسیر برخورد تعریف کرد که به صورت شبه استاتیکی بر سازه وارد شود آنگاه خواهیم داشت:

$$\bar{w} = F^* \alpha_{max} \quad (13)$$

که در رابطه فوق  $\bar{w}$  کار حاصل از نیروی متوسط در طول مسیر برخورد است. با توجه به برابری این کار با کار حاصل از برخورد خواهیم داشت:

$$F^* = \frac{F_{max}}{n+1} \quad (14)$$

با محاسبه انرژی پتانسیل کل ورق ساندویچی در فرایند فرورفتگی و با مینیمم سازی آن نسبت به پارامتر  $\delta$  خواهیم داشت:

$$\frac{2F_1\delta}{(R-\xi)^2} + \pi q R^2 + \frac{256}{255} q \delta (R-\xi)^2 = F^* = \frac{F_{max}}{n+1} \quad (15)$$

از معادله (15) خواهیم داشت:

$$E_{bs} = A_{14} p^2 \quad (29)$$

که در رابطه فوق می توان نوشت:

$$A_{14} = \left\{ \begin{array}{l} A_1 A_{12}^2 + A_2 A_{12} A_{13} + A_3 A_{13}^2 + A_5 F_{11}^2 \\ + A_4 A_{12} A_{11} + A_6 A_{11} A_{13} \end{array} \right\} \quad (30)$$

ملاحظه می شود که  $E_{bs}$  تابع خواص و هندسه ورق و نیز تابع  $F_{max}$  و  $n$  است. حال معادله بالانس-انرژی مجدداً با کمک معادلات (14)، (18) و (19) به صورت ذیل بازنویسی می شود:

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{k^{-\frac{1}{n}} F_{max}^{\frac{n+1}{n}}}{n+1} + A_{14} \frac{F_{max}^2}{(n+1)^2} \quad (31)$$

می توان از معادله فوق پارامتر سفتی غیرخطی برخورد  $k$  را برحسب دو مجهول دیگر محاسبه کرد:

$$K^{(-\frac{1}{n})} = \left[ \frac{1}{2} (n+1) m_i v_i^2 F_{max}^{\frac{n+1}{n}} - \left( \frac{A_{14}}{n+1} \right) F_{max}^{\frac{(n-1)}{n}} \right] \quad (32)$$

حال با تساوی قرار دادن دو رابطه مستقل (17) و (32) رابطه بر اساس  $n$  برای  $F_{max}$  بدست می آید:

$$F_{max} = \frac{\frac{N}{M}(n+1) \pm \sqrt{\left(\frac{N}{M}(n+1)\right)^2 + 4T(n+1)^2 A_{15}}}{2A_{15}} \quad (33)$$

که در آن  $N = \pi q R^2 + \epsilon$ ،  $A_{15} = \left[ \frac{1}{M} + A_{14} \right]$ ،  $T = 0.5 m_i v^2$  و  $M = \frac{2F_1}{(R-\xi)^2}$  و  $\frac{256}{255} q(R-\xi)^2$  تعریف می شود.

## 2-2- محاسبه ماکزیمم نیروی برخورد

در این مطالعه سیستم جرم و فنر دو درجه آزادی برای پیش بینی ماکزیمم نیروی تماس پیشنهاد شده است. با توجه به شکل 3 در مدل جرم و فنر، ضربه زننده و جسم هدف به ترتیب با جرم های  $m_s$  و  $m_i$ ، میزان فرورفتگی ضربه زننده در جسم هدف توسط یک فنر به سفتی خطی شده  $k^*$  و سفتی معادل سازه با فنر  $k_g$  مشخص گردیده است. معادلات سیستم دو درجه آزادی به شکل ذیل است:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i X_1'' + k^*(X_1 - X_2) = 0 \\ m_s X_2'' - k^*(X_1) + (k_g + k^*)X_2 = 0 \end{array} \right\} \quad (34)$$

در رابطه فوق  $X_1(t)$  و  $X_2(t)$  به ترتیب جابه جایی ضربه زننده و سازه هدف را مشخص می کنند. همچنین در روابط سفتی تماس خطی شده به صورت ذیل تعریف می گردد [8]:

$$k^* = k^n \frac{n-1}{F_{max}^{\frac{n-1}{n}}} \quad (35)$$

تبا توجه به معادله (26) سفتی معادل سازه بدست می آید [7]:

$$K_g = \frac{F^*}{\Delta} \quad (36)$$

شرایط مرزی مسئله نیز به صورت ذیل است:

$$t = 0 \rightarrow x_1 = x_2 = 0, \quad x_1' = v_i, \quad x_2' = 0 \quad (37)$$

با در نظر گرفتن معادله (34) جابه جایی ضربه زننده و سازه هدف به شکل زیر تعریف می شود:

$$x_1 = C_1 \sin \omega t, \quad x_2 = C_2 \sin \omega t \quad (38)$$

$$E_{bs} = 4 \int_0^{a/2} \int_0^{a/2} \left\{ \frac{D_{11}}{2} \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} \right)^2 + D_{12} \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y} \right) + \frac{D_{22}}{2} \left( \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} \right)^2 + A_{55} \left[ \frac{\bar{\alpha}}{2} + \frac{\bar{\alpha} \partial w}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] + A_{44} \left[ \frac{\bar{\beta}}{2} + \frac{\bar{\beta} \partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] + D_{66} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} \right)^2 \right] + D_{16} \left[ \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} \right) \right] + D_{26} \left[ \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y} \right) \right] \right\} dx dy \quad (21)$$

$$E_{bs} = A_1 \Delta^2 + A_2 \Delta \beta^0 + A_3 \beta^0{}^2 + A_4 \Delta \alpha^0 + A_5 \alpha^0{}^2 + A_6 \alpha^0 \beta^0 \quad (22)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{2240}{1575} [A_{44} + A_{55}] \\ A_2 &= \frac{1344}{1575} [A_{44} a] \\ A_3 &= \frac{1}{1575} [204 a^2 A_{44} + 2016 D_{22} + 2040 D_{66}] - D_{26} \\ A_4 &= \frac{1344}{1575} [A_{55} a] \\ A_5 &= \frac{1}{1575} [204 a^2 A_{55} + 2016 D_{11} + 2040 D_{66}] - D_{16} \\ A_6 &= \frac{4032}{1575} [D_{12} + D_{66} + D_{16}] - D_{26} \end{aligned} \quad (23)$$

با تعریف نیروی برخورد متوسط تا لحظه خیز ماکزیمم  $p$ ، و با فرض اینکه از اثرات توزیع فشار ضربه زننده صرف نظر گردد و نیروی تماس به عنوان نیروی متمرکز در نظر گرفته شود، در این صورت کار خارجی برابر است با:

$$V = p \Delta \quad (24)$$

در نتیجه انرژی پتانسیل کل برابر است با:

$$\Pi = E_{bs} - V \quad (25)$$

شرط تعادل سیستم ضربه زننده و سازه، مینیمم شدن  $\Pi$  نسبت به متغیرهای مستقل آن یعنی  $\Delta$ ،  $\alpha^0$  و  $\beta^0$  است که با کمینه سازی می توان به یک دستگاه معادلات رسید.

به منظور حفظ شرط تعادل بایستی  $\Pi$  نسبت به متغیرهای مستقل خود مینیمم باشد. با مینیمم سازی نسبت به متغیرهای  $\Delta$ ،  $\alpha^0$  و  $\beta^0$  دستگاه معادلات زیر دست می یابیم:

$$\begin{aligned} A_4 \Delta + 2A_5 \alpha^0 + A_6 \beta^0 &= 0 \\ A_2 \Delta + A_6 \alpha^0 + 2A_3 \beta^0 &= 0 \\ 2A_1 \Delta + A_4 \alpha^0 + A_2 \beta^0 - p &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

با توجه به وجود سه معادله و سه مجهول و تعریف پارامترهای ذیل، عباراتی برای  $\Delta$ ،  $\alpha^0$  و  $\beta^0$  بدست می آید:

$$\begin{aligned} A_7 &= A_2 - \frac{2A_3 A_4}{A_6}, \quad A_8 = A_6 - \frac{2A_5 A_2}{A_6} \\ A_9 &= 2A_1 - \frac{A_2 A_4}{A_6}, \quad A_{10} = A_4 - \frac{2A_2 A_5}{A_6} \\ A_{11} &= \frac{1}{A_{10} - \frac{A_9 A_8}{A_7}}, \quad A_{12} = -\frac{A_{11} A_8}{A_7} \\ A_{13} &= -\left[ \frac{A_4 A_{12}}{A_6} + \frac{2A_5 A_{11}}{a_6} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

آنگاه:

$$\alpha^0 = A_{11} p, \quad \beta^0 = A_{13} p, \quad \Delta = A_{12} p \quad (28)$$

با جایگذاری (28) در معادله (22) داریم:

متلب برنامه‌نویسی شده و نتایج آن استخراج شده است. در رابطه (34) برای محاسبه جرم مؤثر سازه، فرض می‌شود که پروفیل سرعت سازه مشابه با پروفیل خیز کلی سازه باشد. انرژی جنبشی برابر است با: [7]

$$KE = 2 \int_0^{\frac{a}{2}} \int_0^{\frac{a}{2}} \rho_s (h_t + h_b + h_c) \Delta^2 \left[ 1 - \left( \frac{2x}{a} \right)^2 \right] * \left[ 1 - \left( \frac{2y}{b} \right)^2 \right] dx dy \quad (46)$$

که در رابطه فوق  $\rho_s$  دانسیته جرمی ورق ساندویچی می‌باشد. پس از انتگرال‌گیری خواهیم داشت:

$$KE = \frac{32}{225} \rho_s (h_t + h_b + h_c) a^2 \Delta^2 \quad (47)$$

مقدار انرژی جنبشی با استفاده از جرم مؤثر ورق ساندویچی نیز می‌تواند به صورت ذیل تعیین شود: [14]

$$KE = \frac{1}{2} m_s \Delta^2 \quad (48)$$

در این صورت جرم مؤثر ورق ساندویچی مربعی برابر می‌شود با:

$$m_s = \frac{64}{225} \rho_s (h_t + h_b + h_c) a^2 \quad (49)$$

### 3- بررسی و تحلیل نتایج

#### 1-3- صحنه گذاری

صفحه تخت ساندویچی با رویه کربن/اپوکسی 6-AS4/3501 با لایه چینی  $[0,90]_{8S}$  و هسته لانه زنبوری نومیکس با شرایط تکیه گاهی ساده را مطابق شکل 1 در نظر بگیرید. ضربه زنده به شکل استوانه ای با سر نیمه کروی از جنس استیل می‌باشد. مشخصات هندسی و مکانیکی سازه هدف و ضربه زنده در جداول 1 تا 3 نشان داده شده است. مطابق با مرجع [14]، سفتی دینامیکی رویه برابر با مقدار استاتیکی است اما مقاومت له شدگی هسته حدود 10٪ بیشتر از مقدار استاتیکی می‌باشد. براساس روابط حاکم بر مسئله، منحنی نیرو برخورد برحسب زمان در شکل 4 ترسیم و با سایر نتایج تحلیلی و تجربی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از روش حاضر به نتایج تست تجربی نزدیکتر است. ماکزیمم بار بدست آمده از روش حاضر حدود 0.8 درصد کمتر از نتایج تجربی مرجع [3] می‌باشد. در حالیکه این اختلاف حدود 5 درصد برای مرجع [14] و حدود 8 درصد برای مرجع [7] می‌باشد. نتایج بدست آمده برای سه نوع سرعت مختلف مطالعه و در جدول 4 نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از روش حاضر تطابق خوبی به نسبت سایر مراجع با مرجع تجربی [3] دارد. اما بنظر می‌رسد با توجه به شیوه حل مسائل تحلیلی در سرعتهای بالاتر اختلاف بین نتایج تجربی و تحلیلی اندکی افزایش می‌یابد.

جدول 1 مشخصات مکانیکی لایه آلیاژ آلومینیوم [13]

Table 1 Mechanical properties of Al layer(2024-T3) [13]	
Mechanical properties	
$E = 72.4$ GPa (Elastic modulus)	
$G = 27.6$ GPa (shear modulus)	
$\nu = 33$ (Poisson's ratio)	
$\rho = 2780$ kg/m <sup>3</sup> (density)	

با جایگذاری معادله (38) در معادله (34) فرکانس های طبیعی سیستم به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{[m_i(k^* + K_g) - k^* m_s] \pm [(m_i(k^* + K_g) - k^* m_s) - 4m_i m_s k^* K_g]^{0.5}}{2m_i m_s} \quad (39)$$

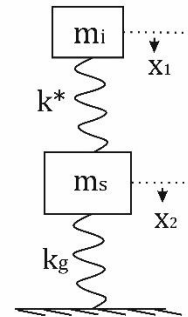


Fig. 3 Two-degree-of-freedom model

شکل 3 مدل دو درجه آزادی

شکل مود نیز بصورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \left( \frac{A_1}{A_2} \right)_1 &= \frac{k^*}{k^* - m_i \omega_1^2} = \Phi_0^1 = \begin{pmatrix} \Phi_0^1 \\ 1 \end{pmatrix}_1, \left( \frac{A_1}{A_2} \right)_2 \\ &= \frac{k^*}{k^* - m_i \omega_2^2} = \Phi_0^2 = \begin{pmatrix} \Phi_0^2 \\ 1 \end{pmatrix}_2 \end{aligned} \quad (40)$$

$\Phi_0^1$  و  $\Phi_0^2$  بترتیب شکل مود اول و دوم سیستم می‌باشند. در اینصورت معادله حرکت سیستم جرم و فنر دو درجه آزادی به شرح ذیل می‌باشد:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = C_1 \begin{pmatrix} \Phi_0^1 \\ 1 \end{pmatrix}_1 \sin(\omega_1 t + \psi_1) + C_2 \begin{pmatrix} \Phi_0^2 \\ 1 \end{pmatrix}_2 \sin(\omega_2 t + \psi_2) \quad (41)$$

با توجه به عدم وجود میرا کننده در سیستم خواهیم داشت:

$$\psi_1 = \psi_2 = 0 \quad (42)$$

با اعمال شرایط مرزی ضرائب مجهول  $C_i, i = 1, 2$  بدست می‌آید. در نتیجه تاریخچه نیروی برخورد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F(t) = k^*(x_2 - x_1) = k^*(C_1 \Phi_0^1 \sin(\omega_1 t) + C_2 \Phi_0^2 \sin(\omega_2 t)) \quad (43)$$

برای دستیابی به ماکزیمم نیروی تماسی ابتدا از معادله (43) نسبت به زمان مشتق گیری می‌شود:

$$\frac{dF(t)}{dt} = \omega_1 C_1 (\Phi_0^1 - 1) \cos(\omega_1 t^*) + C_2 \omega_2 (\Phi_0^2 - 1) \cos(\omega_2 t^*) = 0 \quad (44)$$

سپس با جایگذاری زمان تماس بدست آمده در معادله (43)، ماکزیمم نیروی تماس بدست می‌آید. در پیوست  $K_{CS}$  همان  $k^*$  است. در اینصورت دستیابی به ماکزیمم نیروی برخورد پارامتر توانی  $n$  از قانون برخورد اصلاح شده از معادله (33) به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$n = \frac{-\left[ \frac{N}{M} F_{max} + 2T \right] + F_{max} \left( \frac{N^2}{M^2} + 4T \left( \frac{1}{M} + A_{14} \right) \right)^{0.5}}{2T} \quad (45)$$

از رابطه (35) نیز سفتی تماس خطی شده بدست می‌آید. فرایند حل مسئله در پیوست نشان داده شده است. بر اساس همین فلوجارت، در نرم‌افزار

جدول 2 مشخصات ورق کامپوزیتی و ضربه زننده [7]

Table 2 Material and geometrical properties of composite sandwich plates and the impactor [7]

Face sheet	Core
$a \times a = 178 \times 178 \text{ mm}^2$	$\rho_c = 64 \text{ kg/m}^3$ (density)
$h_k = 0.0635 \text{ mm}$ (ply thickness)	$d = 3.2 \text{ mm}$ (cell diameter)
$\rho_f = 1632 \text{ kg/m}^3$ (mass density)	$h_c = 12.7 \text{ mm}$ (core thickness)
Ply stiffness	$q = 3.83 \text{ MPa}$ (crushing resistance)
$E_{11} = 144.8 \text{ GPa}$ (longitudinal stiffness)	$D = 25.4 \text{ mm}$ (diameter)
$E_{22} = 9.7 \text{ GPa}$ (ltransverse stiffness)	$L = 660 \text{ mm}$ (length)
$G_{-12} = 7.1 \text{ GPa}$ (in - plane shear modulus)	$M_0 = 3.48 \text{ kg}$ (mass)
$\theta_{11} = 0.3$ (Poisson's ratio)	$V_0 = 1.42 \text{ m/s}$ (initial velocity)

جدول 3 مشخصات هسته هانی کوم [7]

Table 3 Mechanical properties of HRH/8-4.0 Nomex honeycomb [7]

Mechanical properties
$E_{11} = E_{22} = 80.4 \text{ MPa}$ (in-plane stiffness)
$E_{33} = 1.005 \text{ MPa}$ (transverse stiffness)
$G_{12} = 32.2 \text{ MPa}$ (in-plane shear modulus)
$G_{23} = 75.8 \text{ MPa}$ (out-plane shear modulus)
$G_{13} = 120.6 \text{ MPa}$ (out-plane shear modulus)
$\theta_{12} = 0.25$ (Poisson's ratio)
$\theta_{13} = 0.2$ (Poisson's ratio)
$\theta_{23} = 0.2$ (Poisson's ratio)

2-3- اثر چینمان لایه فلز الیاف در سازه هدف

در این مقاله تنها 2 لایه الیاز Al 2024-T3 با دو لایه کربن/اپوکسی بصورت متقارن جایگزین گردیده تا تأثیرات مربوط به چینمان در پاسخ ضربه سرعت پایین بررسی گردد. بدین معنی که لایه آلومینیوم مطابق با مشخصات جدول 1 با همان ضخامت بصورت مجزا، بجای لایه های [1,32]، [2,31] و [16,17] قرار گیرد. بدین ترتیب که لایه فلز ابتدا در موقعیت بالا و پایین پانل یعنی در لایه [1,32] قرار گرفته و در مرحله بعد [2,31] و سپس در نزدیکی هسته یعنی در لایه [16,17] قرار می گیرد. در شکل 5، لایه کربن/اپوکسی با لایه های آلومینیوم مطابق موارد ذکر شده جایگزین شده اند. ماکزیم نیروی تماس از 5846 نیوتن در مورد لایه های بدون الیاز آلومینیوم تا 6085.3 نیوتن با الیاز آلومینیوم تغییر می کند. بجز منحنی شماره 2 افزایش در سایر موارد حدود 0.1 درصد می باشد. در شکل مشاهده می شود که زمان مرتبط با ماکزیم نیروی تماس با اختلاف ناچیزی به سمت چپ شکل حرکت کرده در حالیکه مدت زمان تماس از 2.76 میلی ثانیه تا 2.88 میلی ثانیه افزایش می یابد. بدین ترتیب اگر لایه آلومینیومی در لایه های بیرونی سازه قرار گیرد، ضربه به لایه سفت تری برخورد می کند و در نتیجه ماکزیم نیروی تماس افزایش می یابد. همانطور که در شکل مشاهده می گردد مشابه آنچه که در مرجع [13] در خصوص ورق های فلز-الیاف گزارش شده در این وضعیت سازه ضربه بیشتری را در مقایسه با سایر موقعیت های لایه آلومینیوم تجربه می کند.

3-3- اثر جرم و سرعت ضربه زننده در یک سطح انرژی ثابت

در اینجا اثر جرم و سرعت های مختلف ضربه زننده در یک سطح انرژی ثابت بررسی می شود. بدین صورت که جرم و سرعت ضربه زننده بصورت  $m = 3.48 \text{ kg}, v = 1.42 \text{ m/s}$  و  $m = 6.96 \text{ kg}, v = 1.0 \text{ m/s}$  در نظر گرفته می شود. کلیه موارد ذکر شده در سطح انرژی تا 3.51 J می باشند.

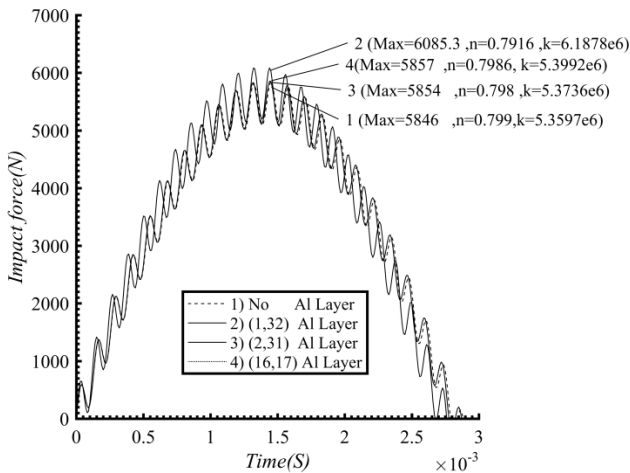


Fig. 5 Effect of the layer sequence of the Al layer on contact force history

شکل 5 اثر چینمان لایه الیاز آلومینیوم بر تاریخچه نیرو تماس

دیگر خواص مطابق جدول های 2 و 3 می باشند. شکل 6 نشان می دهد در یک سطح انرژی ثابت، اگر لایه های آلومینیوم در سازه قرار گیرند (منحنی 1 تا 3) نسبت به شرایطی که در مسئله ورق آلومینیوم وجود ندارد (منحنی 4 تا 6)، ماکزیم نیروی تماس حدود 2 درصد افزایش می یابد در حالیکه مدت زمان تماس کاهش می یابد و بدین معنی که وجود لایه فلز باعث شده

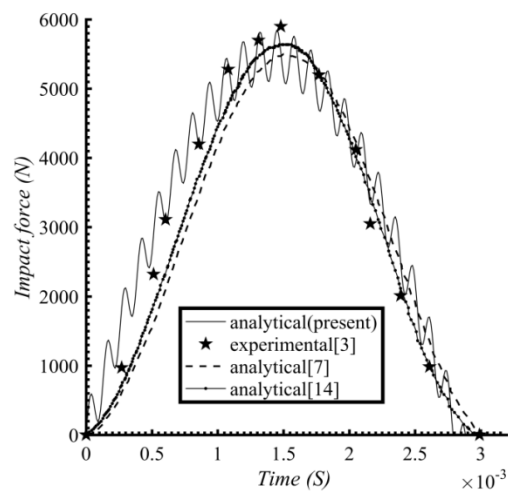


Fig.4 Contact force vs. time for simply supported Composite – sandwich impacted by 25.4mm diameter cylinder.

شکل 4 منحنی نیروی تماس براساس زمان برای سازه ساندویچی – کامپوزیتی با تکیه گاه ساده تحت ضربه ضربه زننده استوانه ای با قطر 25.4mm

ورق از  $\frac{h_c}{h} = 0.3, 0.7, 0.8$ ، مقادیر ماکزیمم نیروی برخورد در شرایط قرارگیری لایه آلومینیوم در لایه اول سازه حدود 4 درصد و در لایه دوم و سوم به ترتیب حدود 3 و 1.2 درصد افزایش یافته می یابد، ولی مدت زمان تماس در کلیه موارد کاهش می یابد. با افزایش نسبت ضخامت هسته به ضخامت کل ورق ساندویچی، انعطاف پذیری سازه افزایش می یابد لذا سازه در برابر بار ضربه بواسطه افزایش در ضخامت هسته زودتر میرا می شود. این مورد تایید کننده نتایج مرجع [19] می باشد که براساس روش حل کامل معادلات ورق و با استفاده از قانون اصلاح شده هرتز انجام شده است. همچنین نسبت ضخامت هسته به ضخامت کل سازه، در معادله توانی هرتز، در افزایش پارامترهای  $k$  و  $n$  موثر می باشد و به لحاظ اینکه اثر مذکور جزء پارامترهای هندسی سازه است تاثیرش در پارامتر  $k$  به نسبت بیشتر است.

### 3-6-6 اثر وجود لایه فلز-الیاف در جابه جایی ضربه زننده و سازه هدف

برای بررسی اثر لایه آلیاژ آلومینیوم در رویه پانل ساندویچی بر جابه جایی ضربه زننده و سازه هدف مطابق شکل 3، فرض می کنیم پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ضربه زننده و ورق ساندویچی مطابق جداول 2 و 3 باشند. با توجه به شکل 9 مشاهده می گردد با قرارگیری لایه فلز در بالا و پایین ورق ساندویچی، میزان حداکثر جابه جایی ضربه زننده حدود 3.06 درصد افزایش یافته در حالیکه جابه جایی سازه هدف حدود 2.6 درصد کاهش می یابد.

حرکت سازه سریعتر میرا شود. مشابه آنچه که در مراجع [13]، [18] و [17] در سطح انرژی متغیر ضربه مطرح گردیده در وضعیت سطح انرژی ثابت و در مقایسه با جرم ضربه زننده نیز، سرعت ضربه زننده پارامتر موثرتری در ماکزیمم نیروی تماس می باشد.

### 3-4-4 اثر ابعاد ورق ساندویچی در پاسخ ضربه

اثرات افزایش پارامتر ابعادی ورق کامپوزیتی-ساندویچی با وجود لایه فلز و الیاف و بدون وجود لایه فلز در شکل 7 بررسی شده است. کلیه خواص مطابق جداول 2 و 3 می باشد. به عنوان نتیجه، با افزایش ابعاد ورق در هر دو حالت مذکور، ماکزیمم نیروی برخورد کاهش می یابد در حالیکه مدت زمان تماس افزایش می یابد. بدین علت که با افزایش ابعاد ورق، فاصله تکیه گاهها از یکدیگر افزایش یافته و اثرات کمتری در پاسخ سازه به ضربه خواهند داشت. همچنین مشاهده می گردد که اثرات وجود لایه فلز آلومینیوم باعث شده پارامتر توانی  $n$  از 0.9 درصد برای ورق مربعی به ابعاد  $200 \text{ mm}^2$  به 0.4 درصد برای ورق مربعی با ابعاد  $400 \text{ mm}^2$  کاهش یابد. در نتیجه با افزایش ابعاد ورق، اثرات مثبت ورق آلومینیوم کاهش می یابد.

### 3-5-5 اثر ضخامت هسته به ضخامت کل سازه بر روی پاسخ ضربه

با توجه به ثابت فرض کردن ابعاد ورق، اثر ضخامت هسته به ضخامت کل ورق برای حالت ورق ساندویچی با رویه فلز-الیاف در شکل 8 ترسیم شده است. بنظر می رسد با افزایش مقادیر نسبت های ضخامت هسته به ضخامت

جدول 4 حداکثر نیروی ضربه برای ورق کامپوزیتی در سرعت های مختلف

Impact velocity (m/s)	Maximum impact force (kN)				% discrepancy with the results in Ref. [3]		
	[3]	Present model	[14]	[7]	Present model	[14]	[7]
1.42	5.9	5.85	5.6	5.4	-0.8	-5	-8
1.5	6.4	6.17	5.9	5.7	-3.5	-8	-11
1.59	6.9	6.54	6.3	6.1	-5.2	-9	-12

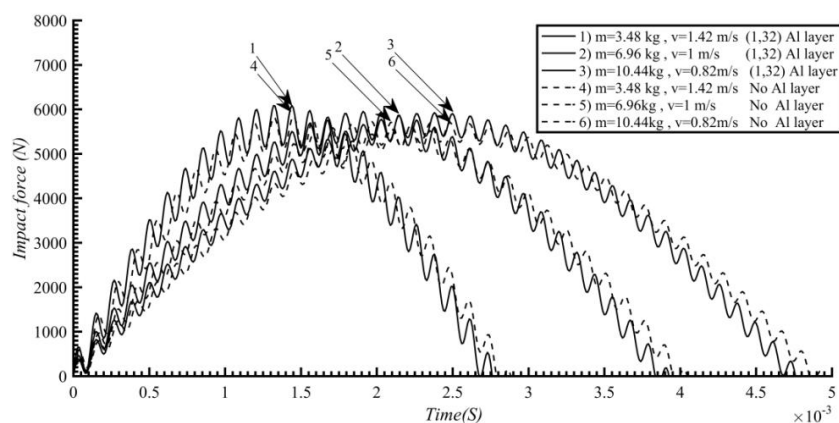


Fig. 6 Effect of various mass and velocity of impactor in constant energy level on contact force history

شکل 6 اثر جرم و سرعت مختلف ضربه زننده در یک سطح انرژی ثابت بر روی تاریخچه نیرو ضربه



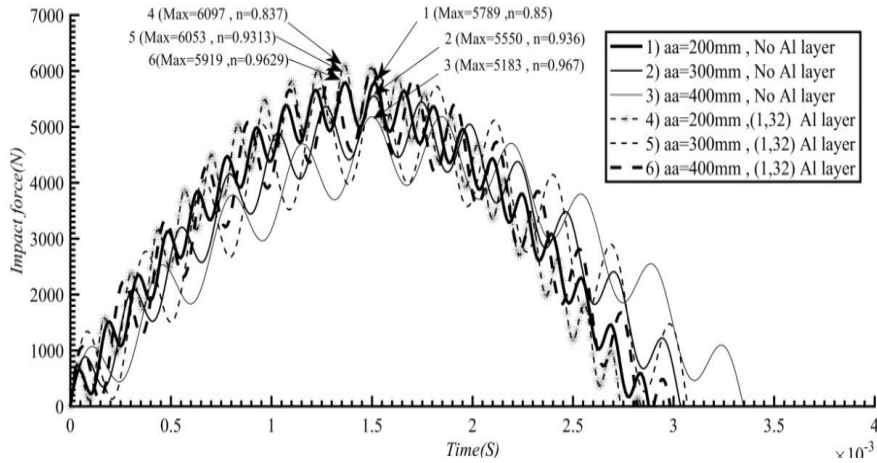


Fig. 7 The effect of sandwich plate dimensions on impact force history

شکل 7 اثرات ابعاد ورق ساندویچی با در تاریخچه نیرو ضربه

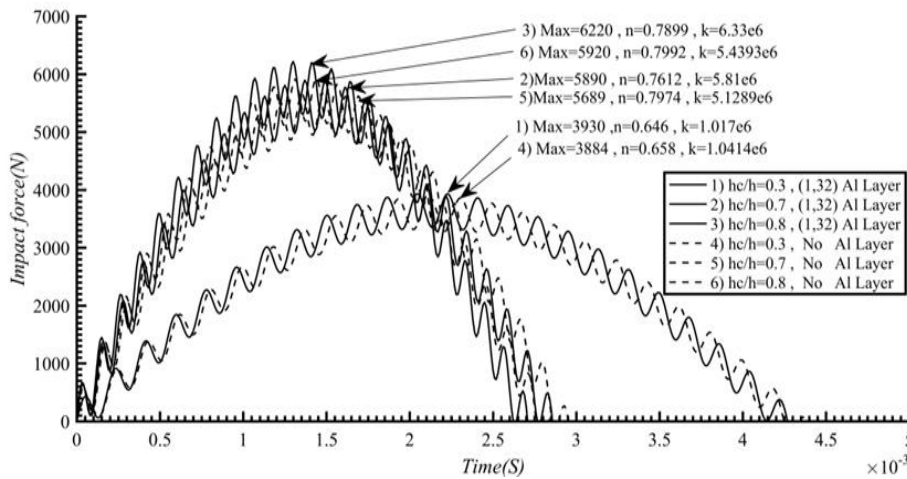


Fig. 8 Effect of the core thickness to panel thickness ratio on contact force history

شکل 8 اثر نسبت ضخامت هسته به ضخامت کل پانل بر روی تاریخچه نیروی تماس

7-3- اثر ضخامت رویه در قانون تماس اصلاح شده

در اینجا به بررسی اثرات چهار نوع چیدمان مختلف برای رویه، بدون در نظر گرفتن تک لایه الیاز آلومینیوم، در قانون اصلاح شده تماس مطرح شده در این مقاله پرداخته می شود. چهار چیدمان به صورت  $A: [0_3, 90_3, 0_3]$ ،  $B: [0_4, 90_4, 0_4]$ ،  $C: [0_5, 90_5, 0_5]$  و  $D: [0_6, 90_6, 0_6]$  در نظر گرفته شده است. مشخصات ضربه زننده و سازه هدف مطابق جداول 2 و 3 می باشد. با توجه به نوع لایه چینی ضرائب توان و سفتی برخورد برای 4 لایه مذکور به صورت ذیل تحت قانون برخورد اصلاح شده بیان می شود:

$$A: [F = 4.695 \times 10^6 \times \alpha^{0.8346}]$$

$$B: [F = 4.917 \times 10^6 \times \alpha^{0.8263}]$$

$$C: [F = 5.073 \times 10^6 \times \alpha^{0.8157}]$$

$$D: [F = 5.1859 \times 10^6 \times \alpha^{0.8204}]$$

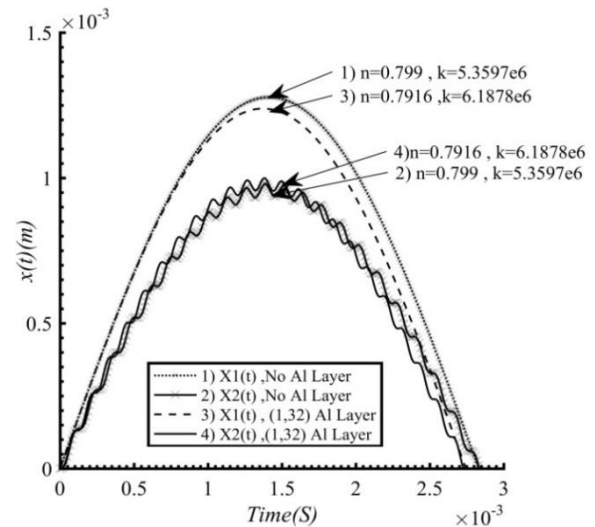


Fig. 9 Effect of the Al layer on displacement of impactor and sandwich panel.

شکل 9 اثر وجود لایه فلز آلومینیوم بر جابه جایی ضربه زننده و سازه هدف

های ساندویچی با تکرار تا همگرایی وجود داشته و مطابق نتایج تجربی مقادیر مرتبط با پارامترهای تماس ( $n$  و  $k$ ) با دقت مناسب تعیین می‌شوند. نتایج حاصله از این روش جدید با سایر نتایج تجربی و تحلیلی مقایسه شده است که از تطابق خوبی برخوردار است.

در این مقاله با توجه به اهمیت وجود لایه فلز-الیاف در پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی به بررسی برخی از اثرات مهم این فاکتور پرداخته شده که به شرح ذیل می‌باشد: استفاده از ورق های فلز-الیاف در داخل ورقهای ساندویچی- کامپوزیتی رفتار کلی سازه را بهبود می بخشد. بر اثر وجود چنین لایه هایی برخورد ناشی از ضربه سرعت پایین کاهش یافته و سازه هدف ضربه ضعیف تری را دریافت می کند. قرارگیری لایه فلز در سازه هدف بطور کلی در ماکزیمم نیروی برخورد، زمان تماس و زمان مرتبط با حداکثر نیروی برخورد تاثیر دارد. بدین ترتیب که اثر شوک ناشی از ضربه را تغییر می دهد. این تغییر در تمامی موارد اتفاق می افتد. موقعیت قرارگیری لایه فلز در سازه ساندویچی فاکتور مهمی برای تغییرات رفتار موضعی و کلی سازه است. اگر ورقهای آلومینیوم نزدیک لایه تحت ضربه قرار گیرند به مقاومت در برابر ضربه بهبود می بخشد. در این وضعیت نیروی تماس حدود 3 درصد افزایش می یابد و مدت زمان تماس نیز حدود 4 درصد افزایش خواهد یافت. یعنی ضربه به لایه سفت تری برخورد می کند. حال اگر ورقهای فلز دورتر از منطقه تحت ضربه قرار گیرند، این اثرات کاهش محسوسی یافته و حتی اثر مربوط به وجود چنین لایه ای به صفر می رسد. از نتایج بدست آمده می توان استنتاج کرد که در انرژی ثابت، افزایش مقاومت به ضربه در سازه مستقل از سرعت و جرم ضربه زننده می باشد. همچنین با کاهش ضخامت رویه ها در سازه های ساندویچی منحنی تغییرات ماکزیمم نیروی برخورد-فرورفتگی به حالت خطی نزدیکتر می شود و در نتیجه پارامتر توانی  $n$  در این وضعیت کاهش محسوسی دارد.

#### 5- پیوست

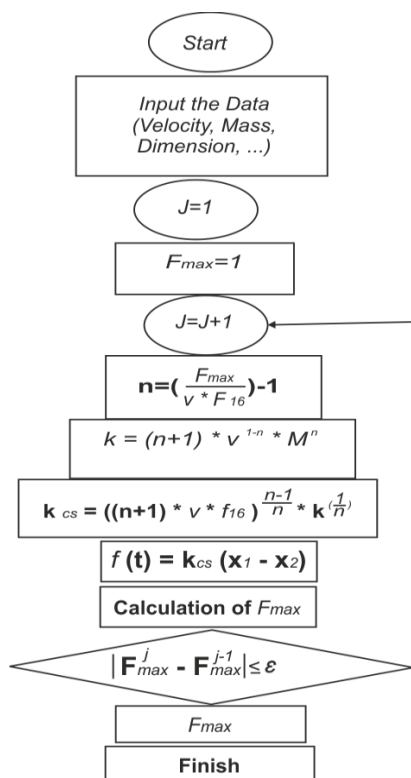


Fig. 11 The process to obtain new analytical method

شکل 11 فلوجارت محاسبه حداکثر نیروی تماس به روش تحلیلی

در شکل 10 منحنی مرتبط با قانون برخورد اصلاح شده ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می گردد در شرایطی که ضخامت رویه افزایش می یابد مقادیر  $k$  حدود 9 درصد افزایش یافته در حالیکه مقادیر  $n$  حدود 2.2 درصد کاهش می یابد.

همچنین مشابه با آنچه که در مرجع [20]، در خصوص روابط قانون تماس در ورق های کامپوزیتی مطرح گردیده، در مورد ورق های ساندویچی نیز با کاهش ضخامت رویه در سازه هدف تغییرات نیرو-فرورفتگی به حالت خطی نزدیکتر می شوند. همچنین طبق جدول 5 و براساس داده های بدست آمده از قانون برخورد اصلاح شده برای هر چهار نوع لایه، با افزایش ضخامت رویه ها، میزان ماکزیمم فرورفتگی کاهش می یابد بدین صورت که ورق های ضخیم تر دارای کمترین فرورفتگی هستند.

جدول 5 اثر ضخامت رویه بر قانون اصلاح شده

Table 5 Effect of laminate thickness on the modified contact laws

Lamination	$k$	$n$	$F_{max}(N)$	$\alpha_{max}(m)$
A: $[0_3, 90_3, 0_3]$	$4.695 \times 10^6$	0.8346	4977.9	$2.7277 \times 10^{-4}$
B: $[0_4, 90_4, 0_4]$	$4.917 \times 10^6$	0.8263	5218.8	$2.5165 \times 10^{-4}$
C: $[0_5, 90_5, 0_5]$	$5.073 \times 10^6$	0.8204	5385.4	$2.3711 \times 10^{-4}$
D: $[0_6, 90_6, 0_6]$	$5.1859 \times 10^6$	0.8157	5510.3	$2.2623 \times 10^{-4}$

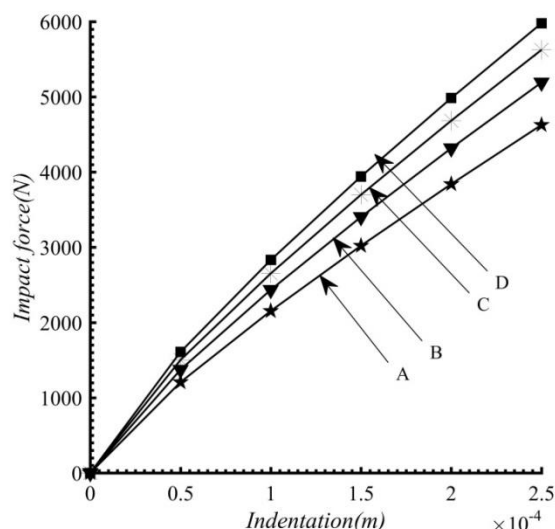


Fig. 10 Contact force and indentation relation of  $(0_i, 90_i, 0_i)$  for  $i = 3; 6$  Fiber-Metal Laminated Panel subjected to low velocity impact

شکل 10 رابطه نیرو-فرورفتگی برای چیدمان  $(0_i, 90_i, 0_i)$  در سازه ساندویچی با لایه الیاف-فلز تحت ضربه سرعت پایین

#### 4- نتیجه گیری

در این مقاله اثر برخورد ضربه با سرعت پایین در ورق های ساندویچی با رویه فلز-الیاف با استفاده از روش جدید تحلیلی و به کارگیری از فرض غیرخطی بودن تماس بین ضربه زننده و سازه هدف بررسی شده است، با استفاده از اصل انرژی پتانسیل مینیمم و نهایتاً استفاده از مدل جرم و فنر دو درجه آزادی روابط مناسبی برای تعیین ضرایب نیروی تماس غیر خطی بدست می آید. با کمک این روش، امکان حل تحلیلی مسئله ضربه با سرعت پایین بر روی ورق

## 6-مراجع

- [1] Volt, A., "Impact Lading on Fiber Metal Laminates" *Journal Impact Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 291-307, 1996.
- [2] Abrate, S., "Impact on Laminated Composite Materials" *Applied Mechanics*, Vol. 44, pp. 155-190, 1991.
- [3] Williamson, JE. Lagace, PA., "Response Mechanism in the Impact of Graphite/Epoxy Honeycomb Sandwich Panels" In: *Proceeding of the Eighth ASC Technical Conference*, Claveland, OH, pp. 287-297, 1993.
- [4] Ambour, D. R. and Cruz, J. R., "Low-Speed Impact Response Characteristics of Composite Sandwich Panels," *AIAA-95-1460-CP*, pp. 2681-2695, 1995.
- [5] Pierson M. O. and Vaziri, R., "Analytical Solution for Low-Velocity Impact Response of Composite Plates" *AIAA*, Vol. 8, pp. 1633-1640, 1996.
- [6] Olsson, R., "Mass Criterion Wave Controlled Impact Sponse of Composite Plates" *Composite, Part A*, Vol. 31, pp. 879-887, 2000.
- [7] Hoo Fatt M. S and Park, K. S., "Dynamic Models for Low-Velocity Impact Damage of Composite Sandwich Panels-Part A: Deformation" *Composite Structure*, Vol. 52, pp. 335-351, 2001.
- [8] Choi I. H. and Lim, C. H., "Low Velocity Impact Analysis of Composite Laminates using Linearized Contact Law" *Composite structures*, Vol. 66, pp. 125-132, 2004.
- [9] Caprino, G. A. Spataro, G., "Low-Velocity Impact Behaviour of Fibreglass–Aluminium Laminates" *Composites: Part A*, Vol. 35, pp. 605-616, 2004.
- [10] Chai, G. B. and Zhu, S., "A Review of Low-Velocity Impact on Sandwich Structures, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer" *Materials Design and Applications Part L*, pp. 207-225, 2011.
- [11] Abdulla, M. R. Cantwell, W. J., "The Impact Resistance of Polypropylene-Based Fibre–Metal Laminates" *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 1682-1693, 2006.
- [12] Numerical Modeling of the Impact Response of Fiber-Metal Laminates, Department of Engineering, University of Liverpool, Brownlow Street, Liverpool L69 3GQ, UK, *Polymer Composite*, 2008.
- [13] Payeganeh, G. H. Ghasemi, F. A. Malekzadeh K., " Dynamic Response of Fiber Metal Laminates (FMLs) Subjected to Low-Velocity Impact" *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 62-70, 2010.
- [14] Hossini, M. Khalili, M. R. and Malekzadeh, K., "Indentation Analysis of In-Plane Prestress Composite Sandwich Plates: An Improved Contact Law" *Key Engineering Materials*, Vols. 471-472, pp. 1159-1164, 2011.
- [15] Shokrieh, M. M. Fakhar, M. N., "Experimental, Analytical and Numerical Studies of Composite-Sandwich Panels Under Low Velocity Ompact Loading" *Mech compos Mater*, Vol. 47, No. 6, pp. 643-658, 2012.
- [16] Morinière, F.D. Alderliesten, R. C. Sadighi, M. Benedictus, R., " An Integrated Study on the Low-Velocity Impact Response of the GLARE Fibre-Metal Laminate" *Composite Structures*, Vol. 100, pp. 89-103, 2013.
- [17] Guo-Cai, Yu. Lin-Zhi, Wu. Li, Ma. Jian, Xiong., "Low Velocity Impact of Carbon Fiber Aluminum Laminates" *Composite structure*, Vol. 119, pp. 757-766, 2015.
- [18] Sun, C. T. Chen, J. K., "On the Impact of Inially Stressed Composite Laminates" *journal of composite materials*, Vol. 19, pp. 490-503, 1985.
- [19] Malekzadeh, K. Khalili, M. R. Olsson, R. and Jafari, A., "Higher-Order Dynamic Response of Composite Sandwich Panels with Flexible Core under Simultaneous Low-Velocity Impacts of Multiple Small Masses" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 6667-6687, 2006.
- [20] Liou, W. W., "Contact Laws of Carbon/Epoxy Laminated Composite plates" *Journal of Reinforced plastics and composites*, Vol. 16, pp. 155-66, 1997.





## کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در شناسایی و طبقه‌بندی عیوب سازه‌های ورقی کامپوزیتی با استفاده از امواج فراصوت هدایت‌شده

محمد ریاحی<sup>1\*</sup>، علیرضا احمدی<sup>2</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، مرکز آزمون‌های غیرمخرب پیشرفته، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\*riahi@iust.ac.ir، 16765-163 صندوق پستی

### چکیده

بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای کاهش نقش تفاسیر انسانی در تحلیل داده‌ها و اخذ نتایج مناسب، همراستا با افزایش سرعت، کاهش خطا و تعدیل هزینه‌ها در فرآیندهای ارزیابی غیرمخرب و پایش سلامت سازه‌ها مورد توجه جدی محققان قرار گرفته است. در این پژوهش، طراحی و اجرای یک سامانه پایش سلامت سازه‌ای مبتنی بر پردازش هوشمند سیگنال امواج فراصوت هدایت‌شده به منظور شناسایی و دسته‌بندی سه نوع خرابی متداول در سازه‌های کامپوزیتی ورقی انجام پذیرفته است. با ایجاد سه نوع خرابی شامل تورق، شکاف و سوراخ در یک ورق کامپوزیتی چندلایه از جنس پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه و تقسیم ورق به چهار ناحیه مختلف، نسبت به تعبیه 9 مبدل پیزوالکتریک با نقش دوگانه محرک و حسگر و آرایش شبکه‌ای اقدام شده و سیگنال‌های امواج منتشر شده در هر چهار ناحیه مذکور در قالب 12 مسیر در سه راستای مختلف و 240 سیگنال ذخیره گردید. در مرحله بعد، استخراج ویژگی از سیگنال‌ها با روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال نظیر تبدیل موجک انجام پذیرفته و داده‌های حاصل، برای آموزش یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه از نوع پیشرونده با روش پس‌انتشار خطا مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، الگوریتم شبکه عصبی طراحی شده و آموزش دیده در این تحقیق، قادر به ایجاد تمایز میان نواحی سالم سازه از نواحی معیوب بوده و علاوه بر آن موفق به دسته‌بندی انواع خرابی‌های موجود در سازه با بازدهی قابل قبول (میانگین حدود 80%) شده که قابلیت تعمیم به شرایط و پیکربندی‌های مختلف و حالت‌های نامعلوم را دارد.

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/3/30

پذیرش: 96/4/20

### کلیدواژگان:

شبکه‌های عصبی مصنوعی  
پایش سلامت سازه‌ای  
امواج فراصوت هدایت‌شده  
ورق‌های کامپوزیتی  
تبدیل موجک

## Utilization of artificial neural networks for detection and classification of damages in composite plate-like structures via ultrasonic guided waves

Mohammad Riahi<sup>\*</sup>, Alireza Ahmadi

University of Science and Technology of Iran, Tehran, Iran.

\* P.O.B 16765-163, Tehran, Iran, riahi@iust.ac.ir

### Keywords

Artificial neural networks  
Structural health monitoring  
Ultrasonic guided waves  
Composite plates  
Wavelet transform

### Abstract

Using methods based on artificial intelligence to reduce the role of human interpretations in data analysis and obtaining the favorable results, in line with increasing the speed, reducing the errors and adjustment of the costs in the nondestructive evaluation and structural health monitoring is seriously concerned by researchers.

In this study, the design and implementation of a structural health monitoring system is performed by the intelligent signal processing of the ultrasonic waves in order to identify and classify the three common defects in the composite plate-like structures. By creating three types of damages including delamination, crack and hole in the multi-layer composite plate made of glass fiber reinforced polymer and dividing it into 4 different zones, 9 piezoelectric transducers with dual role of actuator and sensor are attached with their network arrangement and the propagated signals in the four mentioned zones on the 12 paths in three different directions including 240 signals were stored. In the next step, extraction of the features from the signals is conducted by the advanced signal processing techniques such as wavelet transform and the findings have been used to train a neural network of advanced multilayer perceptron by back-propagation error method.

The results show that the designed and trained neural network algorithm in this research is able to differentiate between the intact zone from the damaged ones. In addition, it has classified the types of current defects and damages in the structure with the acceptable efficiency (the average is about 80%), which can be generalized to the different conditions and configurations and unknown situations.

### Please cite this article using:

Riahi, M. and Ahmadi, A., "Utilization of artificial neural networks for detection and classification of damages in composite plate-like structures via ultrasonic guided waves", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 343-352, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

کاربرد فراوان و رو به رشد انواع مواد کامپوزیتی، بالاخص ورق‌های چندلایه از نوع پلیمر تقویت شده با الیاف کربن و شیشه، به منظور ساخت سازه‌های مختلف در صنایع مهم و حساس نظیر هوافضا و سازه‌های عمرانی، واقعیتی مهم و انکار ناپذیر است. هر چند سازه‌های کامپوزیتی مزایای فراوانی دارند لیکن به هنگام رخداد خرابی، تقریباً بدون نشانه و هشدار خاصی به صورت فاجعه‌آمیزی دچار شکست می‌شوند [1].

نظر به محدودیت‌های موجود در اجرای روش‌های معمول ارزیابی غیرمخرب از قبیل لزوم دسترسی مستقیم، خارج شدن سازه از حالت عملیاتی، عدم کارایی مناسب در شناسایی برخی عیوب به خصوص در مواد کامپوزیتی به دلیل ساختار غیرهمگن، غیرهمسانگرد و پیچیده، نیاز به ابداع و توسعه روش‌های جایگزین، بیش از پیش احساس می‌شود. پیش سلامت سازه‌ای<sup>1</sup> جایگزینی جدید و خلاقانه برای ارزیابی‌های غیرمخرب است که به دلیل بهره‌گیری از مولفه‌هایی نظیر محرک‌ها، حسگرها و پردازش‌های رایانه‌ای، باعث ارتقای کیفی و افزایش اطمینان از عدم وجود خرابی در سازه شده و همچنین موجب کاهش هزینه‌ها در فرآیند نگهداری و تعمیرات می‌گردد [2-4].

از میان روش‌های مختلف طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های مبتنی بر پیش سلامت سازه‌ای، استفاده از امواج فراصوت هدایت شده<sup>2</sup> به دلیل امکان انتشار در فواصل طولانی، توانایی حرکت در مسیرهای غیرمستقیم، حساسیت به عیوب کوچک سطحی و زیرسطحی و همچنین قابلیت انتشار در موادی با خواص میرایی زیاد نظیر انواع کامپوزیت‌ها، در سال‌های اخیر به خصوص برای سازه‌های کامپوزیتی ورقی، رشد چشمگیری داشته است [5]. در این رهیافت با وجود روش‌های مختلف ارسال و دریافت امواج مذکور، استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک<sup>3</sup> به دلیل وزن سبک و قیمت مقرون به صرفه در کنار سهولت استفاده، راهکاری مناسب و در حال توسعه است [6].

در این روش سیگنال امواج فراصوت هدایت شده که در سازه، منتشر می‌گردد، در هر دو حالت سازه‌ی سالم<sup>4</sup> و سازه‌ی تحت بررسی، دریافت گردیده و مقایسه این دو سیگنال با یکدیگر می‌تواند معیاری مناسب برای وجود یا عدم وجود خرابی در سازه باشد. از آنجا که هر یک از انواع خرابی‌های محتمل در سازه، اثری یکتا بر رفتار و ویژگی‌های امواج منتشره در سازه دارد، با استخراج و مقایسه ویژگی‌های امواج، می‌توان علاوه بر شناسایی خرابی، در جهت تعیین نوع، مشخصات و حتی مکان خرابی و در نتیجه تفکیک، تمایز و دسته‌بندی خرابی‌های قابل پیش‌بینی در سازه مبادرت نمود [7].

هر چند در این حوزه، تحقیقات مختلفی که در ادامه مقاله به برخی از آنها اشاره شده در سال‌های اخیر صورت گرفته است، لیکن پژوهش‌های مبتنی بر تشخیص و دسته‌بندی انواع مختلف خرابی، خصوصاً به کمک روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی با قابلیت تعمیم به شرایط نامعلوم و پیکربندی‌های مختلف، به منظور توسعه شیوه‌های خودکار و کاهش تاثیر خطاهای ناشی از تفاسیر انسانی، کمتر مورد توجه بوده که ضرورت کاوش‌های بیشتر در این زمینه را آشکار می‌نماید. برای دسته‌بندی و تفکیک خرابی‌ها، در موقعیت‌هایی که تعریف دقیق مدل ریاضی برای آنها امکان پذیر نبوده یا دشوار می‌باشد، استفاده از شیوه‌های مبتنی بر مفهوم بازشناخت الگویی<sup>5</sup>

توسط الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>6</sup> کاربردی مناسب داشته که زیرمجموعه‌ای از دانش هوش مصنوعی محسوب می‌گردد. در این شیوه، شناسایی یک موجودیت، مانند خرابی در یک سازه بر اساس اطلاعات قبلی بدست آمده یا اطلاعات آماری حاصل شده از تعداد زیادی نمونه یا الگو صورت می‌پذیرد.

نحوه کار به این صورت است که با داشتن تعداد زیادی الگو، زمانی که وضعیت سازه‌ی تحت بررسی (بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌ها) منطبق یا نزدیک به یکی از آن الگوها باشد، حالت بدست آمده از سازه و خرابی مربوطه، به یک الگوی خاص از پیش تعیین شده، نسبت داده می‌شود که به این ترتیب بر اساس اطلاعات مربوط به الگوی مذکور، می‌توان به مشخصه‌های خرابی موجود در سازه، از جمله نوع آن پی برد [8].

در این تحقیق، ابتدا با ایجاد سه نوع خرابی متداول و تعبیه آرایه‌ای از 9 مبدل پیزوالکتریک با نقش دوگانه محرک و حسگر، ضمن طراحی 12 مسیر مختلف برای انتشار امواج فراصوت هدایت شده، سطح سازه ورقی کامپوزیتی تحت بررسی به 4 ناحیه شامل ناحیه سالم، ناحیه شامل تورق (جدایش بین لایه‌ای)، ناحیه دچار شکاف و بالاخره ناحیه دارای سوراخ تقسیم شده است.

از آنجا که هر نوع خرابی اثری منحصر به فرد بر روی ویژگی‌های سیگنال‌های عبوری از هر ناحیه دارد، با بررسی و مطالعه ویژگی‌های سیگنال امواج منتشره در سازه بین هر دو محرک و حسگر دلخواه، می‌توان مشخص نمود هر سیگنال، مربوط به عبور از کدام ناحیه و کدام نوع از انواع خرابی‌های ایجاد شده در ورق کامپوزیتی است.

بر این اساس، در ادامه تحقیق، ویژگی‌های مختلف هر سیگنال در حوزه مشترک زمان و فرکانس مبتنی بر تبدیل موجک استخراج شده که به مثابه معیاری برای تمایز میان سیگنال‌های عبوری از نواحی مختلف چهارگانه روی ورق کامپوزیتی از آنها استفاده گردید.

در مرحله آخر، با تکرار آزمایش‌ها و افزایش تعداد سیگنال‌های دریافت شده از حسگرهای مختلف تعبیه شده روی سازه، تمامی ویژگی‌های استخراجی از سیگنال‌های نواحی مذکور برای آموزش یک شبکه عصبی از نوع پرسپترون چند لایه از نوع پیش‌رونده و مبتنی بر الگوریتم پس انتشار خطا<sup>7</sup> مورد استفاده قرار گرفته است.

هدف نهایی از این تحقیق، ایجاد یک سامانه پیش سلامت سازه‌ای بر اساس امواج فراصوت هدایت شده به همراه طراحی یک الگوریتم مبتنی بر مفاهیم شبکه‌های عصبی مصنوعی بوده که قادر است با دریافت ویژگی از هر سیگنال دلخواه به عنوان ورودی الگوریتم، ضمن تشخیص خرابی در سازه (تمایز موفق سیگنال‌های عبوری از ناحیه سالم و نواحی معیوب)، اقدام به تعیین نوع خرابی بر اساس داده‌های قبلی حاصل از پردازش رایانه‌ای سیگنال‌های دریافتی از سازه ورقی کامپوزیتی نماید.

## 2- ساخت نمونه آزمایشگاهی

برای نیل به اهداف این تحقیق، نمونه آزمایشگاهی شامل یک ورق کامپوزیتی از جنس پلیمر (اپوکسی) تقویت شده با الیاف شیشه<sup>8</sup> و مشتمل بر 8 لایه پارچه بافته شده نهایتاً به شکل مربع با ابعاد 450 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر برای انجام آزمایش‌ها به روش تزریق در خلا<sup>9</sup> ساخته شد. لایه‌چینی

<sup>6</sup>Artificial Neural Networks

<sup>7</sup>Back propagation error

<sup>8</sup>GF/EP Composite Plate

<sup>9</sup>Woven

<sup>10</sup>V.I.P (Vacuum Infusion Process)

<sup>1</sup>Structural Health Monitoring

<sup>2</sup>Ultrasonic Guided Waves

<sup>3</sup>Piezoelectric

<sup>4</sup>Benchmark

<sup>5</sup>Pattern Recognition

می‌گویند. این امواج برای اولین بار توسط هوراس لمب معرفی شده لذا با نام امواج لمب<sup>۲</sup> نیز شناخته می‌شود. امواج لمب در واقع اغتشاشات الاستیکی هستند که می‌توانند در یک ورق جامد با مرزهای آزاد منتشر شوند.

در این روش، موج به درون ورق، فرستاده شده و سپس بر اساس مقایسه میان سیگنال‌های موج منتشره در ورق سالم (معیار) با ورق تحت بررسی، هرگونه تغییر در سیگنال امواج در شرایط یکسان می‌تواند بیانگر وجود خرابی در سازه باشد.

بازرسی غیرمخرب و پایش سلامت سازه‌ای به کمک امواج لمب به دلیل قابلیت انتشار این امواج در فواصل طولانی، حساسیت قابل قبول به انواع عیوب و حتی حرکت در مسیرهای غیرمستقیم، مزایای فراوانی نسبت به آزمون‌های غیرمخرب از جمله آزمون فراصوتی معمول دارد.

برای شناسایی خرابی در سازه‌ها به کمک امواج فراصوت هدایت شده، اولین و مهمترین گام، انتخاب مود و فرکانس تحریک مناسب برای ایجاد و انتشار امواج در سازه است. در کاربردهای ارزیابی غیرمخرب، معمولاً فرکانس به نحوی انتخاب می‌شود تا فقط مودهای پایه، تولید شده که به این ترتیب موجب کاهش پیچیدگی پردازش و تحلیل سیگنال‌ها و عدم تداخل مودهای مختلف گردد.

این مرحله با استخراج و ترسیم منحنی‌های پراکندگی بر اساس حل معادله ریلی- لمب انجام می‌پذیرد. رفتار موج در یک ورق نازک تک لایه به فرم تانسور کارترین با رابطه (1) به شرح ذیل تعریف می‌گردد:

$$\mu \cdot u_{i,jj} + (\lambda + \mu) \cdot u_{j,ji} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{u}_i \quad (1)$$

که در آن  $u_i$  و  $f_i$  به ترتیب تغییرمکان و نیرو در جهت  $X_i$  (محورهای مختصات) بوده در حالیکه  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی و مدول برشی ورق هستند.

در این حال داریم  $\lambda = 2\mu \cdot \nu / (1 - 2\nu)$  که  $\lambda$  ثابت لامه و  $\nu$  ضریب پواسون است. رابطه (1) پس از تجزیه به روش هلمهولتز به شکل رابطه 2 برای مودهای متقارن و رابطه (3) برای مودهای نامتقارن بدست خواهد آمد.

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = - \frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (2)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = - \frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (3)$$

که در این روابط داریم:

$$p^2 = (\omega^2 / C_L^2) - k^2 \quad q^2 = (\omega^2 / C_T^2) - k^2 \quad (4)$$

در روابط فوق،  $\omega$  فرکانس،  $C_T$  و  $C_L$  به ترتیب سرعت موج طولی و عرضی،  $k$  عدد موج و  $h$  نصف ضخامت ورق است. این روابط با تغییرات اندکی برای ورق‌های N لایه نیز در قالب رابطه 5 قابل استفاده است.

$$\mu^n \nabla^2 u^n + (\lambda^n + \mu^n) \nabla(\nabla \cdot u^n) = \rho^n \frac{\partial^2 u^n}{\partial t^2} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

در حالی که اپراتورهای  $\nabla$  و  $\nabla^2$  مطابق رابطه 6 تعریف می‌شوند [12, 14]:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \quad (6)$$

لذا با استفاده از کد نرم‌افزاری از پیش تولید شده در نرم‌افزار متلب<sup>۳</sup> اقدام به ترسیم منحنی‌های پراکندگی بر اساس خواص مکانیکی مندرج در جدول 1

طراحی شده به صورت  $[0/90/\pm 45/\pm 45/0/90]$  و شبه‌همسانگرد<sup>۱</sup> بوده که کاربرد متنوعی در صنایع مهم نظیر هوافضا دارد. به منظور ایجاد خرابی‌ها، ورق به چهار ناحیه شامل یک ناحیه سالم و سه ناحیه معیوب مشتمل بر سه نوع خرابی متداول در ورق‌های کامپوزیتی شامل تورق (جدایش بین لایه‌ای)، شکاف و سوراخ تقسیم شده و خرابیهای مذکور با جانمایی در موقعیت مکانی مشابه نسبت به مرکز و مرزهای بیرونی ورق در نمونه‌ی تحت بررسی ایجاد شد.

مطابق شکل 1 تورق با هندسه مدور و قطر 50 میلی‌متر با تعبیه دو لایه نازک تفلون با توجه به لایه‌چینی متقارن و با هدف انتشار همگن امواج در دو سوی ناحیه معیوب، در وسط ضخامت ورق (ناحیه شماره 2) ایجاد شد. ضمناً شکاف با پهنای 1 میلی‌متر و طول 40 میلی‌متر (ناحیه شماره 3) و سوراخ به قطر 8 میلی‌متر (ناحیه شماره 4) و هر دو راه به در، ایجاد گردید.

برای انجام مراحل اولیه پژوهش، خواص مکانیکی ورق در سه راستای 0، 90 و 45 درجه متناسب با جهت قرارگیری الیاف با استفاده از آزمون کشش و با نصب کرنش‌سنج‌های مناسب برای مواد کامپوزیتی بر روی 6 نمونه میله‌ای تخت مطابق استاندارد مربوطه [9] استخراج گردید.

بر اساس نتایج حاصل از این آزمون، میزان غیرهمسانگردی ورق کامپوزیتی ساخته شده، نسبت به سه جهت قرارگیری الیاف در حدود 30 درصد تعیین شد. با روشی شبیه به آنچه در مرجع [10] انجام پذیرفته، ضمن محاسبه میانگین خواص در سه راستای مذکور داده‌های نهایی در خصوص خواص مورد نیاز ورق کامپوزیتی، در جدول 1 ارائه شده است.

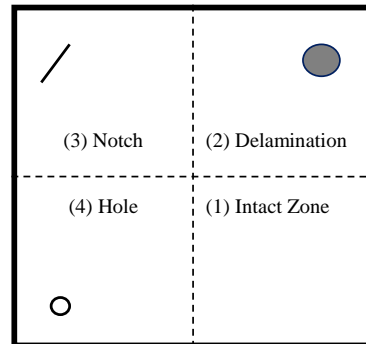


Fig1. Composite plate and damages locations

شکل 1 ورق کامپوزیتی و موقعیت خرابی‌ها روی آن

جدول 1 خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی نمونه

Table 1 Mechanical properties of composite plate

خواص مکانیکی	ورق نهایی از جنس الیاف شیشه/اپوکسی
چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	1700
مدول یانگ (GPa)	70
ضریب پواسون	0.3

### 3-انتخاب مود و فرکانس مناسب

یکی از روش‌های پرکاربرد و موثر برای ایجاد و توسعه سامانه‌های پایش سلامت سازه‌ای استفاده از امواج فراصوتی است که به سه دسته امواج حجمی، سطحی و ورقی تقسیم می‌شود. نوع آخر، قابلیت انتشار در ورق‌ها در فواصل طولانی را داشته و مرزهای آزاد ورق، امواج را در مسیر مرزها هدایت می‌کنند. به همین دلیل به این امواج، اصطلاحاً امواج فراصوت هدایت شده

<sup>۲</sup>Lamb Waves

<sup>۳</sup>MATLAB

<sup>۱</sup>Quasi-Isotropic

همانطور که در شکل 4 مشاهده می‌گردد، برای ایجاد پالس مناسب جهت تحریک مبدل‌های پیزوالکتریک در این آزمایش از یک دستگاه مولد موج<sup>2</sup> از نوع RIGOL DG 1022 و همچنین برای دریافت و ذخیره‌سازی سیگنال‌های دریافتی از هر حسگر پیزوالکتریک، از یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال با پهنای باند 40 مگاهرتز، نرخ نمونه برداری یک گیگاسمیل بر ثانیه، مجهز به دو کانال از نوع TEKTRONIX TDS1012C-SC استفاده گردید که این تجهیزات با استفاده از کدنویسی و تولید نرم افزار در محیط لیبویو<sup>3</sup> برای کنترل و انجام دقیق آزمایش، برنامه ریزی شد.

بر اساس حل معادلات امواج فراصوت هدایت شده برای ورق با مشخصات و خواص مکانیکی مذکور، مطابق نمودارهای پراکندگی ترسیم شده، در محدوده فرکانسی 200 کیلوهرتز، تنها دو مود پایه متقارن و نامتقارن تولید شده و سایر مودها در این محدوده فرکانسی ایجاد نمی‌گردد. باید توجه داشت در کاربردهای امواج لمب در حوزه ارزیابی غیرمخرب و شناسایی خرابی در سازه‌های مختلف، باید فرکانس تحریک به نحوی انتخاب گردد تا ضمن آنکه نصف طول موج از اندازه خرابی کوچکتر باشد، فرکانس قطع<sup>4</sup> در محدوده‌ای قرار گیرد تا تعداد حداقلی (فقط مودهای پایه) از مودهای ممکن ایجاد گردد [14]. چنانچه محدوده فرکانسی به گونه‌ای باشد که بیش از دو مود پایه ایجاد شود، اغلب به دلیل تداخل و اثرات متقابل مودهای مختلف و پیچیده شدن پردازش سیگنال‌ها، فرآیند شناسایی خرابی با دشواری مواجه می‌گردد، مگر آنکه از برخی روش‌های تکمیلی دیگر برای رفع پیچیدگی مساله استفاده گردد. بر این اساس و با توجه به مشخصات مبدل‌های پیزوالکتریک موجود، برای ایجاد پالس تحریک و تولید امواج لمب در سازه، از تک پالس سینوسی با فرکانس 200 کیلوهرتز و دامنه 20 ولت (نقطه به نقطه) استفاده شد که بیشترین مقدار دامنه را برای امواج خروجی بر روی صفحه اسیلوسکوپ ایجاد می‌نمود. شکل موج سینوسی به دلیل دوره‌ای بودن و رفتار ملایم و همچنین رسیدن به میزان حداکثر دامنه در زمانی کوتاه، انتخابی مناسب برای ایجاد موج تحریک می‌باشد.

نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافتی از سازه مربوط به مقایسه انتشار امواج در دو مسیر مقایسه‌ای مرتبط با ناحیه دچار شکاف به صورت تجمیعی و در حالی که دامنه سیگنال‌ها در بازه [1,1-] نرمال شده، در شکل 5 قابل مشاهده است.

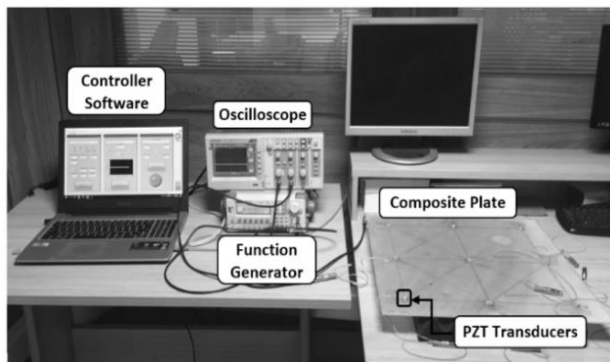


Fig4. Configuration of designed and deployed SHM system

شکل 4 پیکربندی سامانه پایش سلامت سازه‌ای طراحی و اجرا شده

گردید. در شکل 2 نمودار پراکندگی مربوط به سرعت گروه امواج منتشره در ورق تحت بررسی قابل مشاهده است.

#### 4-طراحی و پیکربندی آزمایش

برای انجام آزمایش‌های لازم در پژوهش حاضر، مطابق با شکل 3 اقدام به نصب و چسباندن 9 عدد مبدل پیزوالکتریک به قطر 10 و ضخامت 2 میلی‌متر با فرکانس مرکزی 200 کیلوهرتز و نقش دوگانه محرک/حسگر در نواحی چهارگانه طراحی شده روی ورق شد که نهایتاً با تعویض نقش محرک و حسگر به ازای هر مبدل پیزوالکتریک در 40 مسیر مختلف اقدام به انتشار و دریافت امواج فراصوت هدایت شده در ورق کامپوزیتی گردید.

موضوع مهم در این تحقیق، عدم تمایز نمونه سالم از نمونه معیوب می‌باشد که ذیل مفهوم بازرسی آنی<sup>1</sup> بوده و در مرجع [13] به تفصیل درباره آن توضیح داده شده است. در این روش به جای مرجع قرار دادن یک نمونه سالم از سازه و مقایسه جداگانه سازه تحت بررسی با آن، ضمن ایجاد مسیرهای انتشار امواج در جهات مختلف روی یک سازه واحد و مقایسه آن مسیرها با هم، سلامت سازه طی یک فرآیند ارزیابی غیرمخرب بررسی می‌شود. از مزایای مهم این روش می‌توان به یکسان بودن چگونگی و فرآیند ساخت نمونه در حال بررسی، شرایط محیطی و مقتضیات آزمایشگاهی اشاره نمود.

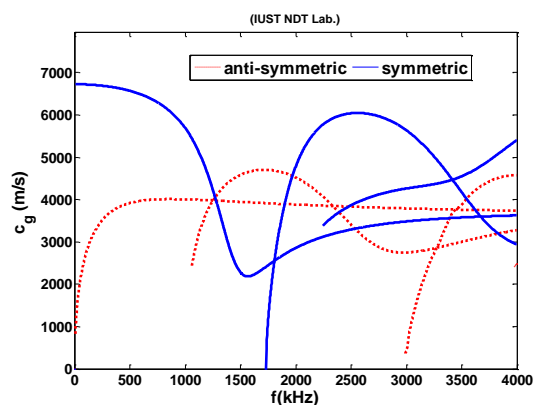


Fig2. Dispersion curves of Lamb waves related to group velocity

شکل 2 منحنی پراکندگی امواج لمب مرتبط با سرعت گروه

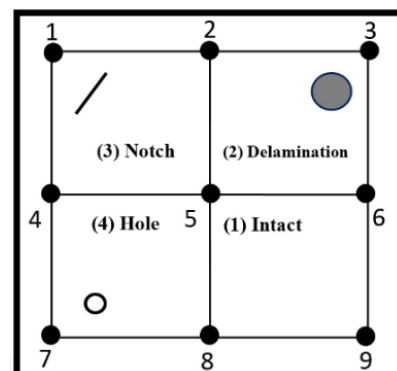


Fig3. Piezoelectric transducers arrangement and 40 propagation paths

شکل 3 چیدمان مبدل‌های پیزوالکتریک و 40 مسیر انتشار امواج

<sup>2</sup> Function generator

<sup>3</sup>LabVIEW

<sup>4</sup>Cutoff frequency

<sup>1</sup>Instantaneous inspection



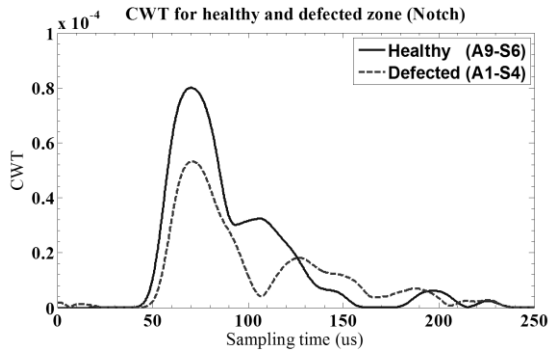


Fig6. Comparison of signals in zones 1 & 3 via wavelet transform

شکل 6 مقایسه سیگنال‌های نواحی 1 و 3 در فضای تبدیل موجک

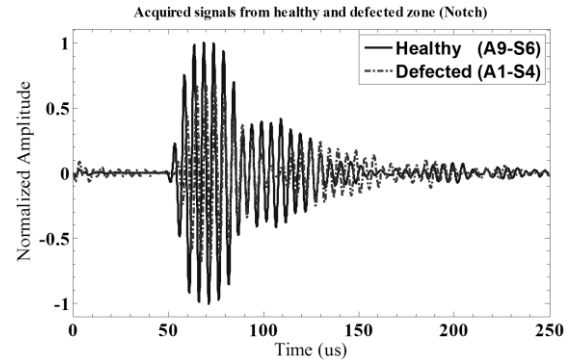


Fig5. Comparison of signals in zone 3 (notch) and Zone 1 (intact)

شکل 5 مقایسه سیگنال‌های ناحیه 3 (شکاف) و ناحیه 1 (سالم)

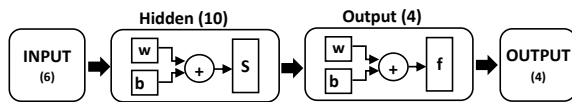


Fig7. Architecture & structure of designed ANN

شکل 7 معماری و ساختار شبکه عصبی طراحی شده

بدیهی است تعداد نرون‌های لایه خروجی برابر خروجی‌های شبکه عصبی بوده که معادل تعداد کلاس‌هایی است که سیگنال‌ها در آن کلاس‌ها (متناظر با نواحی چهارگانه روی ورق کامپوزیتی) طبقه‌بندی می‌شوند.

۳. پارامترهای اساسی شبکه عصبی بر اساس مقتضیات مساله به شرح موارد ذیل طراحی و تعیین گردید.

- از تابع پترننت<sup>۳</sup> برای تعیین نوع کارکرد و وظایف مورد انتظار شبکه عصبی (طبقه‌بندی داده‌ها) در این مساله استفاده شد.
- روش اصلاح وزن‌ها در این طراحی، از نوع پس‌انتشار خطا انتخاب گردید.
- تابع فعال‌سازی برای لایه پنهان شبکه عصبی از نوع سیگموئید<sup>۴</sup> تعیین شد.

۴. از میان توابع موجود در نرم افزار متلب با توجه به تنوع توابع آموزش شبکه عصبی از تابع تری‌ن‌اس.سی.جی<sup>۵</sup> برای الگوریتم آموزش استفاده شد که دارای بهترین عملکرد بود.

۵. با توجه به تنوع توابع تعیین معیار کارایی از تابع کراس-انترپوی<sup>۶</sup> برای تعیین کارایی و استخراج میزان خطای شبکه عصبی مرتبط با تابع آموزش انتخاب شده، استفاده گردید.

در ادامه تحقیق، برای آموزش شبکه عصبی طراحی شده، ابتدا آزمایش و دریافت سیگنال مرتبط با هر یک از مسیرهای انتخابی (محرک/حسگر) و تکرار آن برای 20 مرتبه انجام پذیرفت که به این ترتیب برای 4 ناحیه، هر ناحیه 3 مسیر و برای هر مسیر 20 سیگنال دریافت و ذخیره شد.

در نتیجه برای آموزش و آزمایش شبکه عصبی مجموعاً 240 سیگنال ذخیره شده و مورد استفاده قرار گرفت. نمایش مسیر انتشار هر یک از سیگنال‌های اصلی (12 مسیر منتخب به صورت تصادفی) شامل پیکان‌های سه‌گانه متمایز شده در هر یک از چهار ناحیه روی ورق در شکل 8 قابل مشاهده می‌باشد که جزئیات و نام این مسیرها در جدول 2 ذکر شده است. برای تامین ورودی‌های اصلی شبکه عصبی با کدنویسی در نرم‌افزار متلب اقدام به پردازش

همانطور که ملاحظه می‌گردد، حضور خرابی در سازه موجب شده است، سیگنال عبوری از ناحیه دچار شکاف، در مقایسه با سیگنال عبوری از ناحیه سالم (در مسیر مشابه) دچار افت محسوس دامنه در مولفه اول (اصلی) شود. با اعمال تبدیل موجک بر روی سیگنال‌های تحت بررسی و استخراج ضرایب موجک (دقیقاً متناظر با فرکانس تحریک) می‌توان وضعیت طیف انرژی سیگنال‌ها (متناسب با ضرایب موجک) را نیز بررسی نمود که در شکل 6 افت انرژی سیگنال در حضور خرابی از نوع شکاف برای مولفه‌های مختلف و به خصوص برای مولفه اول، بخوبی مشهود بوده که در صورت لزوم نسبت این کاهش برای طراحی شاخص خرابی قابل محاسبه است [15].

### 5-طراحی و آموزش شبکه عصبی

مراحل اصلی در فرآیند پایش سلامت سازه‌ای توسط امواج فراصوت هدایت شده و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی را می‌توان در قالب موارد زیر به طور خلاصه بیان نمود [16,17]:

- استخراج ویژگی از سیگنال‌های امواج به کمک روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال از جمله تبدیل موجک
  - ایجاد اثرانگشت دیجیتال برای هر نوع از خرابی یا هر شدت از یک نوع خرابی (اثر منحصر به فرد هر خرابی روی امواج منتشره در سازه)
  - کنار هم قرار دادن داده‌های حاصل از مرحله قبل و ایجاد بانک اطلاعاتی از مشخصات خرابی
  - طراحی و آموزش شبکه عصبی توسط رکوردهای بانک اطلاعاتی بدست آمده در مرحله قبل
  - استخراج داده‌های دریافتی از الگوریتم شبکه عصبی، مقایسه آن با داده‌های واقعی و تعیین بازدهی شبکه عصبی
- بر این اساس در تحقیق حاضر، ابتدا طراحی شبکه عصبی در پنج مرحله به شرح ذیل انجام شد:

۱. معماری شبکه عصبی انتخاب شده در این تحقیق با توجه به مقتضیات مساله از نوع پرسپترون چندلایه<sup>۱</sup> و پیش‌خور<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده و طراحی گردید [18].
۲. شبکه عصبی طراحی شده دارای 6 ورودی اولیه (ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌ها)، یک لایه پنهان شامل 10 نرون و یک لایه خروجی شامل 4 نرون می‌باشد که در شکل 7 معماری و ساختار آن به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

<sup>۳</sup>Pattrennet Function

<sup>۴</sup>Sigmoid

<sup>۵</sup>TrainS.C.G

<sup>۶</sup>Cross-Entropy

<sup>۱</sup>Multi-Layer Perceptron

<sup>۲</sup>Feed-Forward

جدول 3 توزیع سیگنال‌ها در مراحل مختلف اجرای الگوریتم

Table 3 Distribution of signals in ANN training process

نام مرحله	تعداد سیگنالها	سهم از کل (درصد)
آموزش	168	70
اعتبارسنجی	36	15
آزمایش	36	15

پس از اجرای الگوریتم بر اساس طراحی انجام شده، مطابق شکل 9 بنا بر شروط در نظر گرفته شده در الگوریتم، باید فرآیند آموزش شبکه عصبی پس از 5 بار رخداد متوالی خطا، متوقف گردد.

این مفهوم بدان معناست که شبکه عصبی در مراحل قبل با به وجود آمدن خطا اقدام به تصحیح خطا نموده و دفعات متوالی رخداد خطا همواره کمتر از 5 می‌باشد تا اینکه بالاخره روند آموزش پس از 5 مرحله رخداد متوالی خطا، متوقف می‌گردد.

بنابراین پس از 41 بار آموزش و رخداد 5 خطای متوالی به دلیل جلوگیری از پدیده آموزش غیر موثر و بیش از حد لازم<sup>5</sup>، توقف فرآیند آموزش آموزش شبکه عصبی، به کمک داده‌های مرتبط با مرحله اعتبارسنجی در دستور کار الگوریتم قرار می‌گیرد.

بر این اساس، کمترین مقدار خطا و بهترین کارایی شبکه عصبی به ازای توقف آموزش در 5 بار رخداد متوالی خطا، در تکرار 36<sup>6</sup> ام و به ازای داده‌های مرتبط با مرحله اعتبارسنجی نتایج اتفاق افتاده است.

نقطه‌ای که در شکل 9 با دایره مشخص شده، نشانگر وضعیتی است که از نسل<sup>6</sup> 36 تا 41 روند آموزش، دارای خطاهای متوالی بوده و لذا در تکرار شماره 41، فرآیند به منظور جلوگیری از اشباع آموزش شبکه عصبی و افزایش قدرت تعمیم‌دهی آن متوقف شده است. هر چند این توقف به بهای کاهش بازدهی ظاهری شبکه عصبی است، لیکن قطعیت و توان تعمیم‌دهی نتایج آن را تضمین می‌نماید. در شکل 10 ماتریس ابهام<sup>7</sup> یا درهم‌ریختگی به عنوان معیاری برای مشاهده وضعیت تعدادی طبقه‌بندی سیگنال‌ها در مرحله نهایی (آزمایش شبکه)، استخراج شده است. این ماتریس بیانگر آن است که با توجه به عناصر موجود روی قطر اصلی (موارد صحیح دسته‌بندی شده در مرحله آزمایش)، شبکه عصبی از مجموع 36 سیگنال، در 29 مورد درست عمل کرده و در 7 مورد دچار خطا شده، لذا به بازدهی 80.6 درصد دست یافته است.

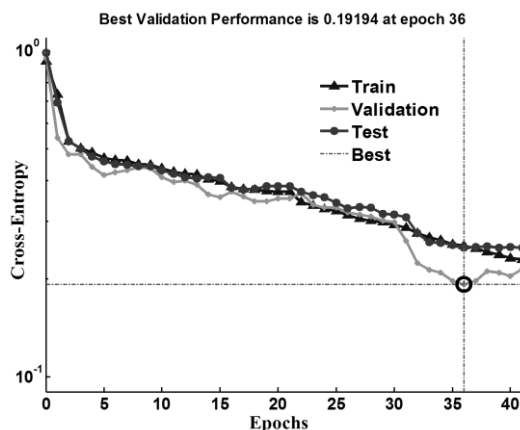


Fig 9. ANN error trend during training

شکل 9 روند کاهش خطای شبکه عصبی در خلال فرآیند آموزش

<sup>5</sup>Over-training

<sup>6</sup>Epoch

<sup>7</sup>Confusion Matrix

سیگنال‌های دریافتی بر اساس تبدیل موجک<sup>1</sup> [19-21] و استخراج ویژگی<sup>2</sup> از سیگنال‌های امواج فراصوت هدایت شده (شامل 240 سیگنال مشتعل بر 60 سیگنال از هر یک از 4 کلاس طراحی شده) گردید.

این ویژگی‌های استخراج شده برای هر سیگنال شامل بیشینه دامنه سیگنال، زمان به قله رسیدن دامنه سیگنال<sup>3</sup>، بیشینه ضرایب موجک، کمینه ضرایب موجک، واریانس ضرایب موجک و انحراف معیار ضرایب موجک می‌باشد.

کلیه ویژگی‌های فوق، برای تمامی 240 سیگنال آماده شده، استخراج گردیده و به عنوان ورودی اصلی شبکه عصبی در نظر گرفته شد. برای اعمال تبدیل موجک در این بخش از پژوهش، از تابع موجک مادر، با نام میر<sup>4</sup> استفاده گردید که دارای عملکردی کاملاً مناسب برای استخراج ویژگی از سیگنال‌های تحت بررسی بود.

خروجی شبکه عصبی در واقع همان دسته‌بندی صحیح کلیه سیگنال‌های ورودی در قالب 4 کلاس و منطبق بر 4 ناحیه‌ی در نظر گرفته شده روی ورق تحت بررسی می‌باشد، به گونه‌ای که شبکه عصبی باید با دریافت هر سیگنال دلخواه، وضعیت تعلق آن به ناحیه مربوطه را به درستی مشخص نماید.

حرف A نمایانگر نقش محرک و حرف S نشان‌دهنده نقش حسگر برای مبدل‌های پیزوالکتریک هستند. مسیرهای منتخب روی ورق، به صورت کاملاً تصادفی و بدون ملاحظه خاصی انتخاب گردید تا هندسه ورق، شرایط مرزی و سایر عوامل متاثر از چیدمان مبدل‌ها، تاثیر مستقیمی بر بازدهی شبکه عصبی نداشته و نتایج حاصل، به هر حالت دلخواه، قابل تعمیم و توسعه باشد.

## 6- اجرای الگوریتم و استخراج نتایج از شبکه عصبی

ابتدا تمامی 240 سیگنال ثبت شده، در سه مرحله اصلی فرآیند آموزش شبکه عصبی به شرح مندرج در جدول 3 تخصیص داده شده و توزیع یافت.

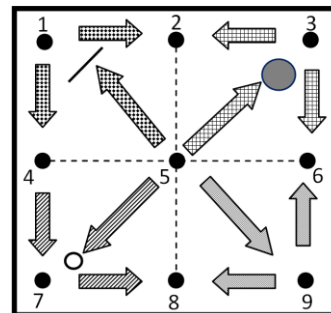


Fig8. Selected paths for providing ANN inputs

شکل 8 مسیرهای منتخب انتشار امواج برای تامین ورودی شبکه عصبی

جدول 2 دسته بندی سیگنالها در قالب 4 کلاس و 12 مسیر

Table 2 Classification of signals in 4 classes & 12 Paths

نام ناحیه (کلاس)	نام مسیرهای مرتبط برای انتشار امواج
ناحیه سالم	A5-S9, A9-S6, A9-S8
ناحیه تورق	A3-S2, A3-S6, A5-S3
ناحیه شکاف	A1-S2, A1-S4, A5-S1
ناحیه سوراخ	A4-S7, A5-S7, A7-S8

<sup>1</sup>Wavelet Transform

<sup>2</sup>Feature Extraction

<sup>3</sup>Time Of Flight (TOF)

<sup>4</sup>Meyer

تفاوت رفتار موج در مواجهه با خرابی‌هایی از انواع متفاوت، در مراجع [14,16] هم با ادبیاتی متمایز ذکر شده است.

شبکه عصبی طراحی شده، قادر است در حالت کلی از هر 100 سیگنال نامعلوم دریافت شده از ورق کامپوزیتی در پیکربندی آزمایش این پژوهش، 80 سیگنال را در گروه مرتبط با خرابی مربوطه به درستی دسته‌بندی کرده در حالی که در خصوص 20 سیگنال، دچار خطا شده و ممکن است این تعداد سیگنال را در کلاس نامرتب دسته‌بندی نماید.

بازدهی شبکه عصبی آموزش داده شده در این تحقیق با توجه به الگوریتم استفاده شده، شرایط آزمایش، پیچیدگی حاکم بر مساله و همچنین در مقایسه با تحقیقات مشابه [22-24] میزان قابل قبولی می‌باشد، لیکن با افزودن تعداد نمونه‌ها (سیگنال‌ها)، اضافه کردن ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌ها و افزون بر آن، ارتقاء و بهینه‌سازی الگوریتم یا حتی تغییر در نوع شبکه عصبی احتمال افزایش دقت و بازدهی در طبقه‌بندی صحیح سیگنال‌ها وجود داشته که می‌تواند در تحقیقات تکمیلی آینده مورد توجه قرار گیرد.

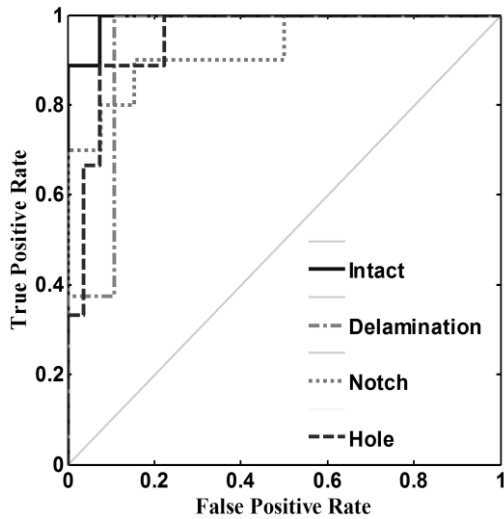


Fig11. Receiver Operating Characteristic (ROC)

شکل 11 نمودار مشخصه عملکرد شبکه عصبی

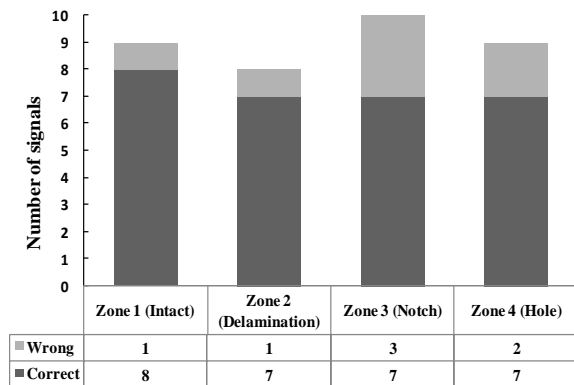


Fig12. Correctness and deviation of ANN outputs

شکل 12 میزان صحت و انحراف خروجی‌های شبکه عصبی

Output Class	Target Class				
	8	0	1	1	
8	8	0	1	1	80% 20%
0	0	7	1	1	77.8% 22.2%
1	0	0	7	0	100% 0%
1	1	1	1	7	70% 30%
	88.9%	87.5%	70%	77.8%	80.6%
	11.1%	12.5%	30%	30%	19.4%

Fig10. ANN confusion matrix (TEST)

شکل 10 ماتریس ابهام (درهم ریختگی) شبکه عصبی

در شکل 11 نمودار مشخصه عملکرد<sup>1</sup> شبکه عصبی، مبتنی بر داده‌های مرحله آزمایش و شامل چهار کلاس در نظر گرفته شده مشتمل بر یک حالت سالم و سه نوع خرابی ترسیم شده است. بر اساس کارایی کلی شبکه، مشاهده می‌شود شبکه عصبی، بهترین عملکرد را در خصوص ناحیه اول ورق کامپوزیتی، یعنی ناحیه سالم دارد. بنابراین شبکه عصبی قادر است با کمترین میزان خطای قابل قبول، سیگنال‌های مربوط به ناحیه سالم را از موارد مربوط به نواحی معیوب، متمایز نماید. در خصوص سیگنال‌های مربوط به نواحی معیوب، شبکه عصبی، بهترین عملکرد را در دسته‌بندی صحیح سیگنال‌های ناحیه دارای تورق دارد. این بدان معناست که شبکه عصبی، در شناسایی و تمایز خرابی از نوع تورق با خطای کمتری مواجه می‌گردد که علت آن را می‌توان با اثر منحصر به فرد هر خرابی بر روی سیگنال‌ها مرتبط دانست. به نحوی که امواج منتشره در سازه بیشترین تاثیرپذیری (تفاوت و تمایز) را از خرابی با نوع تورق دارند.

### 7- تحلیل و تفسیر نتایج

با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده و خروجی‌های بدست آمده از شبکه عصبی می‌توان نتایج حاصله را در قالب موارد ذیل تحت تحلیل و تفسیر قرار داد:

وضعیت تعدادی طبقه‌بندی صحیح و نادرست سیگنال‌ها توسط الگوریتم در مرحله نهایی، به تفکیک هر یک از نواحی روی ورق (متناظر با هر یک از عیوب) در شکل 12 مشاهده می‌گردد بر اساس تحلیل داده‌های مربوط به آزمایش شبکه عصبی، بازدهی شبکه برای داده‌های مرحله نهایی برابر 80.6 درصد می‌باشد.

تفاوت خطاهای الگوریتم شبکه عصبی در دسته‌بندی سیگنال‌های مرتبط با نواحی چهارگانه، بر اساس این واقعیت است که هر نوع خرابی تاثیر متفاوت بلکه منحصر به فرد بر سیگنال امواج منتشر شده در سازه دارد.

البته همین مفهوم، معیار اصلی برای تمایز و بازشناخت سیگنال‌ها محسوب می‌گردد. صرفنظر از خطای ذاتی الگوریتم شبکه عصبی، متناظر با پیکربندی استفاده شده در این تحقیق، خرابی از نوع شکاف تاثیرگذاری کمتری بر سیگنال‌ها داشته و لذا وجه تمایز کمتری نیز برای شبکه عصبی ایجاد می‌نماید، در حالی که تاثیرپذیری امواج از تورق و سوراخ به نسبت، بیشتر است. این

<sup>1</sup>Receiver Operating Characteristic (ROC)

در تشریح کاربرد و عملکرد شبکه عصبی طراحی شده در این پژوهش، می‌توان عنوان نمود، چنانچه یک سیگنال دلخواه، مربوط به هر یک از نواحی ورق کامپوزیتی، به عنوان ورودی به شبکه عصبی تحویل گردد، این الگوریتم قادر است با احتمال 80.6% مشخص نماید که سیگنال مذکور متعلق به چه ناحیه‌ای از سازه می‌باشد. بر این اساس شبکه عصبی طراحی شده می‌تواند با عملکرد قابل قبولی اقدام به شناسایی خرابی (تمایز سازه سالم از معیوب) نموده و علاوه بر آن، نوع خرابی را نیز بر اساس الگوریتم طراحی شده، البته با مقداری خطا و بازدهی حدود 80% تخمین بزند که بر این اساس می‌تواند راهکاری موثر در شناسایی و دسته‌بندی انواع خرابی‌های محتمل در یک سازه کامپوزیتی ورقی با وضعیت از قبل، نامعلوم و دلخواه باشد.

هر چند در پژوهش‌های مشابه قبلی، شبکه عصبی به عنوان ابزاری نوین در حوزه ارزیابی غیرمخرب سازه‌ها کاربردهای مختلفی داشته است، لیکن ایجاد و تجمیع چند نوع خرابی بر روی یک سازه واحد از نوع ورق چندلایه کامپوزیت پلیمری و استفاده از امواج فراصوت هدایت شده، به همراه پردازش سیگنال‌ها و استخراج ویژگی در حوزه مشترک زمان و فرکانس (تبدیل موجک) و نهایتاً تحلیل داده‌های حاصل از مراحل قبل، توسط یک الگوریتم، ذیل مفاهیم هوش مصنوعی به منظور شناسایی، تمایز و دسته‌بندی خرابی‌ها از نقاط قوت پژوهش حاضر محسوب می‌گردد.

اقداماتی از قبیل بهینه‌سازی الگوریتم استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی و حتی تغییر ساختار یا نوع آن و نیز افزایش تعداد داده‌های استخراج شده از سازه، مواردی است که می‌تواند منجر به افزایش بازدهی شبکه عصبی در شناسایی خرابی و دسته‌بندی عیوب مختلف گردد.

برای توسعه و بهینه‌سازی روش استفاده شده در این مقاله، با تکمیل بانک اطلاعاتی مشخصه‌های سیگنال‌های دریافتی از سازه شامل حالت‌های مختلف خرابی از جمله خرابی‌هایی با شدت‌های متفاوت و مکان وقوع متنوع (ارائه ورودی‌هایی با تعداد و تنوع بیشتر به شبکه عصبی) امکان تخمین محل خرابی‌ها و شدت آنها نیز توسط شبکه عصبی با همان اصول الگوریتم طراحی شده در این پژوهش، امکان‌پذیر خواهد بود که موضوعی جالب توجه برای انجام تحقیقات بیشتر و پژوهش‌های تکمیلی در آینده است.

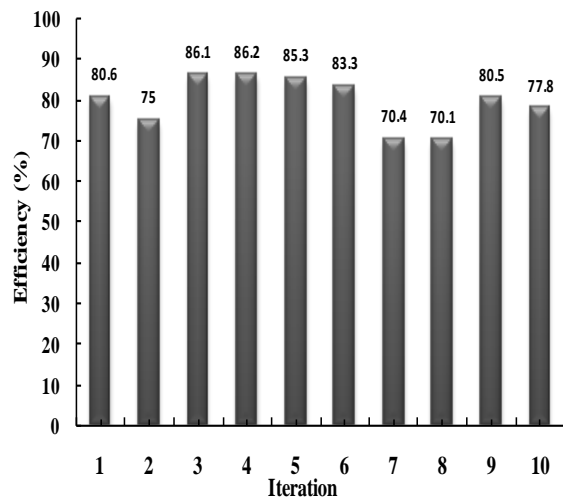


Fig13. ANN efficiency change related to inputs sequences

شکل 13 تغییرات بازدهی شبکه عصبی مرتبط با تغییر در توالی ورودی‌ها

نکته قابل توجه در گزارش بازدهی و خطای یک شبکه عصبی که البته نباید مورد غفلت واقع شود، انتخاب کاملاً تصادفی داده‌های آموزشی است. هرچند در قسمت قبل با استفاده از کدنویسی نرم‌افزاری و همچنین استفاده از پارامترهای مختلف الگوریتم مورد استفاده برای آموزش شبکه عصبی، سعی در برهم ریختن ترتیب داده‌های آموزشی و انتخاب آنها به صورت کاملاً تصادفی شد، لیکن برای اطمینان از درستی گزارش میزان بازدهی شبکه عصبی، شایسته است فرآیند آموزش برای چند مرتبه با داده‌های مختلف و توالی کاملاً تصادفی و به هم ریخته انجام شده و سپس میزان موفقیت شبکه عصبی در دسته‌بندی داده‌ها با محاسبه میانگین نتایج، گزارش گردد. به عبارت دیگر در این رهیافت، عملیات آموزش و آزمایش شبکه عصبی، چندین مرتبه با داده‌های آموزشی و آزمایشی تصادفی مختلف انجام شده و نتیجه نهایی، مشتمل بر میانگین موفقیت و بازدهی شبکه عصبی در هر یک از مراحل قبلی خواهد بود.

همانطور که در شکل 13 مشاهده می‌شود به ازای 10 بار آموزش مکرر و متوالی شبکه عصبی با استفاده از مجموعه‌های متفاوت انتخاب شده به شیوه کاملاً تصادفی، مقدار موفقیت شبکه عصبی در دسته‌بندی صحیح داده‌ها در هر بار آموزش و آزمایش، بسته به تغییر در نحوه انتخاب تصادفی داده‌های ورودی، متفاوت بوده و به طور متوسط برای داده‌های آزمایش، 79.5 درصد است.

لذا با این شیوه، شبکه عصبی به طور میانگین دارای موفقیت 79.5 درصد در دسته‌بندی صحیح سیگنال‌های ورودی در مرحله نهایی (آزمایش) می‌باشد که تنها حدود 1.1 درصد با نتیجه بدست آمده در مرحله قبل متفاوت است، لیکن از قطعیت بیشتری برخوردار می‌باشد.

## 8- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک ورق کامپوزیتی چندلایه از جنس الیاف شیشه/پوکسی به چهار ناحیه مشتمل بر یک ناحیه سالم و سه ناحیه معیوب (سه نوع خرابی مختلف تورق، شکاف و سوراخ) تقسیم گردید.

با تعبیه میدل‌های پیروالکترونیک بر روی مرزهای نواحی چهارگانه فوق‌الذکر، امکان انتشار و دریافت امواج فراصوت هدایت شده در 40 مسیر مختلف روی ورق فراهم شد. در هر ناحیه، 3 مسیر مختلف (محرک/ حسگر) در راستای 0، 45 و 90 درجه (مترتب بر راستاهای قرارگیری الیاف) انتخاب شد که به این ترتیب 12 مسیر در کل ورق تعیین گردید. با 20 مرتبه تکرار آزمایش، سیگنال‌های مربوط به امواج منتشره بین محرک و حسگر در هر مسیر، دریافت و ذخیره گردید که نهایتاً 60 سیگنال از هر ناحیه و در مجموع 240 سیگنال از کل ورق تحت بررسی بدست آمد.

در مرحله بعد، پس از طراحی و برنامه‌نویسی الگوریتم یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه در نرم افزار متلب، با بهره‌گیری از روش تبدیل موجک با تابع مییر، شش ویژگی مختلف از هر 240 سیگنال ذخیره شده، استخراج گردید که به عنوان ورودی شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت.

پس از آموزش شبکه عصبی با سه دسته داده شامل داده‌های آموزشی (70%)، داده‌های اعتبارسنجی (15%) و همچنین داده‌های آزمایش (15%)، نهایتاً شبکه عصبی توانست علاوه بر تمایز ناحیه سالم از سه ناحیه معیوب، با بازدهی میانگین 80.6% در خصوص ایجاد تمایز میان نواحی معیوب (تمایز سه نوع خرابی مختلف ایجاد شده روی ورق) و شناخت نوع خرابی، در مقایسه با تحقیقات مشابه، عملکرد قابل قبولی داشته باشد.

## 9-تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر یوسفی‌کما (مرکز سیستم‌ها و فناوری‌های پیشرفته دانشکده مکانیک دانشگاه تهران)، جناب آقای دکتر رضادوست (پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران) و جناب آقای دکتر حسینی‌تودشکی (دانشکده هوافضا دانشگاه امیرکبیر) برای ارائه مجوز حضور در آزمایشگاه و مساعدت در استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## 10-مراجع

- Neural Networks“ NDT & E International, Vol. 54, pp. 9-18, 2013.
- [21] Misiti, M. Misiti, Y. Oppenheim, G. and Poggi, J.-M., “Wavelet Toolbox“ The MathWorks Inc., Natick, MA, Vol. 15, pp. 21, 2014.
- [22] Ramadas, C. Balasubramaniam, K. Joshi, M. and Krishnamurthy, C., “Detection of Transverse Cracks in a Composite Beam Using Combined Features of Lamb Wave and Vibration Techniques in Ann Environment“, 2008.
- [23] Su, Z., Wang, X. Chen, Z. and Ye, L., “A Hierarchical Data Fusion Scheme for Identifying Multi-Damage in Composite Structures with a Built-in Sensor Network“ Smart Materials and Structures, Vol. 16, No. 6, pp. 2067, 2007.
- [24] De Fenza, A. Sorrentino, A. and Vitiello, P., “Application of Artificial Neural Networks and Probability Ellipse Methods for Damage Detection Using Lamb Waves“ Composite Structures, Vol. 133, pp. 390-403, 2015.
- [1] Kaw, A. K., “Mechanics of Composite Materials“, CRC press, 2005.
- [2] Balageas, D. Fritzen, C.-P. and Güemes, A., “Structural Health Monitoring“, John Wiley & Sons, 2010.
- [3] Speckmann, H. and Roesner, H., “Structural Health Monitoring: A Contribution to the Intelligent Aircraft Structure“ in Proceeding of 17, 2006.
- [4] Riahi, M. and Ahmadi, A., “Comparison and Analysis of Two Modern Methods in the Structural Health Monitoring Techniques in Aerospace“ in Proceeding of International Society for Optics and Photonics, pp. 98041Y-98041Y-7, 2016.
- [5] Su, Z. Ye, L. and Lu, Y., “Guided Lamb Waves for Identification of Damage in Composite Structures: A Review“ Journal of sound and vibration, Vol. 295, No. 3, pp. 753-780, 2006.
- [6] Staszewski, W. Boller, C. and Tomlinson, G. R., “Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing“, John Wiley & Sons, 2004.
- [7] Mitra, M. and Gopalakrishnan, S., “Guided Wave Based Structural Health Monitoring: A Review“ Smart Materials and Structures, Vol. 25, No. 5, pp. 053001, 2016.
- [8] Su, Z. and Ye, L., “An Intelligent Signal Processing and Pattern Recognition Technique for Defect Identification Using an Active Sensor Network“ Smart materials and structures, Vol. 13, No. 4, pp. 957, 2004.
- [9] Standard, A., D3039-D3039m-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Doi: 10.1520-D3039-D3039m-14, 1995.
- [10] Ochôa, P. Infante, V. Silva, J. M. and Groves, R. M., “Detection of Multiple Low-Energy Impact Damage in Composite Plates Using Lamb Wave Techniques“ Composites Part B: Engineering, Vol. 80, pp. 291-298, 2015.
- [11] Su, Z. Ye, L. and Bu, X., “A Damage Identification Technique for CF/EP Composite Laminates Using Distributed Piezoelectric Transducers“ Composite structures, Vol. 57, No. 1, pp. 465-471, 2002.
- [12] Rose, J. L., “Ultrasonic Waves in Solid Media“, Cambridge university press, 2004.
- [13] Yeum, C. M. Sohn, H. Ihn, J. B. and Lim, H. J., “Instantaneous Delamination Detection in a Composite Plate Using a Dual Piezoelectric Transducer Network“ Composite Structures, Vol. 94, No. 12, pp. 3490-3499, 2012.
- [14] Su, Z. and Ye, L., “Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications“, Springer Science & Business Media, 2009.
- [15] Weeks, M., “Digital Signal Processing Using Matlab & Wavelets“, Jones & Bartlett Learning, 2010.
- [16] Su, Z. and Ye, L., “Digital Damage Fingerprints (DDF) and Its Application in Quantitative Damage Identification“ Composite Structures, Vol. 67, No. 2, pp. 197-204, 2005.
- [17] Graupe, D., “Principles of Artificial Neural Networks“, World Scientific, 2013.
- [18] Samarasinghe, S., “Neural Networks for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Complex Pattern Recognition“, CRC Press, 2016.
- [19] Nazarko, P. and Ziemianski, L., “Damage Detection in Aluminum and Composite Elements Using Neural Networks for Lamb Waves Signal Processing“ Engineering Failure Analysis, Vol. 69, pp. 97-107, 2016.
- [20] Liu, S. Du, C. Mou, J. Martua, L. Zhang, J. and Lewis, F., “Diagnosis of Structural Cracks Using Wavelet Transform and





## اثرات سطح دما و نسبت تنش به استحکام بر رفتار خزشی اتصالات چسبی تک لبه آلومینیم-آلومینیم

رویالسادات آشفته<sup>1</sup>، حسن پورنگ<sup>2</sup>، مرصاد مباشری<sup>2</sup>، هادی خرمی شاد<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی دکتری طراحی کاربردی، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
2- کارشناس ارشد هوافضا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 1684613114، [khoramishad@iust.ac.ir](mailto:khoramishad@iust.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>دریافت: 96/4/21 پذیرش: 96/9/28</p> <p><b>کلیدواژگان:</b> چسب خزش استحکام برشی اتصال چسبی تک لبه</p>	<p>چسب‌های پلیمری به سبب ماهیت ویسکوالاستیک خود با گذر زمان و تحت یک بار ثابت دچار تغییر شکل خزشی می‌شوند. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر سطح دما و نسبت تنش-به- استحکام بر رفتار خزشی اتصالات چسبی ساده تکه لبه ساخته‌شده با چسب آرالدایت 2011 است. ابتدا آزمایش کشش استاتیکی در دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد صورت گرفته و سپس با اعمال نسبت‌های تنش-به- استحکام نهایی معادل 0.25 و 0.35، آزمایش خزش کششی انجام گرفته است. با افزایش نسبت تنش-به- استحکام نهایی از 0.25 و 0.35 در دمای 40 درجه سانتی‌گراد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش به ترتیب 24 و 96.7 درصد افزایش پیدا می‌کنند. در دمای 50 درجه این میزان افزایش برابر 14.3 و 79.9 درصد است. همچنین با افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در نسبت تنش-به- استحکام نهایی معادل 0.25، به ترتیب 20.6 و 49.5 درصد و در نسبت تنش-به- استحکام نهایی معادل 0.35، به ترتیب 11.1 و 36.6 درصد افزایش پیدا می‌کنند.</p>

## The Effects of Temperature Level and Stress-to-Strength Ratio on Creep Behavior of Aluminum-Aluminum Single Lap Adhesive Joints

**Roya Sadat Ashofteh, Hassan Pourang, Mersad Mobasheri, Hadi Khoramishad\***

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology of Iran, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, [khoramishad@iust.ac.ir](mailto:khoramishad@iust.ac.ir)

**Keywords**  
Adhesive  
Creep  
Shear Strength  
Single Lap Joint

**Abstract**  
Polymer-based adhesives undergo creep deformation under constant loading due to their viscoelastic nature. The aim of this study was investigation of the effects of temperature level and stress- to-strength ratio on creep behavior of single lap joints (SLJs) manufactured with adhesive Araldite 2011. Static tensile tests were done on the samples at 40 and 50°C. Then, the tensile creep tests were done at 40 and 50°C and at stress-to-strength ratios of 0.25 and 0.35. With increasing the stress-to-strength ratio from 0.25 to 0.35 at 40°C, the creep displacement and the slope of the second creep stage were increased by 24% and 96.7%, while at 50°C such increase reached to 14.3% and 79.9%, respectively. With increasing the temperature from 40 to 50°C, at the stress-to-strength ratio of 0.25, the creep displacement was increased by 20.6% and the slope of second creep stage increased by 49.5%. Whereas, at the stress-to-strength ratio of 0.35, changing the temperature from 40 to 50°C resulted an increase in the creep displacement by 11.1% and the slope of second creep stage by 36.6%.

خزش تغییر شکل وابسته به زمان است که به‌عنوان نقص در رفتار بلند مدت مواد پلیمری به حساب می‌آید. تحت اثر یک بار ثابت که به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از استحکام نهایی ماده است، زنجیره‌های بستر پلیمری کشیده شده و دچار چرخش و لغزش روی یکدیگر می‌شوند. این امر منجر به بهم خوردن توازن ابعادی<sup>1</sup> شده و نهایتاً شکست ماده را در پی خواهد داشت. در پلیمرهای خطی با زنجیره‌های مولکولی کوتاه، این پدیده سریع‌تر و در صورت وجود پیوندهای عرضی، کندتر رخ خواهد داد. خزش در مواد به عوامل مختلفی از جمله دما و سطح تنش وابسته است. با گذشت زمان

اتصالات چسبی در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم اتصال قطعات همچون جوش، پیچ و پرچ دارای ویژگی‌هایی همچون توزیع یکنواخت‌تر تنش، نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت اتصال مواد غیر هم‌جنس، مقاومت بالا در برابر بارگذاری خستگی، کاهش هزینه‌های تولید و حذف خوردگی گالوانیک است. وجود ویژگی‌های مثبت باعث شده این نوع اتصال در صنایع هوافضا، دریایی و اتومبیل‌سازی مورد توجه قرار بگیرد. در کنار مزایای آن، اتصالات چسبی دارای معایبی هستند و عواملی مثل بازرسی مخرب برای سلامت اتصال، حساسیت و تأثیرپذیری آن‌ها از عوامل محیطی همچون دما و رطوبت استفاده از این اتصالات را محدود ساخته است.

<sup>1</sup> Dimensional Mismatch

**Please cite this article using:**

Ashofteh, R. S. Pourang, H. Mobasheri, M. and Khoramishad, H., "The Effects of Temperature Level and Stress-to-Strength Ratio on Creep Behavior of Aluminum-Aluminum Single Lap Adhesive Joints", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 353-358, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

بیان داشتند که برای تخمین دقیق تر رفتار خزشی می‌بایست با تغییر دما، نوع چسب، آماده‌سازی سطح و ضخامت چسب، اثر پارامترهای متفاوت دیده شود. وجود رطوبت در کنار سطح تنش اعمالی و دما، عامل دیگری است که باید در آزمایش خزش کششی چسب‌های پلیمری در نظر گرفته شود. کاستا و باروس<sup>10</sup> [5] به انجام آزمایش‌های خزشی استاندارد روی یک نمونه چسب اپوکسی در سه سطح تنش مختلف به منظور درک رفتار خزشی آن پرداختند. آزمایش‌های صورت گرفته نشان داد که اگر سطح تنش اعمالی کمتر از 50 درصد استحکام نهایی ماده باشد، خواص آنی و وابسته به زمان چسب تحت دما و رطوبت ثابت، تقریباً ثابت می‌ماند.

کروکمب و همکارانش [6] رفتار خزشی اتصال ساده تک لبه تحت بار طولانی مدت و در معرض رطوبت را مورد بررسی قرار دادند. پیش از انجام مدل‌سازی، به منظور اندازه‌گیری وابستگی نرمی خزشی<sup>11</sup> به رطوبت در نمونه حجمی اتصالات چسبی تک لبه، آزمون‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های شبه استاتیک در دمای اتاق روی نمونه حجمی نشان داد که وجود رطوبت در چسب اثر قابل توجهی در تنزل خواص چسب دارد به گونه‌ای که مدول یانگ و استحکام شکست به ترتیب 9.5 و 5.3 درصد نسبت به حالت بدون رطوبت کاهش دارند. همچنین نتایج حاصل از نمودار خزشی در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و تحت بار 25 درصد استحکام و اماندگی استاتیکی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی بر پایه مدل قانون توانی از تطابق خوبی برخوردار است.

این گروه تحقیقاتی در گزارشی دیگر تکنیک‌های مدل‌سازی عددی جهت شبیه‌سازی اثر رطوبت، دماهای بالا و بار اعمالی را بر اتصال ساده تک لبه، مورد ارزیابی قرار دادند [7]. در کنار این آزمایش‌های تجربی، اتصال ساده تک لبه به صورت غوطه‌ور در آب، در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و به مدت 6 ماه تحت دو سطح تنش 12 و 17.5 درصد استحکام شکست استاتیکی<sup>12</sup> قرار گرفته است. بر این اساس مدول یانگ چسب اف-ام 73 در حالت مرطوب 15 درصد نسبت به حالت خشک کاهش نشان داد. همچنین برای نمونه‌ی تحت نیرویی معادل 12 درصد استحکام شکست، کرنش خزشی در سه ماهه‌ی ابتدای آزمایش با سرعت بیشتری نسبت به سه ماهه‌ی دوم افزایش پیدا کرد. پس از گذشت سه ماه، ایجاد کرنش خزشی در تمامی لایه‌ها با یک نرخ ثابت همراه بود. بررسی سازوکارهای مولکولی موثر در بهبود یا تضعیف مقاومت خزشی تحت دما و سطوح تنش متفاوت موضوع دیگری است که از اهمیت فراوانی در شناخت رفتار خزشی مواد پلیمری برخوردار است.

در تحقیقی، آلن و شاناهان<sup>13</sup> [8] رفتار خزشی اتصال ساده تک لبه را در دما و بارگذاری‌های مختلف و ارتباط آن با سازوکارهای مولکولی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه چسب، رفتار خزشی به رفتار لاستیک شبیه است زیرا رفتار خزشی تحت تأثیر حرکت بخش‌های مولکولی<sup>14</sup> قرار خواهد گرفت.

عمده تحقیقات صورت گرفته، بررسی رفتار خزشی نمونه‌های حجمی چسب‌های اپوکسی جهت استخراج کرنش‌های خزشی بوده است و آنها عموماً در سطح دمای ثابت یا سطح تنش ثابت انجام شده است. با توجه به کاربرد وسیع اتصالات چسبی آلومینیم-آلومینیم در صنایع مختلف از جمله صنعت هوایی و اهمیت دوام سازه‌ها که به صورت همزمان در معرض تنش و دماهای

حرکت اتم‌ها، مولکول‌ها و نابجایی‌ها<sup>1</sup> در یک ماده جامد اتفاق می‌افتد و با افزایش دما این حرکات سرعت پیدا می‌کنند. تأثیرات خزش در دماهای زیر دمای انتقال شیشه‌ای پلیمرها نسبتاً کوچک است ولی با گذر از این دما، خزش روند رو به رشدی را نشان می‌دهد.

در دهه‌های اخیر تلاش‌های فراوانی جهت شناخت رفتار خزشی چسب‌های پایه پلیمری گرم‌انرم و گرم‌سخت از سوی محققان صورت گرفته است. زهساز<sup>2</sup> و همکارانش [1] در سال 2014، اثر ضخامت و پیخ‌زنی<sup>3</sup> چسب را بر تغییر شکل و عمر خزشی اتصال چسبی دو لبه مورد آزمایش قرار دادند. چسب مورد استفاده در این تحقیق، آرالدایت<sup>4</sup> 2015 از نوع پایه اپوکسی است. آزمایش خزش تک‌محوره در دمای 63 درجه سانتی‌گراد جهت به دست آوردن ویژگی‌های خزشی در این دما صورت گرفته است. نتایج نشان داد که وجود فیلت در اتصال منجر به افزایش عمر خزشی و کاهش تغییر شکل خزشی اتصال شده و این در حالی است که افزایش ضخامت چسب اثر اندکی بر عمر خزشی اتصال داشته است.

در تحقیقی دیگر خلیلی<sup>5</sup> و همکارانش [2] اثر تقویت ناحیه چسب بر خواص خزشی اتصال ساده تک لبه متشکل از چسب‌های آلومینیمی چسبیده شده با چسب آرالدایت 2015 را به صورت تجربی بررسی کردند. تقویت لایه چسب به کمک الیاف آرامید، کربن و شیشه بوده و آزمایش در دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه چسب صورت گرفت. زمان واماندگی<sup>6</sup> و کرنش اولیه در دو حالت چسب خالص و چسب تقویت‌شده اندازه‌گیری و مقایسه شدند. با توجه به نتایج حاصله، افزودن الیاف به ناحیه اتصال موجب کاهش قابل توجه کرنش اولیه شد و این در حالی است که زاویه قرارگیری الیاف اثر چندانی بر کرنش اولیه نداشت. همچنین افزودن الیاف به ناحیه اتصال اثر تضعیف‌کنندگی در دماهای بالا بر خواص مکانیکی و رفتار خزشی اتصال ساده تک لبه را جبران کرد.

تحقیقاتی نیز به منظور درک رفتار چسب‌ها تحت اثرات ترکیبی دما و سطوح تنش انجام شده است. به عنوان مثال پرتز و ویسمن<sup>7</sup> [3] به انجام آزمایش خزشی بر روی نمونه حجمی چسب اف-ام 73<sup>8</sup> به منظور تعیین خواص ویسکوالاستیک آن پرداختند. آزمایش‌های خزش و بازیابی خزش در سطوح تنش 10 و 30 مگاپاسکال و در سه دمای 40، 50 و 60 درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دما استحکام نهایی چسب کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دما موجب افزایش نرخ خزش و جابه‌جایی خزشی خواهد شد.

در تحقیقی دیگر کوئیزوز و همکارانش<sup>9</sup> [4] به بررسی عمر خزشی اتصالات ساده تک لبه ساخته شده با چسب‌های فلزی و چسب‌های اپوکسی و پلی‌یورتان تحت سطوح تنش مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش تنش از 11.4 به 8.5 مگاپاسکال، عمر خزشی اپوکسی از 8 ساعت به 3000 ساعت افزایش پیدا می‌کند. شرایط مشابهی نیز برای پلی‌یورتان مشاهده شد به گونه‌ای که با کاهش تنش به 6.4 مگاپاسکال، عمر خزشی به حدود 700 ساعت می‌رسد. به طور میانگین، اتصالات تحت بار بیش از 60 درصد از استحکام نهایی، عمر خزشی حدود یک ماه داشتند. آن‌ها همچنین

<sup>1</sup> Dislocation

<sup>2</sup> Zehsaz

<sup>3</sup> Fillet

<sup>4</sup> Araldite

<sup>5</sup> Khalili

<sup>6</sup> Failure

<sup>7</sup> Peretz and Weitsman

<sup>8</sup> FM73

<sup>9</sup> Queiroz

<sup>10</sup> Costa and Barros

<sup>11</sup> Creep compliance

<sup>12</sup> Static failure

<sup>13</sup> Allen and Shanahan

<sup>14</sup> molecular segments



متشکل از اسیدسولفوریک غلیظ، دی کرومات سدیم و آب مقطر صورت گرفته است. بدین منظور با قرار دادن ظرف حاوی محلول اسیدی روی گرم کن برقی، دمای آن به 60 درجه سانتی گراد رسانده شده و با قرار دادن چسبندها درون محلول به مدت 30 دقیقه فرآیند اسیدشویی کامل می شود. سپس جهت اتصال بهتر چسب و چسبندها نیاز است تا سطح آلومینیمها آندایز شوند.

آندایز آلومینیم یک فرآیند الکتروشیمیایی است که منجر به تشکیل لایه ی اکسیدی متخلخل روی سطح فلز می گردد. در این تحقیق از استاندارد ASTM D 2651 [11] جهت انجام فرآیند آندایز چسبندهای آلومینیمی استفاده شده است. سپس سطح چسبندها به چسب آشفته شده و نمونه ها درون قید و بست<sup>6</sup> قرار داده می شوند. ضخامت لایه چسب توسط ورق هایی<sup>7</sup> با ضخامت یکسان کنترل می شود. فرآیند پخت نمونه ها با توجه به کاتالوگ چسب، به مدت 16 ساعت و تحت دمای 40 درجه سانتی گراد در کوره صورت گرفت.

### 2-3- آزمون کشش

جهت به دست آوردن استحکام برشی اتصال ساده تک لبه در دماهای 40 و 50 درجه سانتی گراد از دستگاه کشش چندمنظوره سنتام<sup>8</sup> بهره گرفته شده است. پیش از اعمال نیرو، دمای موردنظر تنظیم شده و 15 دقیقه به نمونه فرصت داده می شود تا به شرایط دمایی پایا برسد. روند آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM D 1002 [12] انجام شده و نرخ جابه جایی وارد شده به اتصالات توسط دستگاه برابر با 0.5 میلی متر بر دقیقه است.

### 2-4- آزمون خزش

دستگاه خزش مورد استفاده در این تحقیق مطابق شکل 2 از نوع پنوماتیکی است. دستگاه با تنظیم شیر رگلاتور، هوای کمپرسور را به داخل سه سیلندر متصل به نمونه ها می فرستد. فشار هوا درون پیستون موجب کشش قطعه شده و میزان بار وارده توسط لودسل متصل به نمونه اندازه گیری و بر روی نشانگر نیرو نشان داده می شود. میزان جابه جایی نمونه ها به کمک ساعت های اندیکاتور متصل به میله ی واسط بین سیلندر و نمونه قرائت می شود. دقت ساعت ها برابر 0.01 میلی متر است.

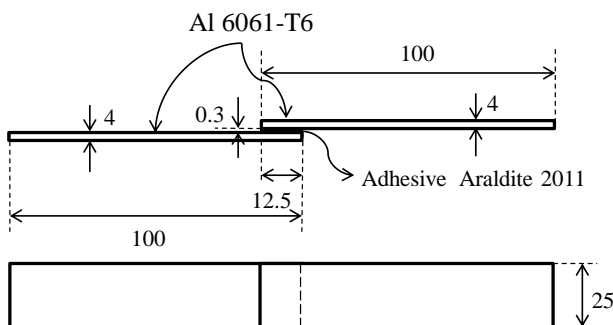


Fig. 1 Geometrical specifications of single lap joints (dimensions in mm)

شکل 1 مشخصات هندسی اتصال تک لبه (ابعاد به میلی متر)

بالا قرار دارند و با توجه به حساسیت چسب به دماهای بالا، لزوم بررسی گسترده تری بر تاثیر توامان این دو عامل بر رفتار خزشی اتصالات چسبی آلومینیمی احساس می شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی رفتار خزشی اتصال چسبی تک لبه ساخته شده با چسب آرالدایت 2011 تحت اثرات ترکیبی دما و تنش است که با تمرکز بر تعیین درصد تخریب استحکام کششی بر اثر افزایش دما و میزان تحمل بارپذیری اتصالات چسبی و نیز تاثیر اعمال بار بر نمونه ها با نسبت "تنش به استحکام نهایی" ثابت بر رفتار خزشی اتصالات در دو سطح دما می باشد.

در این تحقیق بررسی می شود که اعمال بار بصورت نسبت های "تنش به استحکام نهایی" ثابت معادل 0.25 و 0.35 در دو سطح دمای 40 و 50 درجه سانتی گراد، چه تاثیری بر استحکام خزشی اتصالات چسبی آلومینیم-آلومینیم خواهد داشت. به عبارتی، خزش در نسبت "تنش به استحکام نهایی" ثابت هر دما بررسی شده است و به جای در نظر گرفتن یک مقدار تنش ثابت در هر دو دمای 40 و 50 درجه سانتی گراد، ضریب "تنش به استحکام" هر دما به عنوان بار خزشی ماده لحاظ شده است. نتایج در قالب نمودارهای جابه جایی خزشی- زمان ترسیم شده است. لازم به ذکر است که سطوح دمای انتخاب شده برای انجام آزمون ها، دماهای کمتر از دمای انتقال شیشه ای است. بدین جهت که اثر ایجاد تغییرات ساختاری چسب از حالت شیشه ای به حالت لاستیکی<sup>1</sup> حذف شود.

### 2-مراحل آزمایشگاهی

#### 2-1- مواد مورد استفاده

در این تحقیق از چسب آرالدایت 2011 استفاده شده که محدوده ی دمای کاری بین 40- تا 80+ درجه سانتی گراد دارد. رزین بر پایه اپوکسی و سخت کننده<sup>2</sup> از نوع پلی آمینی است. به منظور تعیین دمای انتقال شیشه ای چسب آرالدایت 2011، دو نمونه چسب در اندازه مشخص طبق استاندارد ASTM D 3418 [9] به پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران ارسال شد. نتایج آزمون ها نشان داد که دمای انتقال شیشه ای این چسب برابر 60.2 درجه سانتی گراد است. چسبده ی<sup>3</sup> استفاده شده در ساخت اتصالات، آلومینیم 6061-T6 دارای تنش تسلیم 276 مگاپاسکال و استحکام نهایی 310 مگاپاسکال است. برای برش آلومینیم با ابعاد 100×25×4 میلی متر از دستگاه واترجت<sup>4</sup> به دلیل بالا بودن دقت و جلوگیری از به وجود آمدن اعوجاج اعوجاج و انحنای در سطح آلومینیم استفاده شده است. در این تحقیق برای تعیین خواص خزش برشی چسب تحت بار کششی، از شرایط آزمون استاندارد ASTM D 2294-96 [10] استفاده شده است. همان طور که در شکل 1 مشاهده می شود طول نمونه آزمایش برابر 187.5 میلی متر است. در این تحقیق چسبندها دارای ابعاد 100×25 میلی متر هستند و ضخامت چسب 0.3 میلی متر در نظر گرفته شده است.

#### 2-2- ساخت اتصالات

مهم ترین عامل در دستیابی به حداکثر میزان استحکام اتصالات چسبی، آماده سازی سطح مناسب است. در این تحقیق از فرآیند اسید شویی قطعات و سپس آندایز کردن<sup>5</sup> استفاده شده است. فرآیند اسیدشویی به کمک محلولی

<sup>1</sup> Rubbery  
<sup>2</sup> Hardener  
<sup>3</sup> Substrate  
<sup>4</sup> Water jet  
<sup>5</sup> Anodize

<sup>6</sup> Fixture  
<sup>7</sup> Shim  
<sup>8</sup> SANTAM

جدول 1 نتایج آزمون کشش اتصال تک لبه

Table 1 Tensile test results of single lap adhesive joints

استحکام برشی (MPa)	دما (°C)
15.3 ± 0.4	40
11.8 ± 0.4	50

طبق شکل 3 تعداد زیادی حفره در سطوح شکست اتصالات چسبی در هر دو دمای آزمون مشاهده شد. با افزایش دما و جنبش مولکولی زنجیره‌های پلیمری، چسب رفتار نرم دارد. تصاویر SEM به کمک نرم‌افزار آنالیز تصویر Image J پردازش شده و نشان داده است که با افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، تعداد حفره‌ها از 23 به 27 و میانگین مساحت حفره‌ها از 685 به 588 میکرو متر مربع افزایش پیدا می‌کنند. افزایش حفره‌ها موجب کاهش استحکام نهایی می‌شود. کاهش استحکام ناشی از افزایش حفره‌ها قبلاً توسط محققین [14,13] گزارش شده بود. بنابراین افزایش دما سبب کاهش استحکام می‌شود. همانطور که نتایج آزمون‌های کشش در جدول 1 نیز گویای صحت همین نتیجه است.

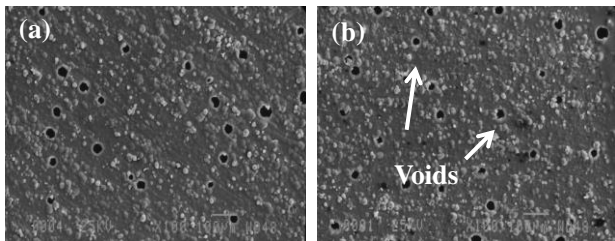


Fig. 3 Fracture surfaces of the neat adhesive at temperatures of (a) 40°C and (b) 50°C

شکل 3 سطوح شکست چسب خالص در الف) دمای 40 درجه سانتی‌گراد و ب) دمای 50 درجه سانتی‌گراد

### 3-2- نتایج آزمون خزش

به‌منظور درک اثر دما و سطح تنش بر رفتار خزشی، اتصالات چسبی در دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد و تحت نیرویی معادل با 25 و 35 درصد استحکام برشی نهایی مربوطه قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب چهار حالت ترکیبی دما و سطح تنش پدید می‌آید که به شناخت بهتر رفتار خزشی کمک خواهد کرد. برای حصول از دقت نتایج برای هر حالت، هر آزمون حداقل سه مرتبه تکرار شد و نتایج به‌صورت میانگین در جدول 2 گزارش گردیده است.

جدول 2 نتایج آزمون خزش اتصال تک لبه

Table 2 Creep test results of single lap adhesive joints

دما (°C)	تنش (٪ استحکام)	جابه‌جایی خزشی (mm)	شیب حالت پایدار (mm/min) ( $\times 10^{-6}$ )
40	25%	0.145	0.93
	35%	0.18	1.83
50	25%	0.175	1.39
	35%	0.2	2.5

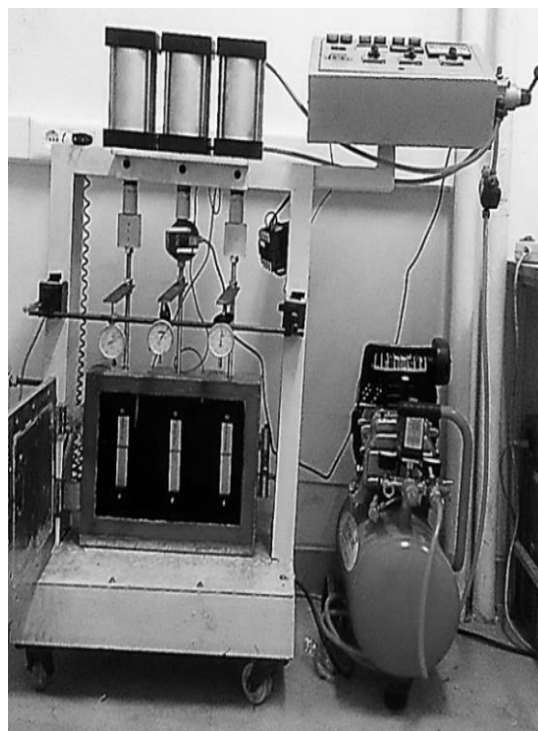


Fig. 2 Pneumatic creep test apparatus

شکل 2 دستگاه آزمون خزش پنوماتیکی

آزمون خزش بر مبنای استاندارد ASTM D 2294 [10] صورت گرفته است. پس از قرارگیری نمونه‌ها در محفظه، دما تا مقدار موردنظر بالا برده می‌شود و به نمونه‌ها 20 دقیقه فرصت داده می‌شود تا به شرایط دمایی پایا برسد؛ همچنین زمان انجام آزمایش از لحظه‌ی ثابت شدن نیرو، 4 ساعت است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که پس از 4 ساعت نرخ کرنش روند ثابتی دارد. بنابراین آزمون‌ها پس از 4 ساعت متوقف شدند.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- نتایج آزمون کشش

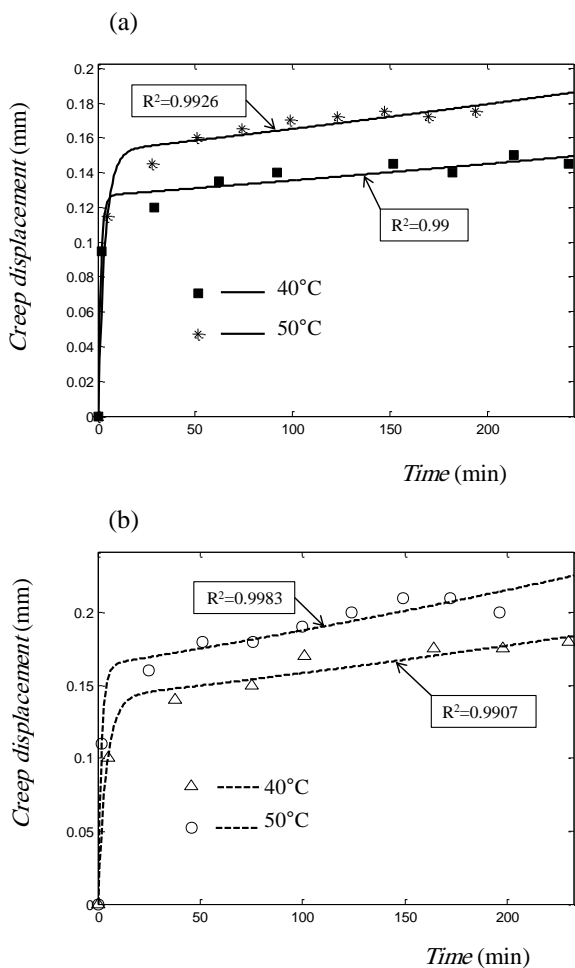
استحکام نهایی برشی اتصالات چسبی ساده تک لبه حاصل از انجام آزمایش کشش در دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد در جدول 1 نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است با افزایش دما، استحکام برشی نهایی چسب در دمای 50 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای 40 درجه سانتی‌گراد 22.8 درصد کاهش پیدا می‌کند. زیرا در دمای 50 درجه سانتی‌گراد، قسمت‌های بی‌نظم<sup>1</sup> بستر چسب قابلیت حرکت پیدا کرده و لذا استحکام نهایی چسب به شدت افت پیدا می‌کند. به‌منظور ارزیابی سطوح شکست اتصالات آزمون، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>2</sup> گرفته شد.

برای تصویربرداری از دستگاه SEM مدل JEOL JSM موجود در پژوهشکده دانشگاه صنعتی شریف استفاده شد. تصاویر SEM سطح شکست اتصال تک لبه در دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد در شکل 3 نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Amorphous

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope

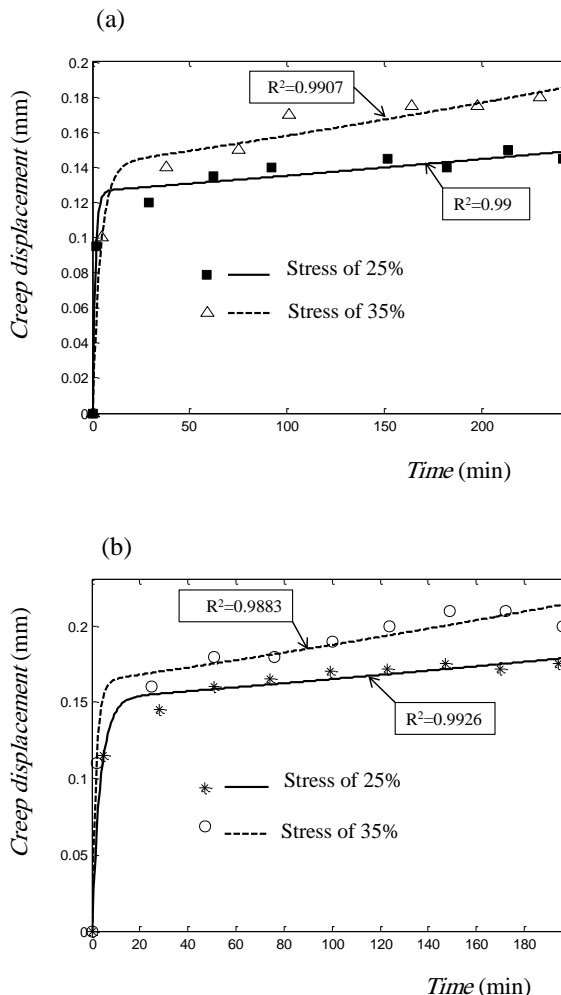
است. تاثیر دما بر خواص خزشی در بارگذاری برشی نیز توسط واسرمن و همکارانش [18] گزارش شده بود که نشان می‌داد دما تاثیر زیادی بر خزش چسب دارد. در اثر اعمال کشش محوری به نمونه آزمایش، زنجیره‌های مولکولی چسب نسبت به حالت اولیه کشیده شده و با جهت اعمال نیرو همراه می‌شوند. با افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، با کاهش سفتی زنجیره‌های پلیمری و افزایش نرم‌شدگی بستر چسب، تحرک زنجیره‌های پلیمری افزایش پیدا می‌کند. این رفتار با افزایش سطح تنش اعمالی شتاب بیشتری پیدا می‌کند.



**Fig. 5** Effect of increasing temperature on creep behavior of adhesive at (a) 25% of strength and (b) 35% of strength

شکل 5 اثر افزایش دما بر رفتار خزشی چسب در تنش الف) 25 درصد استحکام و ب) 35 درصد استحکام

همانگونه که در شکل 4 نشان داده شده است، با افزایش سطح تنش از 25 به 35 درصد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در دمای 40 درجه سانتی‌گراد، 24 و 96.7 درصد افزایش پیدا می‌کنند. همچنین در دمای 50 درجه میزان افزایش جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش به ترتیب برابر 14.3 و 79.9 درصد است.



**Fig. 4** Effect of stress on creep behavior of adhesive at temperatures of (a) 40°C and (b) 50°C

شکل 4 اثر تنش بر رفتار خزشی چسب در الف) 40 درجه سانتی‌گراد و ب) 50 درجه سانتی‌گراد

در شکل 5 اثر افزایش دما بر رفتار خزشی اتصال تک لبه‌ای در سطوح تنش ثابت نشان داده شده است. با افزایش سطح دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در سطح تنش 25 درصد به ترتیب 20.6 و 49.5 درصد افزایش می‌یابد. برای سطح تنش 35 درصد این مقادیر به ترتیب 11.1 و 36.6 درصد بوده است. با مقایسه افزایش مقادیر مربوط به پارامترهای خزشی، با توجه به سطوح در نظر گرفته شده برای تنش و دما، مشاهده می‌شود که اثر افزایش دما بر شتاب‌گیری رفتار خزشی در سطح تنش ثابت به مراتب قوی‌تر از اثر افزایش سطح تنش در دمای ثابت است. دلیل اثر قوی افزایش دما بر رفتار خزشی چسب را باید در سازوکارهای مولکولی مرتبط با افزایش دما جستجو کرد. افت خواص مکانیکی چسب تحت تاثیر افزایش دما توسط محققان بسیاری [15-17] گزارش شده

$$\Delta(t) = Ae^{bt} + Ce^{dt} \quad (1)$$

که در آن  $\Delta$  جابجایی خزشی،  $t$  زمان و  $A, C, b$  و  $d$  ثابت‌های خزش هستند که با استفاده از برازش منحنی‌های خزشی بدست می‌آیند.

<sup>1</sup> Curve Fitting

Sustained Load", The Journal of Adhesion, Vol. 90, No. 5-6, pp. 420-436, 2014.

[8] Allen, K. and Shanahan, M., "The Creep Behaviour of Structural Adhesive Joints-I", The Journal of Adhesion, Vol. 7, No. 3, pp. 161-174, 1975.

[9] "Astm-D3418, Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry", 2015.

[10] ASTM-D2294, "Standard Test Method for Creep Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal-to-Metal)", 1996 .

[11] ASTM-D2651, "Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding", Vol. 15, pp. 162-167, 1999.

[12] ASTM-D1002, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), 2010 .

[13] de Almeida, S. F. M. and Neto, Z. d. S. N., "Effect of Void Content on the Strength of Composite Laminates" Composite structures, Vol. 28, No. 2, pp. 139-148, 1994.

[14] Bowles, K. J. and Frimpong, S., "Void Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite-Fiber-Reinforced Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 10, pp. 1487-1509, 1992.

[15] Adams, R. Coppendale, J. Mallick, V. and Al-Hamdan, H., "The Effect of Temperature on the Strength of Adhesive Joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 12, No. 3, pp. 185-190, 1992.

[16] Banea, M. D. da Silva, L. F. and Campilho, R., "Effect of Temperature on the Shear Strength of Aluminium Single Lap Bonded Joints for High Temperature Applications" Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 28, No. 14-15, pp. 1367-1381, 2014.

[17] Adams, R. and Mallick, V., "The Effect of Temperature on the Strength of Adhesively-Bonded Composite-Aluminium Joints" The Journal of Adhesion, Vol. 43, No. 1-2, pp. 17-33, 1993.

[18] Wasserman, S. Dodiuk, H. and Kenig, S., "Shear Creep Behaviour of Elastomeric Adhesives" International journal of adhesion and adhesives, Vol. 12, No. 4, pp. 257-261, 1992.

جدول 3 مقادیر پارامترهای معادله برازش شده به داده‌های خزشی را نشان می‌دهد.

جدول 3 مقادیر پارامترهای معادله برازش شده به نتایج آزمایشگاهی خزش

**Table 3** The equation parameter values fitted to the creep experimental data

50		40		دما (°C)
35%	25%	35%	25%	تنش (% استحکام)
0.1635	0.1521	0.1416	0.1267	A
0.001375	0.0008261	0.001121	0.0006767	b
-0.1636	-0.152	-0.1415	-0.1266	C
-0.5556	-0.2775	-0.2404	-0.6882	d
0.988	0.993	0.991	0.99	R <sup>2</sup>

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر دما و سطح تنش بر رفتار خزشی اتصالات چسبی تک لبه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا آزمایش کشش اتصال ساده تک لبه در دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد انجام شده است. سپس آزمایش خزش کششی روی اتصالات در دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد، در دو سطح تنش 25 و 35 درصد استحکام نهایی برشی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش سطح تنش، منجر به تشدید رفتار خزشی ماده در دمای ثابت شد. با افزایش سطح تنش از 25 به 35 درصد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در دمای 40 درجه به ترتیب 24 و 96.7 درصد افزایش پیدا کردند. همچنین در دمای 50 درجه این میزان افزایش برابر 14.3 و 79.9 درصد بود. وضعیت مشابهی با افزایش دما پدید آمد. با افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در سطح تنش 25 درصد به ترتیب 20.6 و 49.5 درصد و در سطح تنش 35 درصد 11.1 و 36.6 درصد افزایش پیدا کرد. بنابراین مقادیر جابجایی خزشی اتصالات در دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد در سطح تنش 25% تفاوت زیادی داشتند. این تفاوت در سطح تنش 35% نیز مشاهده شد.

#### 5- مراجع

[1] Zehsaz, M. Vakili-Tahami, F. and Saeimi-Sadigh, M. A., "Parametric Study of the Creep Failure of Double Lap Adhesively Bonded Joints" Materials & Design, Vol. 64, pp. 520-526, 2014.

[2] Khalili, S. Jafarkarimi, M. and Abdollahi, M., "Creep Analysis of Fibre Reinforced Adhesives in Single Lap Joints—Experimental Study", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 29, No. 6, pp. 656-661, 2009.

[3] Peretz, D. and Weitsman, Y., "The Nonlinear Thermoviscoelastic Characterizations of Fm-73 Adhesives" Journal of Rheology (1978-present), Vol. 27, No. 2, pp. 97-114, 1983.

[4] Queiroz, R. A. Sampaio, E. M. Cortines, V. J. and Rohem, N. R., "Study on the Creep Behavior of Bonded Metallic Joints" Applied Adhesion Science, Vol. 2, No. 1, pp. 1-12, 2014.

[5] Costa, I. and Barros, J. A., "Creep of Structural Adhesives: An Overview", in Proceeding of .

[6] Han, X. Crocombe, A. Anwar, S. and Hu, P., "The Strength Prediction of Adhesive Single Lap Joints Exposed to Long Term Loading in a Hostile Environment" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 55, pp. 1-11, 2014.

[7] Han, X. Crocombe, A. Anwar, S. Hu, P. and Li, W., "The Effect of a Hot-Wet Environment on Adhesively Bonded Joints under a



## پیش‌بینی بار بحرانی کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با استفاده از رهیافت همبستگی ارتعاشی

داود شاهقلیان قهفرخی<sup>1</sup>، محمدرضا رأفت<sup>2</sup>، غلامحسین رحیمی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 141115-111، rahimi\_gh@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/2/18

پذیرش: 96/4/27

### کلیدواژگان:

پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی  
 روش همبستگی با ارتعاشات  
 کمانش  
 ساخت  
 تحلیل عددی

### چکیده

پوسته‌های کامپوزیتی به دلیل خواص منحصر‌به‌فردشان، یکی از سازه‌های پرکاربرد در صنایع هوایی، دریایی و خودروسازی می‌باشد. در دهه‌های اخیر تحقیقات بسیاری زیادی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش پوسته‌های کامپوزیتی، بدون خرابی یا شکست انجام شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های غیرمخرب، روش همبستگی ارتعاشی یا VCT می‌باشد. هدف تحقیق حاضر پیش‌بینی بار بحرانی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با استفاده از روش VCT می‌باشد. برای این منظور در ابتدا تحلیل ارتعاشات خطی و غیرخطی پوسته‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و در بارهای فشاری مختلف انجام شد. در مرحله‌ی بعد با استفاده از روش تحلیلی ریلی-ریتز و عددی، بار بحرانی کمانش خطی سازه مذکور محاسبه شد. سپس به کمک روش VCT بار بحرانی کمانش غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی پیش‌بینی شد. در ادامه و برای صحت سنجی نتایج روش VCT، پنج پوسته‌ی کامپوزیتی مشابه و با شرایط یکسان و با استفاده از روش پیچش الیاف ساخته شد و تحت آزمون فشار محوری قرار داده شد. در نهایت بار بحرانی کمانش تجربی به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف بار بحرانی کمانش غیرخطی پیش‌بینی شده به روش VCT با بار بحرانی کمانش به دست آمده از آزمایش تجربی کمتر از 3 درصد می‌باشد که این موضوع دال بر مناسب بودن روش VCT برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش با دقت بسیار بالا برای پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی می‌باشد.

## Prediction of the critical buckling load of composite cylindrical shells by using vibration correlation technique

Davoud Shahgholian-Ghahfarokhi, Mohammad-Reza Raafat, Gholam-Hossein Rahimi\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 141115-111, Tehran, Iran, rahimi\_gh@modares.ac.ir

### Keywords

Composite cylindrical shells  
 Vibration correlation technique  
 Buckling  
 Fabrication  
 Numerical analysis

### Abstract

Due to unique properties, composite cylindrical shells are used extensively in aviation, marine and automotive industry. In recent decades, several studies have been done to predict the critical buckling load of composite cylindrical shells without breakdown or failure. One of the most important non-destructive methods is Vibration Correlation Technique (VCT). The aim of this research is the prediction of the critical buckling load of composite cylindrical shells by using VCT. For this purpose, linear and nonlinear vibration analysis of composite cylindrical shells were performed in different compressive loads by using finite element software ABAQUS, firstly. In the next step, linear buckling critical load was determined by using Rayle-Ritz and numerical methods. Then, non-linear critical buckling load of composite cylindrical shells was predicted by using VCT. To validate the results of VCT, five composite cylindrical shells were fabricated by using filament winding method with same conditions and axial compression test was done. Finally, the critical buckling load was measured experimentally. The results show that the difference between the critical buckling load of VCT with experimental buckling load is less than 3%. This subject implies that VCT is suitable for prediction of critical buckling load of composite cylindrical shells with very high accuracy.

### 1-مقدمه

کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلفی نظیر هوافضا، دفاعی، سازه‌های دریایی و اتومبیل می‌باشند.

برای طراحی سازه‌های مختلف تحلیل‌هایی نظیر تحلیل استاتیکی، دینامیکی، ارتعاشی، شکست و کمانشی انجام می‌شود. از آن جایی که سازه‌های جدار نازک عموماً تحت بارهای فشاری قرار می‌گیرند، آنالیز کمانش یکی

با توجه به نیاز مبرم صنایع به سازه‌هایی با استحکام و سفتی بالا به همراه وزن پایین، پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی جدار نازک انتخاب مناسبی در این زمینه می‌باشند. در طی سالیان گذشته مواد کامپوزیتی از حوزه‌های آزمایشگاهی به حوزه‌های تجاری و صنعتی راه پیدا کرده‌اند و دارای

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Shahgholian-Ghahfarokhi, D. Raafat, M. R. and Rahimi, G. H., "Prediction of the critical buckling load of composite cylindrical shells by using Vibration Correlation Technique", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 359-368, 2018.

بار کمانش بدست می‌آید. آربلو و همکاران [9] به مطالعه عددی و تجربی روش VCT نوین پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که اگر از روش سوزا برای پوسته استوانه‌های ساده استفاده شود، مقدار  $E^2$  بدست آمده، یک عدد منفی خواهد بود و از نظر فیزیکی بدون معنا می‌باشد.

بیساگنی و همکاران [10] در سال 2015 با انتخاب سه پوسته استوانه کامپوزیتی ساده و از جنس کربن-اپوکسی، به‌عنوان نمونه، آزمون‌های کمانش استاتیکی و کمانش دینامیکی را روی آن انجام دادند. به‌علاوه نمونه‌ها را در نیروهای فشار محوری مختلف تحت آنالیز مودال تجربی قرار دادند تا تغییرات فرکانس طبیعی را با افزایش نیروی فشار محوری مشاهده نمایند. بیساگنی در این پژوهش ملاحظه با افزایش فشار محوری، فرکانس طبیعی سازه کاهش و ضریب دمپینگ آن افزایش می‌یابد. شاکیس و همکاران [11] در سال 2017 دو پوسته استوانه کامپوزیتی از جنس کربن-اپوکسی را به‌عنوان نمونه بررسی کردند. آن‌ها با انجام آزمایش آنالیز تجربی، تغییرات فرکانس طبیعی نمونه‌ها را با افزایش نیروی فشاری تا بار کمانش به دست آوردند تا به کمک آن بار بحرانی را تقریب بزنند. آن‌ها ملاحظه کردند وقتی که نیروی به‌کاررفته از صفر تا هشتاد درصد بار کمانش تجربی در نظر گرفته شود، همخوانی مناسبی بین بار کمانش تقریب زده شده و بار کمانش تجربی بحرانی وجود خواهد داشت و اگر در این محدوده نیروی فشاری، هیچ شکستی رخ ندهد، روش به‌کاررفته کاملاً یک روش غیر مخرب می‌باشد.

هدف این تحقیق پیش‌بینی بار کمانش با استفاده از روش VCT برای پوسته استوانه‌های کامپوزیتی ساده می‌باشد. ابتدا شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت می‌پذیرد و به کمک آن آنالیز عددی ارتعاشات خطی و غیرخطی در مقادیر مختلف بار فشارمحوری انجام شده و فرکانس طبیعی در بارگذاری مذکور بدست می‌آید. در مرحله بعد، به روش تحلیلی و عددی، بار کمانش پوسته استوانه کامپوزیتی بدون در نظر گرفتن نقایص هندسی، بدست می‌آید. سپس به کمک روش VCT مقدار بار کمانش بحرانی پیش‌بینی می‌گردد. در ادامه و برای صحت سنجی نتایج، پنج نمونه کاملاً مشابه و دارای شرایط یکسان ساخته می‌شود و با انجام آزمون فشار محوری، بار کمانش تجربی نمونه‌های ساخته شده بدست می‌آید. در نهایت نتایج حاصل از روش VCT با نتایج تجربی بدست آمده مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

## 2-مطالعه‌ی عددی

برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس نسخه 14-6 [12] استفاده شده است که از جمله نرم‌افزارهای المان محدود بسیار کاربردی در این حوزه می‌باشد. همچنین این بسته نرم‌افزاری به خاطر قابلیت گسترده‌ای که در مدل‌سازی مواد مختلف و نیز توانایی سفارشی کردن آن به وسیله برنامه نویسی دارا می‌باشد، در محیط‌های تحقیقاتی آکادمیک هم بسیار مورد استفاده است. پوسته استوانه کامپوزیتی به صورت shell در نظر گرفته شده و از المان S4R استفاده گردید.

## 2-1-مدل‌سازی هندسی

پوسته‌های مورد استفاده به صورت ساده در نظر گرفته می‌شوند. در این مرحله تنها یک پوسته با مشخصات هندسی نمونه آزمایش و به صورت پوسته با قطر داخلی 160، ضخامت 1.68 و طول 300 میلی‌متر در محیط نرم‌افزار ساخته می‌شود. برای مدل‌سازی بهتر، حلقه‌های اپوکسی در دو سر نمونه

از مهم‌ترین تحلیل‌های خرابی این نوع سازه‌ها می‌باشد. در سال 2003، کیدانه [1] مدل تحلیلی برای محاسبه بار کمانشی پوسته‌های کامپوزیتی ارائه کرد و با استفاده از مدل ارائه شده اثر پارامترهای زاویه، تعداد ریب، زاویه رشته‌پیچی و ضخامت پوسته بررسی شد. در سال 2010، هوسوکاوا و همکاران [2] به بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی چندلایه با شرط مرزی گیردار پرداخته و با استفاده از نتایج عددی، یک رابطه تقریبی برای محاسبه فرکانس طبیعی بدست آوردند.

در دهه‌های اخیر تحقیقات مختلفی برای ارتباط ارتعاشات با کمانش سازه‌های مختلف توسط محققین متعددی نظیر سامرفلد بیان شده است. که نتایج این تحقیقات منجر به ابداع روش‌های غیرمخرب برای پیش‌بینی بار کمانش گردید. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، روش همبستگی با ارتعاشات یا VCT<sup>1</sup> است که در واقع پل ارتباطی بین کمانش و ارتعاشات می‌باشد و بدون شکست، خرابی و رسیدن به ناپایداری، می‌توان بار کمانش سازه را پیش‌بینی نمود. این روش با توجه به تشابهات شکل‌مدهای ارتعاشی، کمانشی و برمیانی بدست آوردن فرکانس طبیعی سازه‌ی بارگذاری شده می‌باشد که با افزایش بار وارده، تغییرات فرکانس طبیعی را بدست می‌آورد و با استفاده از تغییرات به دست آمده بار بحرانی کمانش سازه مذکور را پیش‌بینی می‌کند. در سال 2002 یک جمع‌بندی مختصر از فرضیات، کاربردها، ابزار آزمایشات و نتایج روش VCT توسط سینگر و همکاران [3] منتشر گردید. این روش علاوه بر این که بار کمانش سازه‌های جدار نازک را پیش‌بینی می‌کند، قادر به تعیین شرایط مرزی حقیقی سیستم نیز می‌باشد. روش VCT ابتدا به‌طور موفقیت آمیزی برای تیرها و ستون‌های تحت بار محوری به کار گرفته شد. در ادامه این تجربه موفق، زمینه ساز استفاده از آن برای سازه‌های دیگر گردید.

در سال 2004، هون و همکاران [4] نشان دادند که شرایط مرزی اثر قابل ملاحظه‌ای بر بار کمانش پوسته‌های کامپوزیتی می‌گذارد. بنابراین VCT با تعیین شرایط مرزی حقیقی و فراهم آوردن اطلاعات بهتر برای شبیه‌سازی عددی، نقش به‌سزایی در این زمینه ایفا می‌کند. در سال 2015 آبراموویچ و همکاران [5] پیش‌بینی بار کمانش به کمک روش VCT را برای سه پل ساخته شده به همراه یک پوسته استوانه‌ای مقاوم بررسی کردند. آن‌ها مبنای کارشان را رفتار پس‌کمانش پایدار و ناپایدار سازه‌ها قرار دادند. بر خلاف پوسته که دارای رفتار پس‌کمانشی ناپایدار می‌باشد، پل‌ها دارای رفتار پس‌کمانشی پایدار هستند که اندازه‌گیری فرکانس طبیعی را تا بار کمانش تجربی واقعی میسر می‌سازد آبراموویچ و همکاران روش مناسبی برای استفاده از VCT برای پل‌ها ارائه کردند و نشان دادند که استفاده از این روش برای هر سه پل نتایج مناسبی به همراه دارد. اما آن‌ها نشان دادند که روش پیشنهاد شده برای پوسته استوانه تقویت شده مناسب نیست.

در سال 2014، جانسون و همکاران [6] تلاش فراوانی برای بهبود روش VCT انجام داده‌اند. آن‌ها ابزارهای نیمه تحلیلی برای توسعه و پیدایش نیمه‌کاربردی این روش برای پوسته‌ها معرفی کردند و اثرات غیرخطی وضعیت استاتیکی و نقایص هندسی را در نظر گرفته‌اند. برای غلبه بر کاستی‌های موجود برای برخی ساختارهایی نظیر پوسته‌ها که رفتار پس‌کمانشی ناپایدار دارند، یک روش جدید بر اساس روشی که توسط سوزا و همکاران [7,8] ارائه شد، معرفی گردید، در این روش از رابطه بین فشار محوری و فرکانس طبیعی،  $E^2$  به دست آمده است که  $E^2$  پارامتر ناک-دان<sup>2</sup> تجربی نامیده می‌شود و براساس نتایج آزمایش در بازه‌ی بارهای پایین و تا حدود 60 درصد

<sup>1</sup> Vibration Correlation Technique

<sup>2</sup> Knock-Down

نظر گرفتن 6 حال مختلف برای تعداد المان‌ها و سائز مش انجام شده است. همانگونه که در شکل 1 مشاهده می‌شود تعداد المان‌های مناسب برای شبیه‌سازی 39500 عدد می‌باشد که در این تعداد مش، بار بحرانی کمانش خطی سازه به همگرایی می‌رسد و مقدار آن 21.433 کیلو نیوتن به دست می‌آید. در شکل 2 تعداد شکل نهایی پوسته‌ی شبیه سازی شده دیده می‌شود.

جدول 1 خواص مکانیکی رزین اپوکسی و الیاف شیشه

مشخصه	الیاف شیشه	رزین اپوکسی و سخت کننده
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	1.281	1.0667
مدول الاستیسیته (GPa)	26.576	0.8817
ضریب پواسون [17]	0.22	0.36

جدول 2 خواص مکانیکی پوسته

مقادیر	خواص مکانیکی پوسته
1.138	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )
5.404 $E_1$	مدول الاستیسیته (GPa)
1.158 $E_2 = E_3$	
0.463 $G_{12} = G_{13}$	مدول برشی (GPa)
0.600 $G_{23}$	ضریب پواسون
0.329 $\nu_{12} = \nu_{13}$	
0.133 $\nu_{23}$	

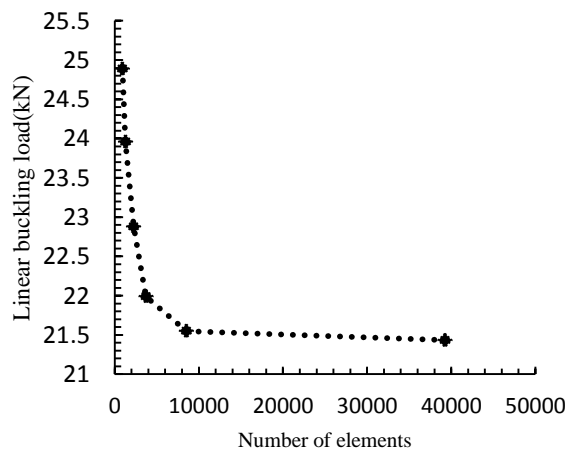


Fig. 1 Mesh convergencing study

شکل 1 مطالعه همگرایی مش



Fig. 2 Final model in Abaqus

شکل 2 مدل نهایی در آباکوس

مدل می‌شود و در بالا و پایین نمونه قرار داده می‌شوند تا شرایط مرزی دو سرگیردار اعمال گردد.

## 2-2- اعمال خواص مکانیکی به اجزاء

برای اختصاص خواص مکانیکی به پوسته، ماده الاستیک و اورتوتروپ انتخاب می‌شود. لایه‌های کامپوزیت را می‌توان از قسمت Composite layup ایجاد نمود. از آن جایی که ضخامت پوسته نسبت به سایر ابعاد آن ناچیز است، بایستی نوع المان را Conventional shell انتخاب نمود. برای تعریف لایه های کامپوزیت و زوایای رشته‌پیچی ابتدا بایستی یک دستگاه مختصات استوانه ای مجزا از دستگاه عمومی بر روی پوسته تعیین نمود. حال با توجه به محورهای مختصاتی که برنامه به این دستگاه اختصاص می‌دهد، زاویه چرخش مقادیر  $\pm 72$  درجه در دستگاه جدید نسبت به محور استوانه وارد می‌شود تا جهت رشته پیچی حول محور پوسته با محور طولی تعریف گردد. سپس تعداد 6 لایه با ضخامت 0.28 میلی‌متر برای پوسته تعریف می‌شود.

## 2-3- محاسبه خواص مکانیکی و استحکام نهایی تک لایه کامپوزیتی

خواص مکانیکی مواد به کمک تست و روابط میکرو مکانیک به دست آمده است. با توجه به مشکل بودن برخی از آزمایش‌ها خواص مکانیکی، و همچنین امکانات آزمایشگاهی موجود، مدول یانگ رزین و الیاف شیشه به کمک آزمون کشش مطابق استاندارد [13] ASTM D 638-03 و استاندارد [14] ASTM D 2256 بدست آمده و در (جدول 1) ارائه گردید. سپس با مراجعه به روابط میکرومکانیک لایه‌ها [15]، خواص مکانیکی و استحکام های پوسته محاسبه شدند (جدول 2). مقادیر ضریب پواسون نیز از مرجع [15]، برای رزین و الیاف شیشه استخراج شده است و مقادیر چگالی رزین و الیاف شیشه با اندازه گیری تجربی محاسبه شده است.

## 2-4- تعریف نوع حل و خروجی های مورد نظر

در این تحقیق ابتدا یک تحلیل کمانش خطی در abaqus/implicit برای بدست آوردن بار کمانش خطی پوسته استوانه کامپوزیتی بدون در نظر گرفتن نقایص هندسی صورت می‌پذیرد. در ادامه به کمک استپ استاتیک جنرال، تحلیل فرکانس غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی بودن هندسی و تغییرشکل‌های بزرگ برای پوسته استوانه بدون نقایص هندسی، انجام می‌گیرد تا با افزایش بار فشاری پوسته استوانه کامپوزیتی میزان کاهش فرکانس طبیعی مشخص گردد. در مرحله بعد نقایص هندسی با ضریب نقص اولیه (IMPERFECTION) 10 درصد ضخامت و با کیورد نویسی در مدل شبیه سازی شده اعمال می‌گردد تا تغییرات فرکانس طبیعی با افزایش بار فشار محوری بدست آمده، به واقعیت نزدیک‌تر گردد. لازم به توضیح می‌باشد که چون مقدار اختلاف در ضخامت‌های نمونه‌های ساخته شده نسبت به ماکزیمم ضخامت اندازه‌گیری شده 10 درصد بود مقدار نقص هندسی 10 درصد در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. همچنین این مقدار در جابه‌جایی‌های خطی به دست آمده از حل مقدار ویژه ضرب شده و در قسمت غیرخطی استفاده می‌شود که این کار به صورت توسط کیورد نویسی در نرم افزار انجام می‌گردد.

## 2-5- همگرایی مش

برای به دست آوردن نتایج عددی با دقت بالا، باید مطالعه‌ی همگرایی مش انجام و سائز مناسب مش به دست آورده شود. در این تحقیق این کار با در

ایجاد یک مسئله مقدار ویژه شده که با حل آن برای نیروی مجهول، تعداد زیادی مقادیر ویژه بدست می‌آید. کمترین مقدار ویژه بدست آمده برابر با بار بحرانی کمانش پوسته است.

$$\Pi = U - V \quad (6)$$

$$\delta \Pi = \sum \left( \frac{\delta \Pi}{\delta A_{mn}} \delta A_{mn} + \frac{\delta \Pi}{\delta B_{mn}} \delta B_{mn} + \frac{\delta \Pi}{\delta C_{mn}} \delta C_{mn} \right) = 0 \quad (7)$$

#### 4- ساخت نمونه

##### 4-1- مواد مصرفی

برای ساخت نمونه‌ها نیاز به رزین و الیاف می‌باشد. رزین مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها از نوع اپوکسی با ترکیب پلیمر اولیه CY219 و سخت‌کننده HY5161، تولید شده توسط شرکت شیمی افسون انتخاب شد که علت این انتخاب استحکام بالای آن، کاربرد بسیار زیاد در صنایع مختلف و در دسترس بودن آن می‌باشد و درصد ترکیب رزین به سخت‌کننده با نسبت 2 به 1 است. الیاف مورد استفاده نیز از جنس شیشه<sup>1</sup> و نوع ایبی انتخاب گردید که دارای استحکام بالا و نحوه‌ی پیچش مناسب می‌باشد.

##### 4-2- روش ساخت

نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پیچش الیاف و به روش رشته پیچی<sup>2</sup> ساخته شد. پس از آماده‌سازی رزین ابتدا یک قالب تفلونی بر روی محور دستگاه قرار می‌گیرد. سپس سطح قالب با استفاده از چسب مخصوص پوشانده می‌شود تا بعد از فرآیند پخت مشکلی در جدا کردن پوسته از قالب پیش نیاید. با تنظیم سرعت‌های خطی و دورانی دستگاه، زاویه رشته پیچی مورد نظر نسبت به محور استوانه تعیین می‌شود. در این پژوهش زاویه  $\pm 72$  درجه در نظر گرفته شده است. در نهایت با حرکت خطی و دورانی دستگاه پیچش، الیاف به دور قالب نصب شده بر روی مندریل دستگاه پیچیده شده و همزمان رزین اضافه می‌گردد. زمانی که ضخامت مطلوب حاصل شود فرآیند پیچش متوقف شده و نمونه پس از خشک شدن کامل به مدت 24 ساعت از داخل مندریل بیرون آورده می‌شود. در شکل 3، دستگاه و نمونه در حال ساخت دیده می‌شود. همانگونه که در جدول 3 نشان داده شده است، 5 نمونه ساخته شد، به طوری که هر یک از نمونه‌ها دارای طول میانگین 30 سانتی‌متر، قطر داخلی 16 سانتی‌متر و ضخامت پوسته 1.72 میلی‌متر می‌باشند.

##### 4-3- اعمال شرایط مرزی گیردار

برای اعمال شرایط مرزی و گیردار کردن دو انتهای پوسته‌های استوانه‌ای، در ابتدا دو حلقه اپوکسی در لبه‌های بالایی و پایینی نمونه‌ها ایجاد شده است. که در شکل 4 شکل نهایی نمونه‌های ساخته شده آمده است. در مرحله بعد دو فیکسچر فولادی ساخته می‌شود تا حلقه‌های اپوکسی ایجاد شده کاملاً درون آن قرار بگیرند و اجازه هرگونه جابجایی و دوران از لبه‌های پوسته استوانه‌ها گرفته شود و شرایط مرزی گیردار مورد نظر به‌طور کامل اعمال گردد. بدین ترتیب لبه‌های بالایی و پایینی پوسته استوانه به میزان 5 میلی‌متر توسط حلقه اپوکسی و به میزان 15 میلی‌متر توسط فیکسچر فلزی از داخل و خارج احاطه گشته‌اند تا شرایط مرزی گیردار مورد نظر به‌طور کامل اعمال گردد.

#### 3- محاسبه تحلیلی بار کمانش خطی

در این قسمت بار بحرانی کمانش پوسته‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی ساده با استفاده از روش ریلی-ریتز محاسبه خواهد شد. مطابق روش ریلی-ریتز انرژی کرنشی پوسته مطابق رابطه (1) [16] و کار نیروی خارجی مطابق رابطه (2) [17] بدست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi r} \int_0^L (N_x \varepsilon_x^0 + N_y \varepsilon_y^0 + N_{xy} \varepsilon_{xy}^0 + M_x \kappa_x + M_y \kappa_y + M_{xy} \kappa_{xy}) dx dy \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi r} \int_0^L P \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy \quad (2)$$

در روابط (1) و (2)، شعاع استوانه،  $r$  طول استوانه،  $L$  بار بحرانی کمانش،  $\varepsilon_x^0$ ،  $\varepsilon_y^0$ ،  $\varepsilon_{xy}^0$  و  $\kappa_x$ ،  $\kappa_y$ ،  $\kappa_{xy}$  کرنش‌ها و انحناهای سطح میانی در جهات مختلف می‌باشند که به ترتیب از رابطه (3) و (4) بدست می‌آیند [17]

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y^0 &= \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{r} \\ \varepsilon_{xy}^0 &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \kappa_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \kappa_y &= -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \kappa_{xy} &= -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

میدان تغییر مکان  $u$  و  $v$  و  $w$  توسط توابع قابل قبولی تعیین شدند. این توابع قابل قبول شرایط مرزی را ارضا می‌کنند. برای حالت تکیه‌گاه گیردار میدان تغییر مکان بصورت رابطه (5) می‌گردد.

$$\begin{aligned} u &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \cos(\bar{m}x) \sin(\bar{n}y) \\ v &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_{mn} \sin(\bar{m}x) \cos(\bar{n}y) \\ w &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} (1 - \cos(\bar{m}x)) \sin(\bar{n}y) \end{aligned} \quad (5)$$

در روابط (5)  $\bar{m} = \frac{m\pi}{L}$ ،  $\bar{n} = \frac{n\pi}{L}$  و  $y = r\theta$ ،  $m, n = 1, 2, 3, \dots$  می‌باشند.

لازم به توضیح است که در رابطه‌ی (1)،  $N_x$ ،  $N_y$  و  $N_{xy}$  منته‌های نیرویی و  $M_x$ ،  $M_y$  و  $M_{xy}$  منته‌های ممان می‌باشند. و با استفاده از تئوری کلاسیک لایه‌ها قابل محاسبه می‌باشند.

مطابق روش ریتز بار بحرانی کمانش زمانی به دست می‌آید که تابع انرژی پتانسیل (که از رابطه‌ی (6) به دست می‌آید) مینیمم گردد. برای این منظور با جایگذاری روابط (5) در روابط (3) و (4) و سپس جایگزینی در روابط (1) و (2) انرژی کرنشی و کار نیروی خارجی به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی (6) تابع انرژی پتانسیل بدست آمده که برای مینیمم نمودن آن مطابق رابطه‌ی (7) باید مشتق اول انرژی پتانسیل کل نسبت به ضرایب مجهول میدان جابجایی صفر شود [17]. این امر منجر به

<sup>1</sup> E-Glass

<sup>2</sup> Filament Winding



جدول ۳ مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده

تعداد دفعات	تعداد نمونه‌های ساخته شده	ارتفاع (mm)	ضخامت (mm)	قطر خارجی (mm)
60	5	300	1.68	160

همانند مرجع [14] از روش VCT نوین استفاده می‌شود. به این ترتیب که از مقادیر فرکانس طبیعی در بارهای فشاری مختلف استفاده می‌کنیم. ابتدا باید مقادیر  $(1-P)^2$  را بر حسب  $(1-F^2)$  بدست آورد. که در آن  $P = \frac{p}{P_{cr}}$  و  $F = \frac{f_m}{f_0}$  می‌باشد که در آن  $P$  بار فشار محوری،  $P_{cr}$  بار کمانش خطی پوسته،  $f_m$  فرکانس ارتعاشاتی مد اول در بار  $P$  و  $f_0$  فرکانس طبیعی مد اول پوسته بدون بار می‌باشد. سپس نقاط مختلف با استفاده از یک برازش درجه 2 به یکدیگر مرتبط می‌گردند (شکل 5). مقدار حداقل  $(1-P)^2$  بدست آمده از برازش منحنی، اندازه  $3^2$  را ارائه می‌دهد.  $3^2$  ظرفیت تحمل افت بار است که با پارامتر ناک-دان در ارتباط است و نحوه بدست آمدن آن در شکل 5 نشان داده شده است.

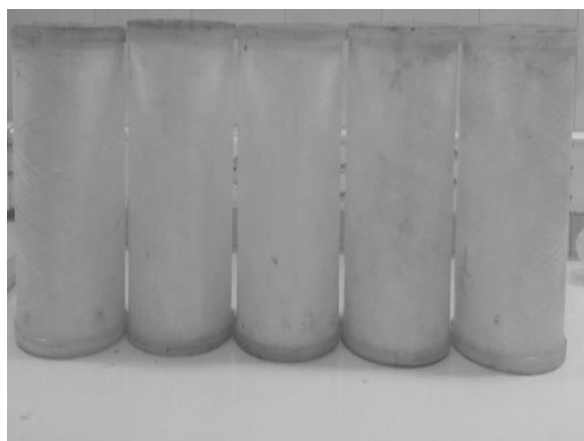


Fig. 4 Final specimens

شکل 4 نمونه ساخته شده نهایی

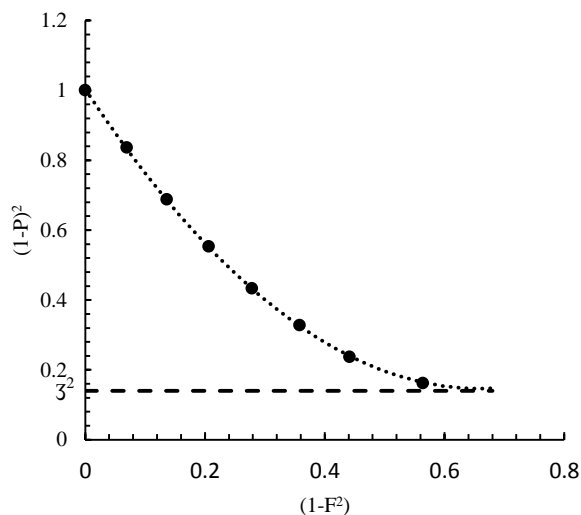


Fig. 5 Results of VCT by linear frequency

شکل 5 نمودار VCT رسم شده به کمک فرکانس‌های خطی

جدول 4 بار بحرانی کمانش خطی

اختلاف %	بار بحرانی کمانش (kN)	
	تحلیلی	شبیه‌سازی اجزا محدود
8.3	23.385	21.433

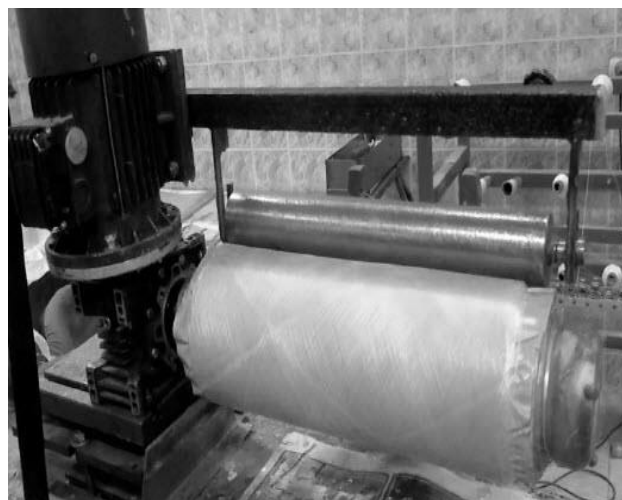


Fig. 3 Filament winding process

شکل 3 فرایند ساخت نمونه‌ها به روش رشته پیچی

## 5- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج به دست آمده از حل تحلیلی و شبیه‌سازی اجزا محدود کمانش خطی ذکر می‌گردند، سپس بار کمانش پیش‌بینی شده به روش VCT و با استفاده از تحلیل ارتعاشات خطی و غیرخطی بدست می‌آید و در مرحله آخر با انجام تست فشار و به دست آمدن نتایج تجربی، به مقایسه نتایج به دست آمده و کارایی روش VCT پرداخته خواهد شد. در نهایت نیز با تحقیقات دیگر محققان مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

### 5-1- بار کمانش خطی

یکی از موارد مورد نیاز و داده‌های ورودی روش VCT محاسبه بار بحرانی کمانش خطی می‌باشد. که در این تحقیق از دو روش تحلیلی و شبیه‌سازی اجزا محدود برای محاسبه بار کمانش خطی استفاده شده است. مطابق جدول 4 بار کمانش خطی بدست آمده از شبیه‌سازی اجزا محدود برابر با 21.433 kN و بار کمانش خطی محاسبه شده به روش تحلیلی برابر با 23.385 kN است. اختلاف نتایج به دست آمده 8.3 درصد می‌باشد. که این موضوع دال بر دقت شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد.

### 5-2- پیش‌بینی بار بحرانی کمانش با استفاده از روش VCT و به کمک

#### آنالیز ارتعاشات خطی

در این مرحله با استفاده از روش VCT و با انجام تحلیل ارتعاش خطی و با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ برای پوسته‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی، فرکانس طبیعی سازه‌ی مذکور در بارهای فشاری مختلف بدست می‌آید. با افزایش بار فشاری پوسته استوانه کامپوزیتی میزان کاهش فرکانس طبیعی مشخص می‌گردد. فرکانس طبیعی چهار مد اول ارتعاشات پوسته استوانه کامپوزیتی در جدول 5 ارائه شده است. برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش

استفاده از مقادیر  $3^2$  و بار کمانش خطی، بار کمانش پیش‌بینی شده به روش VCT و با استفاده از آنالیز ارتعاشات غیرخطی برابر با 14.641 kN بدست می‌آید.

جدول 6 فرکانس غیرخطی در بارهای فشاری مختلف

Table 6 Nonlinear frequency in the different compressive loads

بار فشار محوری (kN)	فرکانس طبیعی (Hz)			
	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم
0	312	402	412	586
2	301	393	406	563
4	290	384	399	539
6	278	374	392	513
8	265	363	384	485
10	250	349	376	453
12	232	332	365	415
13	206	293	350	362

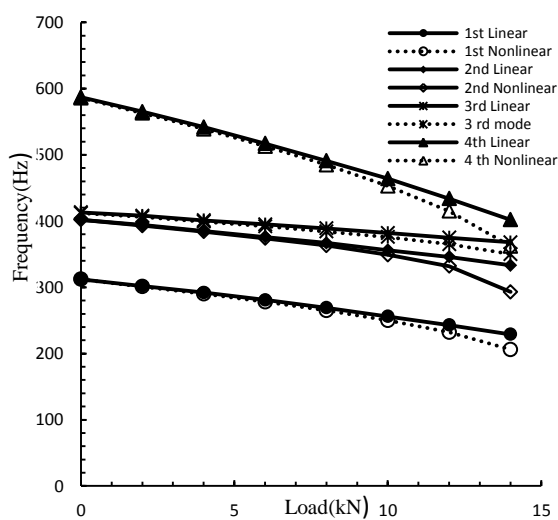


Fig. 6 The natural frequency of four modes of the nonlinear vibrations

شکل 6 فرکانس طبیعی چهار مود اول ارتعاشات غیرخطی

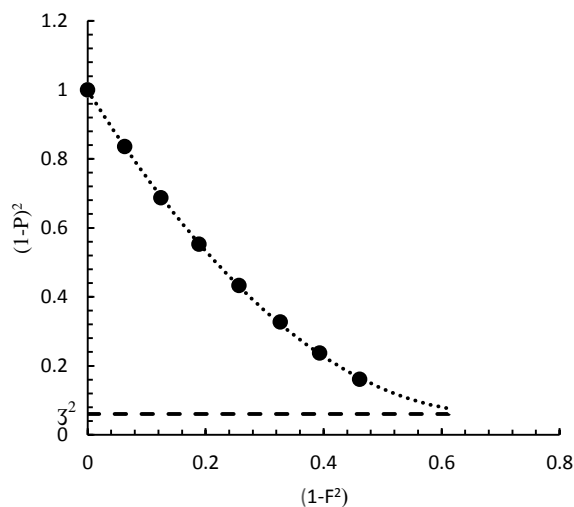


Fig. 7 Results of VCT by nonlinear frequency

شکل 7 نمودار VCT رسم شده به کمک فرکانس‌های غیرخطی

جدول 5 فرکانس خطی در بارهای فشاری مختلف

Table 5 Linear frequency in the different compressive loads

بار فشار محوری (kN)	فرکانس طبیعی (Hz)			
	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم
0	312	402	413	587
2	302	394	408	565
4	292	385	401	542
6	281	376	395	517
8	269	367	389	491
10	256	356	382	464
12	243	346	375	434
13	229	333	368	402

در ادامه به کمک رابطه (8) که از مرجع [14] استخراج شده است، مقدار بار کمانش پیش‌بینی شده بدست می‌آید. در این رابطه مقدار  $P_{cr}$  برابر با بار کمانش خطی است که به روش تحلیلی بدست آمده است. در نتیجه با جایگذاری مقادیر  $P_{cr}$  و  $3^2$  در رابطه (8) مقدار  $P_{VCT}$  که همان بار کمانش پیش‌بینی شده به روش VCT می‌باشد با استفاده از نتایج عددی ارتعاشات خطی بدست می‌آید.

$$P_{VCT} = P_{cr} \left(1 - \sqrt{3^2}\right) \quad (8)$$

با استفاده از نتایج به دست آمده در شکل 5 و استفاده از رابطه (8)، بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از روش VCT و نتایج عددی ارتعاشات خطی برابر 17.688 kN به دست آمد.

3-5- پیش‌بینی بار بحرانی کمانش با استفاده از روش VCT و به کمک

#### آنالیز ارتعاشات غیرخطی

با توجه به این موضوع که در عمل پوسته‌های ساخته شده به صورت آل نمی‌باشند و دارای نقص و عیوب هندسی می‌باشند. بنابراین تحلیل‌های خطی نمی‌تواند دقت کافی برای محاسبه یا پیش‌بینی بار بحرانی کمانش داشته باشد. بنابراین برای بررسی این موضوع در این قسمت علاوه بر در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ، اثرات نقایص هندسی نیز در نظر گرفته می‌شود. که برای در نظر گرفتن این موضوع در شبیه‌سازی‌های انجام شده اثر نقایص هندسی با ضریب نقص اولیه (IMPERFECTION) 10% اعمال می‌گردد تا تغییرات فرکانس طبیعی با افزایش بار فشار محوری بدست آمده و به واقعیت نزدیکتر گردد.

فرکانس طبیعی چهار مود اول ارتعاشات غیرخطی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی در جدول 6 ارائه شده است. نمودار شکل 6 نیز اختلاف فرکانس طبیعی خطی و غیرخطی را برای چهار مود اول نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است با افزایش فشار محوری، کاهش بیشتری در فرکانس طبیعی رخ می‌دهد که این ناشی از اثرات نقایص هندسی می‌باشد.

حال با استفاده از روش VCT و با استفاده از مقادیر فرکانس غیرخطی مداوم ارتعاشات در بارهای فشاری مختلف، پیش‌بینی بار بحرانی کمانش به روش مذکور انجام می‌شود. ابتدا مقادیر  $(1-P)^2$  بر حسب  $(1-F^2)$  بدست می‌آید و نقاط مختلف آن با استفاده از یک برآزش درجه دو به یکدیگر متصل می‌گردند. که نمودار آن به همراه  $3^2$  مربوطه در شکل 7 نشان داده شده است. مقدار  $3^2$  با استفاده از تحلیل ارتعاشات غیرخطی و مطابق با نمودار شکل 7 برابر با 0.1398 بدست آمد. در نتیجه به کمک رابطه (8) و با

## 4-4-آزمون فشار محوری

می‌دهد که با مدل عددی شبیه‌سازی شده تطابق مناسبی دارد. همانگونه که در جدول 9 مشاهده می‌شود ماکزیمم خطای فرکانس طبیعی پیش‌بینی شده با مدل المان محدود تحقیق حاضر 3.2 درصد می‌باشد که گویای دقت مدل المان محدود انجام شده در این تحقیق می‌باشد.

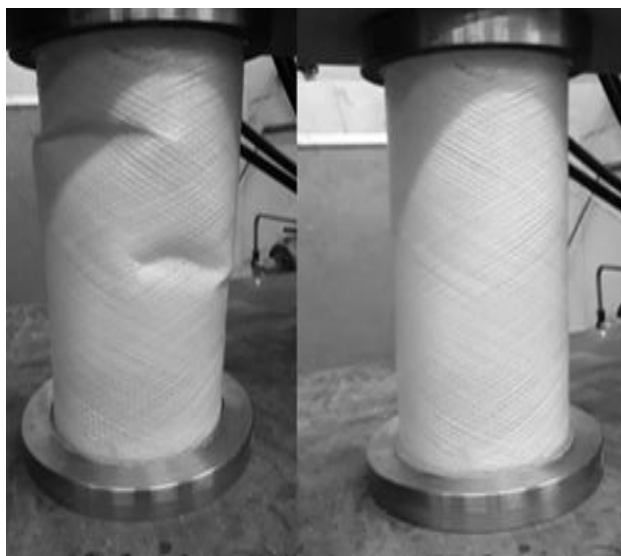


Fig.8 Specimen, before and after buckling

شکل 8 نمونه قبل و بعد کمانش

جدول 7 نتایج تجربی

Table 7 Experimental results

بار کمانش تجربی (kN)	شماره نمونه
15.0	1
14.2	2
13.6	3
14.4	4
14.3	5
14.30	میانگین

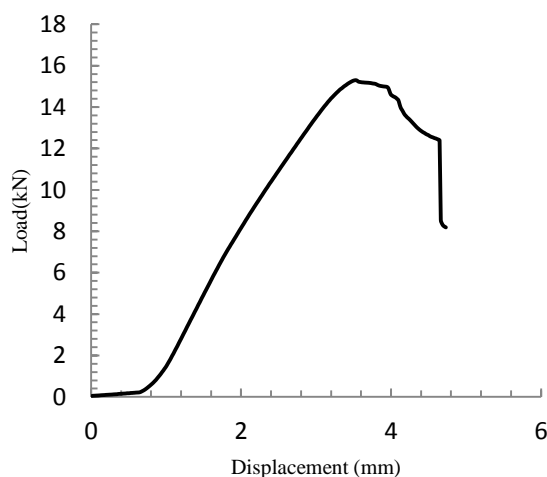


Fig.9 Load-Displacement graph of sample 1

شکل 9 نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه اول

تمامی پنج نمونه‌ی ساخته شده تحت آزمون فشار محوری قرار گرفتند تا مقدار بار کمانش بحرانی تجربی بدست آید و با بار کمانش پیش‌بینی شده مقایسه گردند. برای اعمال بار محوری بر روی پوسته‌های ساخته شده از دستگاه یونیورسال Shijin wdw.300e استفاده گردید که توانایی اعمال بار تا 100 KN را دارد. برای اعمال بار به نحو مطلوب از دو صفحه سنگ زنی شده که ما بین فیکسچر فلزی و فک دستگاه قرار بگیرد استفاده می‌شود. دستگاه در حالت کنترل جابجایی تنظیم شده و اعمال بار با حرکت سینی متحرک دستگاه صورت می‌گیرد، سرعت بارگذاری با توجه به استاندارد و موارد مشابه [18] 0.5 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. برای تنظیم و مشخص شدن دقت دستگاه بارگذاری و کالیبره بودن آن در حین بارگذاری از نمونه‌های استاندارد که در دسترس قرار داشت استفاده شد و قبل از شروع بارگذاری از صحت عملکرد دستگاه اطمینان حاصل شد. بارگذاری محوری تا یافتن بار بحرانی کمانش و خرابی نمونه ادامه می‌یابد.

شکل 8 نمونه قرار گرفته داخل دستگاه تست فشار را قبل و بعد کمانش نشان می‌دهد. بار کمانش تجربی پنج نمونه‌ی ساخته شده با انجام تست فشار محوری بدست آمد که در جدول 7 قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مقدار میانگین آن‌ها برابر با 14.30 kN می‌باشد. نمودار بار-جابه‌جایی نمونه‌ی بارگذاری شده اول در شکل 9 مشاهده می‌گردد.

## 5-5-مقایسه نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی بدست آمده

در این قسمت به بررسی کارایی روش VCT پرداخته می‌شود. و نتایج به دست آمده از این روش با نتایج به دست آمده از تست تجربی مقایسه می‌گردد تا کارایی و بازدهی روش مذکور مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور بار بحرانی کمانش به دست آمده از روش VCT به کمک آنالیز ارتعاشات خطی را  $P_{VCT,Linear}$ ، بار بحرانی کمانش به دست آمده از روش VCT به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی را  $P_{VCT,Nonlinear}$  و بار بحرانی کمانش تجربی را  $P_{EXP}$  می‌نامیم. همانگونه که در جدول 8 مشاهده می‌گردد اختلاف بار بحرانی پیش‌بینی شده به روش VCT به کمک آنالیز ارتعاشات خطی با بار کمانش بحرانی تجربی 19.15% می‌باشد که این اختلاف ناشی از شبیه‌سازی خطی مسئله می‌باشد و با توجه به اینکه نمونه‌های ساخته شده به صورت ایده‌آل نیستند و دارای نواقص هندسی در ساخت می‌باشند، این اختلاف به دست آمده قابل درک می‌باشد.

همانگونه که در جدول 8 مشاهده می‌شود اختلاف بار بحرانی پیش‌بینی شده به روش VCT به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی با بار کمانش بحرانی تجربی 2.30% می‌باشد که دیده می‌شود مقدار بسیار اندکی می‌باشد. بنابراین دیده می‌شود که روش VCT برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش روش مناسبی می‌باشد. در واقع بدون اینکه به سازه مورد نظر آسیب جدی وارد شود و یا بطور کامل تخریب گردد، می‌توان با استفاده از روش VCT بار بحرانی کمانش آن سازه را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود.

## 6-5-مقایسه نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی مراجع دیگر

برای اطمینان بیشتر از صحت مدل‌سازی المان محدود، در جدول 9 مدل المان محدود تحقیق حاضر، با نتایج تجربی مرجع [19] برای پوسته استوانه ساده ساخته شده از الیاف کربن و اپوکسی و شرایط مرزی گیردار-گیردار مقایسه شده است. نتایج به دست آمده با انجام آنالیز مودال تجربی و افزایش فشار محوری توسط مرجع [19] نیز روند کاهشی برای فرکانس نشان

## 7-5- بررسی اثر بازه‌های فشاری بر دقت پیش‌بینی به روش VCT

با توجه به اینکه دقت پیش‌بینی روش VCT وابسته به انتخاب بازه‌ی فشاری می‌باشد. بنابراین بررسی اثر بازه‌های فشاری بر دقت پیش‌بینی روش VCT بسیار مهم می‌باشد. برای پیدا کردن محدوده مناسب بار فشاری، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف فرکانس طبیعی در بازه‌های مختلف بار فشاری به پیش‌بینی بار کمانش می‌پردازیم.

از آنجا که استفاده از آنالیز ارتعاشات غیرخطی خطای کمتری داشت، در این قسمت از اطلاعات بدست آمده از این آنالیز استفاده می‌کنیم. بدین ترتیب که با استفاده از مقادیر فرکانس بدست آمده از آنالیز ارتعاشات غیرخطی از محدوده 38 درصد بار کمانش تجربی تا حدود 90 درصد آن، مقادیر  $3^2$  مربوطه بدست آمد و به کمک رابطه‌ی (8) بار کمانش پیش‌بینی شده محاسبه شد و با بار کمانش تجربی مقایسه و در جدول 10 ارائه گردید. همانگونه که در جدول 8 مشاهده می‌شود با افزایش بار فشار محوری خطای پیش‌بینی روش VCT نسبت به بار بحرانی تجربی به دست آمده کمتر می‌گردد. که دلیل آن نزدیک شدن به بار بحرانی تجربی می‌باشد. بنابراین بدیهی است که بهترین نتیجه بر ماکزیمم بار فشار محوری رخ می‌دهد. اما یکی از نتایج بسیار مهمی که از این مثال برداشت می‌شود تعیین حداقل بازه‌ی فشاری برای یافتن نتایج دقیق می‌باشد.

همانگونه که در جدول 8 مشاهده می‌شود، اگر بازه‌ی فشاری مساوی یا بزرگتر از 50 درصد بار تجربی به دست آمده در نظر گرفته شود، می‌توان نتایجی با دقت بالا و خطای کمتر از 10 درصد به دست آورد. بنابراین یکی از نتایج مهمی که در این تحقیق به دست آمده است، تعیین بازه‌ی فشار محوری می‌باشد.

## جدول 8 مقایسه‌ی نتایج

Table 8 Results Comparison

$P_{EXP}$	$P_{VCTNonlinear}$	$P_{VCTLinear}$
14.30	14.641	17.668
		(kN)
-	%2.33	%19.15
		درصد اختلاف با بار کمانش تجربی

## جدول 9 مقایسه نتایج با مرجع [19]

Table 9 Results Comparison with Res. [19]

نیروی فشار محوری (kN)	مدل المان محدود تحقیق حاضر (Hz)	نتایج تجربی مرجع [19] (Hz)	اختلاف (%)
0.09	224	217	3.2
2.18	219	212	3.2
4.16	214	208	2.8
6.16	209	204	2.4
8.2	203	199	1.9
10.55	197	194	1.1
12.77	191	188	1.1
15	184	183	1.0
17.57	176	175	1.0
19.42	171	170	1.0
20.63	165	166	1.0
22.4*	160	159	1.0

## جدول 10 بررسی اثر بازه‌های فشاری

Table 10 Effect of compressive ranges

$\frac{P_{VCTNonlinear} - P_{EXP}}{P_{VCTNonlinear}} \times 100$	$P_{VCTNonlinear}$	$\frac{P}{P_{EXP}} \times 100$
24.92	19.047	38
9.44	15.791	51
3.15	14.765	64
2.69	16.684	77
2.33	14.641	90

## 6- نتیجه‌گیری

پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی به دلیل استحکام بالا، وزن پایین و خواص مکانیکی ایده‌آل دارای کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلفی نظیر هوافضا، دفاعی، سازه‌های دریایی و اتومبیل می‌باشند. برای طراحی سازه‌های مختلف تحلیل‌هایی نظیر تحلیل استاتیکی، دینامیکی، ارتعاشی، شکست و کمانشی انجام می‌شود. از آن جایی که سازه‌های جدار نازک عموماً تحت بارهای فشاری قرار می‌گیرند، آنالیز کمانش یکی از مهم‌ترین تحلیل‌های خرابی این نوع سازه‌ها می‌باشد. در دهه‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های کامپوزیتی انجام شده است. یکی از روش‌های غیرمخرب ارائه شده برای پیش‌بینی بار کمانش، روش همخوانی با ارتعاشات یا VCT است که در واقع پل ارتباطی بین کمانش و ارتعاشات می‌باشد و با استفاده از این روش، بدون شکست، خرابی و رسیدن به ناپایداری، می‌توان بار کمانش سازه را پیش‌بینی نمود. در این تحقیق بار کمانش بحرانی پوسته‌های کامپوزیتی ساده با استفاده از روش VCT مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شد و تحلیل عددی ارتعاشات خطی و غیرخطی در مقادیر مختلف بار فشارمحوری انجام شده و فرکانس طبیعی در بارگذارهای مذکور بدست آمد. در مرحله‌ی بعدی بار کمانش خطی به روش تحلیلی و عددی به دست آورده شده و مورد مقایسه قرار گرفته شد. سپس به کمک روش VCT بار بحرانی کمانش با استفاده از آنالیز ارتعاشات خطی و غیرخطی انجام شده، به دست آمد. در نهایت برای بررسی و صحت سنجی نتایج پیش‌بینی شده نمونه‌های تجربی ساخته شدند و تحت آزمایش فشار قرار گرفته شدند. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده در این تحقیق عبارتند از:

1- اختلاف بار بحرانی کمانش خطی به دست آمده از روش تحلیلی و عددی 8.3% می‌باشد.

2- بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از روش VCT و به کمک آنالیز ارتعاشات خطی 17.668 کیلو نیوتن به دست آورده شد. همچنین بار کمانش تجربی به دست آمده برابر 14.30 کیلو نیوتن به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، اختلاف نتایج پیش‌بینی شده VCT به کمک آنالیز ارتعاشات خطی با نتایج تجربی برابر 19.15% درصد می‌باشد که این اختلاف با توجه به این مطلب که نمونه‌های ساخته شده به صورت ایده‌آل نیستند و دارای عیوب و نقص‌های هندسی می‌باشند، قابل درک می‌باشد.

3- بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از روش VCT و به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی 14.641 کیلو نیوتن به دست آورده شد. اختلاف نتایج پیش‌بینی شده VCT به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی با نتایج تجربی برابر 2.33% درصد می‌باشد که این موضوع دال بر مناسب بودن روش VCT برای پیش‌بینی نتایج با دقت بسیار بالا برای پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی ساده می‌باشد.

۴- روش VCT روش مناسبی برای پیش‌بینی بار کمانش بحرانی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی ساده می‌باشد و بدون ناپایداری، خرابی و شکست سازه قادر به پیش‌بینی بار بحرانی کمانش می‌باشد. این روش در بازه تغییرات فشاری مساوی یا بزرگتر از 50 درصد بار تجربی، می‌تواند نتایجی با دقت بالا و خطای کمتر از 10 درصد، برای پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی ساده به دست آورد.

#### 7-مراجع

- [1] Kidane, S. Li. G. Helms, J. Pang, S. S. and Woldeesenbet, E., "Buckling Load Analysis of Grid Stiffened Composite Cylinders," *Composites: Part B Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-9, 2003.
- [2] Hosokawa, K. Murayama, M. and Sakata, T. T., "Free Vibration Analysis of Angle-ply Laminated Circular Cylindrical Shells with Clamped Edges," *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol. 9, No. 1, pp. 67-80, 2000.
- [3] Singer, J. Arboez, J. and Weller, T., "Buckling Experiments, Shells, Built-up Structures", *composites and additional topics*, Vol. 2. John Wiley & Sons, 2002.
- [4] Hühne, C. Zimmermann, R. Rolfes, R. and Geier, B., "Sensitivities to Geometrical and Loading Imperfections on Buckling of Composite Cylindrical Shells," *European Conference on Spacecraft 2002*.
- [5] Abramovich, H. Govich, D. and Grunwald, A., "Buckling Prediction of Panels Using the Vibration Correlation Technique," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 78, No. 1, pp. 62-73, 2015.
- [6] Jansen, E. L. Abramovich, H. and Rolfes, R., "The Direct Prediction of Buckling Loads of Shells Under Axial Compression Using VCT—Towards an Upgraded Approach," in *Proceedings of the 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2014.
- [7] Souza, M. A. and Assaid, L. M. B., "A new technique for the Prediction of Buckling Loads from Nondestructive Vibration Tests," *Experimental Mechanics*, Vol. 31, No. 2, pp. 93-97, 1991.
- [8] Souza, M. A. Fok, W. C. and Walker, A. C., "Review of Experimental Techniques for Thin-walled Structures Liable to Buckling: Neutral and Unstable Buckling," *Experimental Technology*, Vol. 7, No. 9, pp. 21-25, 1983.
- [9] Arbelo, M. A., "Vibration Correlation Technique for the Estimation of Real Boundary Conditions and Buckling Load of Unstiffened Plates and Cylindrical Shells," *Thin-Walled Structure*, Vol. 1, No.1, pp. 1-10, 2014.
- [10] C. Bisagni., "Composite Cylindrical Shells under Static and Dynamic Axial Loading: An experimental campaign," *Prog. Aerosp. Sci.*, Vol. 78, pp. 107-115, 2015.
- [11] E. Skukis, O. Ozolins, K. Kalnins, and M. A. Arbelo, "Experimental Test for Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical shells by Vibration Correlation Technique," *Procedia Eng.*, Vol. 172, pp. 1023-1030, 2017.
- [12] Abaqus, C. A. E., "User's manual," *Abaqus Anal. User's Man.*, 2016.
- [13] American Society for Testing and Materials, "ASTM D 638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," Pennsylvania, 2002.
- [14] American Society for Testing and Materials, *ASTM D 2256 Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method*. 2010.
- [15] Gibson, R. F, *Principles of composite material mechanics*. CRC press, 2016.
- [16] Amabili, M., "Nonlinear Vibrations and Stability of Shells and Plates", Cambridge University Press, 2008.
- [17] Reddy, J. N., "Energy Principles and Variational Methods in Applied Mechanics", John Wiley & Sons, 2002 .
- [18] Buragohain, M. and Velmurugan, R., "Study of Filament Wound Grid-stiffened Composite Cylindrical Structures," *Composites Structure*, Vol. 93, No. 1, pp. 1031-038, 2011.
- [19] Kalnins, K. Arbelo, M. A. Ozolins, O. Skukis, E. Castro, S. G. P. and Degenhardt, R., "Experimental Nondestructive Test for Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical Shells Using Vibration Correlation Technique," *Shock and Vibration*, Vol. 2015, 2015.





نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## مقایسه‌ی رفتار خوردگی پوشش‌های کامپوزیتی Fe-Ni-Cr تقویت شده توسط نانوذرات کاربید سیلیسیم و نانولوله‌های کربنی

حسین سلطانی<sup>1</sup>، مجید طاووسی<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

\* اصفهان، شاهین‌شهر، ma.tavoosi@gmail.com

## اطلاعات مقاله

دریافت: 96/2/12

پذیرش: 96/3/27

## کلیدواژگان:

رسوب‌دهی الکتریکی

پوشش‌های آمورف-نانوکریستال

پوشش‌های کامپوزیتی

خوردگی

## چکیده

هدف از این پژوهش بررسی رفتار خوردگی پوشش‌های کامپوزیتی Fe-Ni-Cr تقویت شده توسط نانوذرات کاربید سیلیسیم و نانولوله‌های کربنی می‌باشد. در این راستا و به منظور ایجاد پوشش‌های مورد نظر، فرایند رسوب‌دهی الکتریکی در یک حمام کلریدی، در حضور و عدم حضور تقویت کننده‌های کاربید سیلیسیم و نانولوله‌های کربنی انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری توسط پراش‌سنجی پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و بررسی رفتار خوردگی به روش آنالیز پتانسیو استات در الکترولیت 3.5% NaCl انجام شد. نتایج نشان داد که پوشش آمورف-نانوکریستال Fe-Ni-Cr در چگالی جریان‌های کم به علت وجود ریزترک کمتر دارای بهترین رفتار خوردگی است. بررسی رفتار خوردگی پس از عملیات حرارتی (در دمای 250 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 10 ساعت) نیز نشان داد که با انجام تبلور فاز آمورف در پوشش، مقاومت خوردگی بهبود می‌یابد. رفتار خوردگی با کامپوزیتی کردن پوشش‌های بهبود یافت به گونه‌ای که بالاترین مقاومت خوردگی در حضور نانوذرات تقویت کننده‌ی کاربید سیلیسیم در پوشش به دست آمد.

## The comparison in corrosion behavior of Fe-Ni-Cr composite coatings reinforced by SiC nanoparticles and carbon nanotubes

Hossein Soltani, Majid Tavoosi

Department of Materials engineering, Malek-Ashtar University of Technology (MUT), Isfahan, Iran.  
Isfahan, Iran, ma.tavoosi@gmail.com

## Keywords

Electrodeposition  
Amorphous-nanocrystalline coatings  
Composite coatings  
Corrosion

## Abstract

In this study, the corrosion behavior of Fe-Ni-Cr composite coatings reinforced by SiC and carbon nanotube (CNT) has been investigated. In this regards, the electrodeposition processing has been done in a chloride bath in the presence of SiC nanoparticles and carbon nanotubes. The prepared coatings were characterized using X-ray diffraction (XRD) and field emission scanning electron microscopy (FESEM). The corrosion behavior of coatings was also examined in NaCl 3.5% electrolyte by potentiostat analysis. The results showed that, the prepared amorphous - nanocrystalline Fe-Ni-Cr coating in lower current densities has higher corrosion behavior due to lower density of micro-cracks in coat. The annealing process and the crystallization of amorphous phase (at 250°C for 10 h) had the positive effects on corrosion resistance of prepared coats. The corrosion resistance of composite coatings was higher than alloyed coatings. In this condition, the highest corrosion resistance was achieved in the presence of SiC nanoparticle in the coats.

## 1- مقدمه

جوانه‌زنی و رشد در حین تبلور، امکان حصول ساختارهای نانوکریستال نیز وجود دارد. به دلیل عدم حضور نظم بلند دامنه در ساختار مواد آمورف، رفتار خوردگی این مواد با رفتار خوردگی مواد نانوکریستال و مواد کریستالی معمول متفاوت است [1-4]. با توجه به این نکته، درک ارتباط بین ریزساختار و خواص خوردگی این مواد از دو نظر مهندسی و الکتروشیمیایی حائز اهمیت است.

روش‌های متعددی همچون آلیاژسازی مکانیکی، فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، روش‌های برمبنای رسوب از فاز بخار، روش‌های مبتنی بر

مواد آمورف یا شیشه‌ها، جامدات بی نظمی هستند که نظم در مقیاس وسیع مشابه مواد کریستالی در آن‌ها وجود ندارد. عدم وجود نظم و انواع نواقص ساختاری (از قبیل مرزخانه‌ها، نابجایی‌ها و غیره) در این مواد، خواص آن‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار داده و سبب شده ساختارهای حاصل، از خواص متفاوتی نسبت به ساختارهای کریستالی معمول برخوردار باشند. این مواد بسیار ناپایدار هستند و با انجام عملیات حرارتی مناسب و از طریق مکانیزم جوانه‌زنی و رشد، به ساختارهای کریستالی تبدیل می‌شوند. با کنترل شرایط

## Please cite this article using:

Soltani, H. and Tavoosi, M., "The comparison in corrosion behavior of Fe-Ni-Cr composite coatings reinforced by SiC nanoparticles and carbon nanotubes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 369-376, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

تیلور و همچنین ایجاد ساختارهای کامپوزیتی در حضور نانو ذرات کاربید سیلیسیم و نانولوله‌های کربنی بر رفتار خوردگی پوشش‌های حاصل مورد بررسی واقع شود.

## 2- مواد و روش آزمایش‌ها

فرایند پوشش‌دهی با استفاده از یک حمام کلریدی شامل کلریدهای آهن، نیکل و کروم به همراه پایدارسازها و ترکیب‌های کمپلکس کننده با ترکیب ارائه شده در جدول 1 صورت گرفت. فرایند رسوب‌دهی با جریان مستقیم (در چگالی جریان‌های 10، 20، 30 و 40 آمپر بر دسی متر مربع)، در  $\text{pH} = 1$  و بر روی زیر لایه‌ای از جنس فولاد کم کربن ST12 به عنوان کاتد و گرافیت فشرده به عنوان آند انجام شد. زیرلایه‌های مورد استفاده به شکل مستطیل‌هایی با ابعاد 20 در 60 میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر تهیه شدند. سطح کاتد به گونه‌ای با استفاده از لاک پوشاننده شد که تنها 5 سانتی‌متر مربع از سطح آن در تماس با الکترولیت قرار گیرد.

زیرلایه‌ها پس از سمباده‌زنی و پولیش با استفاده از استون شستشو و جری‌زدایی شدند. پس از تعیین بهترین چگالی جریان پوشش‌دهی، عملیات حرارتی در مورد پوشش‌های بهینه در دمای 250 درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف (2 الی 10 ساعت) و در اتمسفر آرگون انجام شد. فرایند رسوب‌دهی پوشش‌های کامپوزیتی نیز تحت شرایط بهینه‌ی پوشش‌دهی و با ترکیب حمامی مشابه نمونه‌های آلیاژی صورت گرفت. در این مورد، یک درصد وزنی از نانوذرات کاربید سیلیسیم ساخت شرکت US Research Nanomaterials آمریکا (SiC, beta, 99%, 45-70 nm) و همچنین یک درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی چندجداره ساخت شرکت US Research Nanomaterials آمریکا ( $\text{MWCNTs}$ , >95%, OD: <7nm) به حمام مورد نظر وارد و فرایند رسوب‌دهی در شرایطی مشابه انجام شد. در طی فرایند و به منظور جلوگیری از ته‌نشین شدن نانوذرات و حفظ پراکندگی آن‌ها در محلول، حمام توسط همزن مغناطیسی با سرعت 200 دور در دقیقه همزده شد.

**جدول 1** ترکیب شیمیایی حمام مورد استفاده جهت ایجاد پوشش‌های آلیاژی و کامپوزیتی

**Table 1** Bath compositions for electrodeposition of alloy and composite coatings

غلظت	نام ماده
5 گرم در لیتر	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
25 گرم در لیتر	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
100 گرم در لیتر	$\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
15 گرم در لیتر	KBr
50 گرم در لیتر	$\text{NH}_4\text{Cl}$
30 گرم در لیتر	$\text{H}_3\text{BO}_3$
80 میلی‌لیتر در لیتر	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
40 میلی‌لیتر در لیتر	HCOOH

از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس دستگاه مدل X'Pert Pro MPD ساخت شرکت Panalytical هلند ( $40\text{kV}$ ,  $\lambda = 0.154\text{ nm}$ ) جهت بررسی ریز ساختار پوشش‌های آلیاژی آمورف-نانوکریستال حاصل از رسوب‌دهی الکترونیکی و همچنین پوشش‌های کامپوزیتی استفاده شد. محاسبات مربوط به تعیین اندازه دانه‌های کریستالی پوشش‌های حاصل نیز توسط آنالیز الگوهای

انجماد سریع و روش‌های رسوب از محلول تاکنون برای دستیابی به ساختارهای آمورف و نانوکریستال ارائه شده است [5]. در میان روش‌های مختلف، فرایند رسوب‌دهی الکترونیکی به دلیل مزایایی همچون عدم نیاز به ایجاد خلاء، استفاده از تجهیزات ارزان قیمت، محدود نبودن شکل قطعات، عدم نیاز به مهارت بالای اپراتور، به طور گسترده برای ایجاد پوشش‌های مناسب مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. در این فرایند، رسوب‌دهی پوشش از یک محلول الکترولیت بر روی کاتد، هنگامی که یک جریان خارجی به سیستم اعمال گردد، اتفاق می‌افتد. با به-کارگیری این روش امکان سنتز پوشش‌هایی از فلزات خالص، آلیاژها و کامپوزیت‌ها وجود دارد [2]. تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که با انتخاب مناسب مشخصه‌های رسوب‌دهی الکترونیکی از قبیل ترکیب حمام، اسیدیته، دما، چگالی جریان و غیره می‌توان به موادی با اندازه دانه‌های کریستالی نانومتری و حتی آمورف دست یافت. در این رابطه انتخاب متغیرهای یاد شده باید به گونه‌ای انجام شود که سرعت جوانه‌زنی حداکثر و سرعت رشد حداقل ممکن باشد [3].

رسوب‌دهی کامپوزیتی، که شامل رسوب همزمان ذرات تقویت کننده در حین پوشش‌دهی است، به منظور بهبود خواص پوشش مانند مقاومت سایشی، خوردگی و سختی پوشش، انجام می‌شود [4-5]. به طور معمول استفاده از ذرات سرامیکی میکرومتری به عنوان تقویت کننده، باعث بهبود استحکام پوشش‌های فلزی می‌شود، با این حال چقرمگی ساختارهای کامپوزیتی حاصل، بسیار ناچیز است [6]. پیشرفت تکنولوژی و جهت‌گیری آن به سمت فناوری نانو، سبب رویکرد محققین به سمت رسوب همزمان ذرات با اندازه نانو در زمینه فلزی شده است. در چند دهه گذشته، پوشش‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانوذرات سرامیکی به سبب سختی بالا، مقاومت به سایش و خوردگی زیاد در مقایسه با پوشش‌های آلیاژی یا فلزی خالص توسعه و گسترش یافته‌اند [7]. در این رابطه نیز تمایل بسیار زیادی برای فهم تاثیر ذرات تقویت کننده بر خواص خوردگی پوشش‌های کامپوزیتی وجود دارد.

ایجاد پوشش‌های آلیاژی-کامپوزیتی توسط فرایند رسوب‌دهی الکترونیکی بسیار پیچیده بوده و نیاز به کنترل دقیق مشخصه‌های فرایند رسوب‌دهی، ترکیب حمام و دقت اپراتور دارد [6-9]. در میان انواع مختلف پوشش‌های آلیاژی حاصل از رسوب‌دهی الکترونیکی، پوشش‌های آهن-کروم-نیکل به دلیل مقاومت خوردگی مناسب، توسط محققین مختلف مورد بررسی واقع شده‌اند [10-18]. به عنوان نمونه‌ای از این فعالیت‌ها می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط ژیانگخو و همکاران [15]، دولتی و همکاران [13] و همچنین عادلخوئی و همکاران [16] در زمینه‌ی ایجاد موفق پوشش‌های آلیاژی آهن-کروم-نیکل توسط فرایند رسوب‌دهی الکترونیکی اشاره نمود. در این تحقیقات بیان شده است که با کنترل دقیق مشخصات فرایند رسوب‌دهی، امکان کنترل درصد عناصر آلیاژی و به خصوص کروم در پوشش وجود داشته و پوشش‌های حاصل از ساختار آمورف-نانوکریستال برخوردار خواهند بود.

در هر حال، بیشتر تحقیقات انجام شده در رابطه با پوشش آمورف-نانوکریستال آهن-نیکل-کروم توسط فرایند رسوب‌دهی الکترونیکی، در زمینه‌ی بررسی تاثیر شرایط رسوب‌دهی بر ترکیب شیمیایی پوشش تمرکز داشته است و تحقیقات کمی در رابطه با تاثیر عملیات حرارتی و همچنین ایجاد ساختارهای کامپوزیتی بر رفتار خوردگی این پوشش‌ها انجام گرفته است. با توجه به این نکته، در تحقیق حاضر تلاش شده تا ضمن بررسی تاثیر چگالی جریان رسوب‌دهی بر ساختار و خواص پوشش‌های آلیاژی، تاثیر فرایند



طبق مدل ترمودینامیکی مدیما [20] رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات انرژی آزاد گیبس سیستم آلیاژی دوجزئی Fe-Ni در حالت محلول جامد و آمورف با افزایش درصد آهن در ابتدا کاهش یافته و در مقدار 50 درصد مولی آهن به کمترین مقدار خود می‌رسد. در ادامه مجدداً تغییرات انرژی آزاد گیبس روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. انجام این تغییرات در نمودار با توجه به گرمای انحلال متفاوت آهن در نیکل (-9.61 kJ/mol) و نیکل در آهن (-9.16 kJ/mol) قابل تفسیر است. در واقع این تفاوت تاثیر قابل توجهی بر تغییرات انرژی آزاد گیبس ترکیب نهایی با تغییر درصد عناصر سازنده خواهد داشت. علاوه بر تاثیر تغییر ترکیب بر تغییرات انرژی آزاد گیبس، نوع ساختار حاصل شامل محلول جامد، ترکیب‌های بین‌فلزی و همچنین ساختار آمورف بر نتایج محاسبات انجام گرفته بر مبنای مدل ترمودینامیکی مدیما تاثیرگذار است. همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، تغییرات انرژی آزاد گیبس ناشی از تشکیل محلول جامد در تمامی محدوده‌ی ترکیب شیمیایی کمتر از فاز آمورف است. این موضوع نشان می‌دهد که تمایل گروه ترکیبی مورد بررسی در تشکیل فاز محلول جامد بسیار بالاتر از فاز آمورف است.

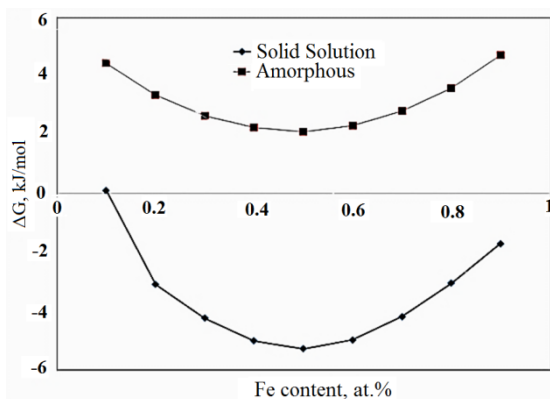


Fig. 2 The Gibbs free energy change of formation of amorphous and solid solution

شکل 2 نمودار تغییر انرژی آزاد گیبس تشکیل فازهای آمورف و محلول جامد در سیستم آلیاژی Fe-Ni بر حسب میزان آهن.

تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن است که با افزودن یک جزء جدید همچون کروم به آلیاژ، توانایی تشکیل فاز آمورف در آن افزایش می‌یابد. در این راستا، درصد‌های وزنی عناصر آهن، نیکل و کروم در پوشش‌های حاصل از چگالی جریان‌های مختلف در جدول 2 ارائه شده است. با توجه به این جدول، با افزایش چگالی جریان، تغییرات قابل توجهی در درصد عنصر کروم در پوشش رخ نداده و در نتیجه، این موضوع نمی‌تواند در تحلیل افزایش توانایی تشکیل فاز آمورف با افزایش چگالی جریان در گروه ترکیبی مورد بحث موثر باشد. همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی جریان، مقدار کروم از حدود یک درصد وزنی تا 2.6 درصد افزایش یافته و میزان تغییرات آهن و نیکل تقریباً کاهشی است. اگرچه این روند با نتیجه تحقیقات گذشته همخوانی دارد [13-15]، میزان کروم حاصل در این تحقیق، تفاوت زیادی با میزان کروم در پوشش‌های مشابه مورد مطالعه توسط سایر محققان داشت. برای مثال ژبانگو و همکاران [15] در چگالی جریان 10 تا 16 آمپر بر دسی‌متر مربع موفق به حصول 9.7 الی 14.5 درصد وزنی کروم در پوشش شدند. دولتی و همکاران [13] نیز با استفاده از حمامی مشابه حمام استفاده شده در این تحقیق، در چگالی جریان‌های 10 تا 30 آمپر بر دسی‌متر مربع به

پراش پرتو ایکس و بر مبنای رابطه‌ی شرر انجام شد [19]. مورفولوژی سطوح پوشش‌های حاصل نیز توسط میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل VEGA\TESCAN-LMU ساخت شرکت تسکن و مجهز به سیستم آنالیز عنصری بررسی شد. آزمایش‌های خوردگی الکتروشیمیایی به وسیله دستگاه پتانسیو استات (EG&G Model 273A) با نرخ روبش 1 mV/s در محلول 3.5 درصد NaCl و الکتروود مرجع Ag/AgCl انجام شد.

### 3- نتایج و بحث

مشخصه‌های مختلف فرایند رسوب‌دهی الکترونیکی شامل ترکیب حمام، دما، چگالی جریان، سرعت همزدن و pH بر ساختار و خواص پوشش‌های حاصل موثر هستند به گونه‌ای که با تغییری کوچک در یکی از این مشخصه‌ها، تغییرات قابل توجهی در ساختار ایجاد می‌شود. در این تحقیق و به منظور تعیین تاثیر چگالی جریان بر ساختار و خواص پوشش‌های حاصل، تلاش شد تا تمامی مشخصه‌های فرایند تا حد امکان ثابت در نظر گرفته شده و پوشش‌هایی تحت چگالی جریان‌های مختلف ایجاد شود. شکل 1 الگوهای پراش پرتو ایکس پوشش‌های رسوب‌دهی شده در چگالی جریان‌های 10، 20، 30 و 40 آمپر بر دسی‌متر مربع را نشان می‌دهد. طبق الگوهای ارائه شده، تمامی پوشش‌های حاصل از بلورینگی کمی برخوردار هستند. با توجه به الگوهای پراش مشخص است که ساختار پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های پایین، متشکل از فاز کریستالی FeNi با متوسط اندازه‌ی در حدود 5 نانومتر می‌باشد. با افزایش چگالی جریان، به تدریج از شدت پیک‌های کریستالی کاسته و در نهایت تنها هاله‌ی آمورف (در محدوده‌ی 2θ بین 40 الی 50 درجه) در الگوهای پراش باقی می‌ماند. در این حالت می‌توان گفت که ساختار پوشش حاصل در چگالی جریان 40 آمپر بر دسی‌متر مربع به صورت کامل (در حد تشخیص پراش پرتو ایکس) آمورف شده است. این موضوع با نتایج ارائه شده توسط بسیاری از محققان همچون شریف و همکاران [10]، سزیراکی و همکاران [11]، آلبرتو و همکاران [12] و دولتی و همکاران [13] تطابق دارد. در گزارشات ارائه شده توسط این محققین نیز به شکل‌گیری ساختارهای غیرتعدالی و آمورف در حین فرایند رسوب‌گذاری آلیاژهای آهن-نیکل-کروم اشاره شده است.

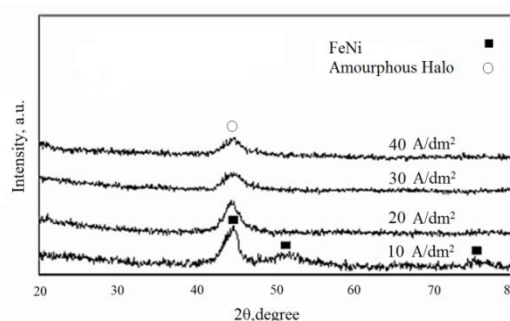


Fig. 1. The XRD patterns of as-deposited Fe-Ni-Cr coatings at different currents density.

شکل 1 الگوهای پراش پرتو ایکس پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های مختلف (A/dm<sup>2</sup>).

در واقع، تشکیل ساختار آمورف در پوشش‌های حاصل از فرایند رسوب‌دهی الکترونیکی با افزایش چگالی جریان از چند دیدگاه قابل بررسی است. در دیدگاه اول، تغییرات انرژی آزاد گیبس تشکیل فازهای مختلف در سیستم آلیاژی دوجزئی Fe-Ni، مورد نظر قرار می‌گیرد. در این رابطه، تغییرات انرژی آزاد گیبس تشکیل فازهای آمورف و محلول جامد در سیستم آلیاژی دوجزئی Fe-Ni در شکل 2 نشان داده شده است. این نمودارها بر

می‌شوند، به جهت ایجاد شرایط خوردوانکاری، در شرایطی که تحت اصطکاک هستند، افزایش عمر سایشی پوشش‌ها را به همراه خواهند داشت.

در راستای مقایسه‌ی رفتار خوردگی پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های مختلف، آنالیز خوردگی در مورد نمونه‌های مختلف انجام و نتایج حاصل در جدول 3 آورده شده است. بر اساس این جدول، با افزایش چگالی جریان پوشش‌دهی، چگالی جریان خوردگی از مقدار  $0.8 \times 10^{-5}$  آمپر بر دسی‌متر مربع به حدود  $7.1 \times 10^{-5}$  آمپر بر دسی‌متر مربع رسیده است. در این شرایط اختلاف پتانسیل خوردگی نیز از مقدار -0.496 ولت به حدود -0.570 ولت تغییر کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش چگالی جریان پوشش‌دهی، مقاومت به خوردگی پوشش کاهش یافته است. در واقع دو دلیل برای کاهش مقاومت خوردگی پوشش‌ها با افزایش چگالی جریان قابل ارائه است:

1- ایجاد ساختار آمورف با سطح انرژی بالاتر نسبت به ساختارهای کریستالی: با توجه به این که درصد کروم در پوشش‌های مورد بررسی در این تحقیق کمتر از حد لازم برای شکل‌گیری لایه‌ی پسیو بر روی سطح است [22]، انتظار می‌رود که به دلیل افزایش سطح انرژی ساختاری پوشش‌ها از طریق افزایش درصد فاز آمورف، مقاومت خوردگی پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های بالاتر کمتر از پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های کمتر باشد.

6 الی 19 درصد کروم در پوشش آلیاژی رسیدند. همچنین عادلخواهی و همکاران [16] در چگالی جریان‌های 5 تا 15 آمپر بر دسی‌متر مربع 5.6 الی 15 درصد کروم در پوشش رسوب‌دهی شده بدست آوردند. در هر حال حداکثر مقدار کروم حاصل در پوشش‌های مورد بحث در این پژوهش در حدود 2.6 درصد وزنی برآورد شد که به نظر می‌رسد تاثیر قابل توجهی در افزایش توانایی تشکیل فاز آمورف سیستم مورد بررسی نداشته باشد.

جدول 2 ترکیب شیمیایی پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های مختلف

Table 2 The chemical composition coatings prepared in different current densities

چگالی جریان	Cr (wt.%)	Ni (wt.%)	Fe (wt.%)
10	1	28.4	70.6
20	1.3	29.6	69.1
30	2	29.5	68.5
40	2.6	29.4	68

در دیدگاه دوم تلاش می‌شود تا تشکیل ساختار آمورف با توجه به افزایش نرخ رسوب‌دهی با افزایش چگالی جریان تحلیل شود. در نرخ رسوب‌گذاری پایین (چگالی جریان کم)، کاتیون‌های احیا شده در فصل مشترک الکترولیت-زیرلایه، با مکانیزم نفوذ سطحی به سمت زیر لایه حرکت نموده، با پیوستن به موقعیت‌هایی با سطح انرژی پایین‌تر، شکل‌گیری ساختارهای کریستالی پایدار را موجب می‌شوند. با افزایش چگالی جریان، سرعت احیای کاتیون‌های فلزی در فصل مشترک الکترولیت-زیرلایه افزایش یافته و به این ترتیب، نرخ رسوب‌دهی افزایش می‌یابد. به دلیل نرخ بالای رسوب‌دهی و افزایش چگالی کاتیون‌های احیا شده، مسافت‌های نفوذ کاهش یافته و آن‌ها در هر موقعیت ممکن به سطح متصل می‌شوند. در این حالت، بی‌نظمی اتمی در سطح افزایش یافته و ساختار به سمت شکل‌گیری فاز آمورف حرکت می‌کند [1] و [14]. در هر حال به نظر می‌رسد که دیدگاه دوم در تحلیل علت ایجاد ساختار آمورف با افزایش چگالی جریان مناسب‌تر باشد.

در شکل 3 تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که تمامی پوشش‌ها دارای ریزترک‌هایی هستند. مطابق این شکل با افزایش چگالی جریان تعداد و عمق ترک‌های پوشش افزایش می‌یابد. علت ایجاد این ترک‌ها به وجود کروم در پوشش نسبت داده می‌شود. پوشش‌های حاوی کروم معمولاً دارای ساختار مکعبی مرکزدار (BCC) می‌باشند، ولی مشخص شده است که در جریان پوشش‌دهی، هیدرید کروم بلوری با ساختار شش وجهی (HCP) و یا با ساختار مکعبی با سطوح مرکزدار (FCC) تشکیل می‌شود. هیدرید کروم ناپایدار است و فقط تحت شرایط الکترولیز، در زمان کوتاهی پایدار خواهد بود و سپس به کروم فلزی با ساختار مکعبی مرکزدار تجزیه می‌شود. تجزیه‌ی این هیدرید و آزاد شدن هیدروژن، باعث کاهش 15 درصدی در حجم پوشش می‌شود و از آنجایی که پوشش هیچ انقباضی را متحمل نمی‌شود در نتیجه تنش‌های کششی در پوشش بوجود می‌آیند. میزان این تنش‌ها به اندازه‌ای است که باعث ایجاد ریزترک‌هایی در پوشش شود [12] که مشابه آن‌ها در پوشش‌های کروم سخت نیز گزارش شده است [21]. اگرچه این ترک‌ها منجر به کاهش مقاومت خوردگی پوشش‌های حاصل

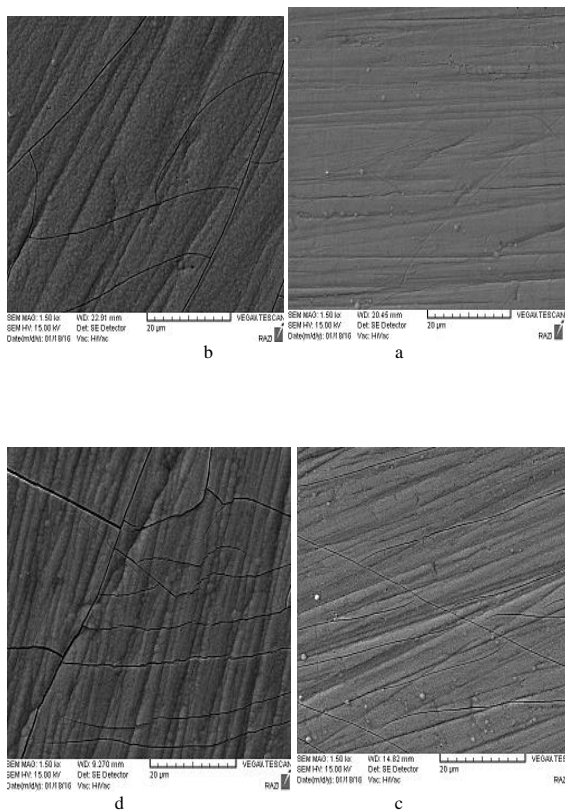


Fig. 3 The SEM images of as-deposited Fe-Ni-Cr coatings at different currents density of a) 10, b) 20, c) 30 and d) 40 A/dm<sup>2</sup>.

شکل 3 تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های (a) 10، (b) 20، (c) 30 و (d) 40 آمپر بر دسی‌متر مربع.

عملیات حرارتی شده با ساختار کاملاً کریستالی، دارای مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به دیگر نمونه‌ها می‌باشد.

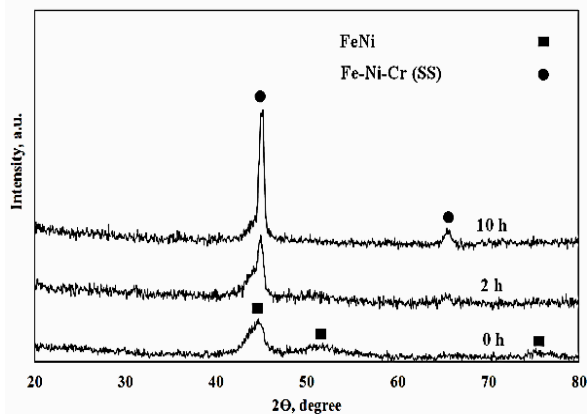


Fig. 4. The XRD patterns of amorphous Fe-Ni-Cr coatings after annealing at 250 °C for different periods of time.

شکل 4 الگوهای پراش پرتو ایکس پوشش‌های آئیل شده در دمای 250 درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف.

پس از بررسی ساختاری و رفتار خوردگی پوشش‌های حاصل در حین انجام عملیات حرارتی، در ادامه تلاش شد تا تاثیر ایجاد ساختارهای کامپوزیتی بر خواص خوردگی پوشش‌ها، مورد ارزیابی قرار گیرد. در این رابطه در حدود یک درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی چندجداره و همچنین یک درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم به حمام مشابه جدول 1 افزوده و فرایند رسوب‌دهی در چگالی جریان بهینه (10 آمپر بر دسی‌متر مربع) انجام شد. در این رابطه، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پوشش‌های حاصل در شکل 6 ارائه شده است. این تصاویر به خوبی نشانگر ایجاد ساختارهای کامپوزیتی از پوشش آلیاژی آهن- کروم- نیکل به همراه ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم و نانولوله‌های کربنی می‌باشد. آنالیز پراش پرتو ایکس و همچنین آنالیز عنصری نیز نشان از مشابه بودن ساختار فازی و ترکیب شیمیایی پوشش‌های حاصل با پوشش‌های آلیاژی داشت.

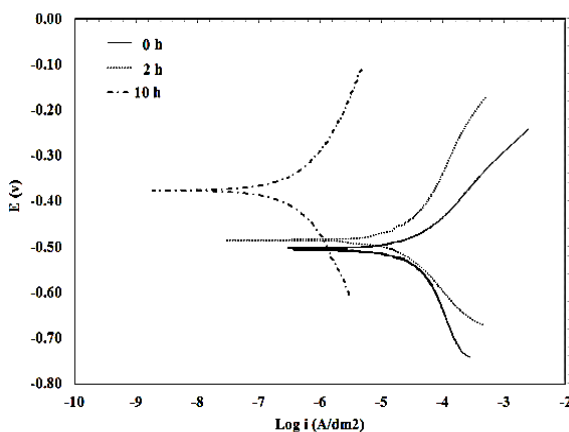


Fig. 5 Tafel Polarization curves of as-deposited Fe-Ni-Cr amorphous coating after annealing at 250 °C for different periods of time.

شکل 5 منحنی‌های پلاریزاسیون پوشش Fe-Ni-Cr آئیل شده در دمای 250 درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف

منحنی‌های پلاریزاسیون تافل پوشش‌های آلیاژی و کامپوزیتی مورد مطالعه در این تحقیق در شکل 7، قابل مشاهده می‌باشد. مقایسه منحنی‌های

جدول 3 پتانسیل و چگالی جریان خوردگی پوشش‌های آلیاژی آهن- کروم- نیکل

حاصل در چگالی جریان‌های مختلف

Table 3 Corrosion potential and current density of prepared Fe-Ni-Cr coatings in different current densities

پتانسیل خوردگی (V)	چگالی جریان خوردگی (A/dm <sup>2</sup> )	چگالی جریان رسوب‌دهی (A/dm <sup>2</sup> )
-0.496	$0.8 \times 10^{-5}$	10
-0.538	$2 \times 10^{-5}$	20
-0.555	$5 \times 10^{-5}$	30
-0.570	$7.1 \times 10^{-5}$	40

2- افزایش درصد و عمق ریزترک‌ها: مطابق تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پوشش‌ها (شکل 3)، وجود ریز ترک‌های بیشتر در پوشش‌های حاصل در چگالی جریان‌های بالاتر که به عنوان نواحی مستعد به خوردگی عمل می‌کنند، علت اصلی کاهش مقاومت به خوردگی با افزایش چگالی جریان می‌باشد [18].

پس از بررسی دقیق تاثیر چگالی جریان پوشش‌دهی بر خواص ساختاری و خوردگی پوشش‌ها، پوشش حاصل در چگالی جریان 10 آمپر بر دسی‌متر مربع به دلیل عدم حضور ریزترک‌ها و همچنین مقاومت خوردگی بهتر، به عنوان پوشش مناسب انتخاب شد و تلاش گردید تا تغییرات ساختاری این پوشش در حین عملیات حرارتی مورد ارزیابی واقع شود. شکل 4 الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های آئیل شده در دمای 250 درجه سانتی‌گراد و زمان‌های صفر، 2 و 10 ساعت را نشان می‌دهد. به دلیل امکان نفوذ اتم‌های زیر لایه به درون پوشش و اثرات نامطلوب ناشی از آن، دمای بهینه عملیات حرارتی این ترکیب، 250 درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. همانطور که در الگوهای پراش پرتو ایکس مشخص است، با افزایش زمان آئیل، بلورینگی پوشش افزایش یافته و به تدریج هاله‌ی آمورف به همراه پیک‌های پهن مربوط به فاز FeNi حذف و پیک‌های مشخصی از فاز محلول جامد آهن- نیکل- کروم در الگوهای پراش ظاهر شده‌اند. اندازه‌ی دانه‌های کریستالی مربوط به این فاز با گذشت زمان توسط آنالیز شرر برآورد شد. مطابق این آنالیز اندازه‌دانه‌های کریستالی مربوط به محلول جامد مورد بررسی پس از گذشت 10 ساعت از زمان آئیل به حدود 17 نانومتر رسیده است. در این رابطه، تغییر ساختار فازی پوشش از ترکیب FeNi+ آمورف به ساختار محلول جامد آهن- نیکل- کروم به همراه رشد دانه‌های کریستالی، مهم‌ترین تغییراتی است که در حین انجام عملیات حرارتی در ساختار رخ داده است.

شکل 5 منحنی‌های پلاریزاسیون پوشش‌های حاصل پس از انجام عملیات حرارتی در دمای 250 درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش زمان آئیل منحنی‌های پلاریزاسیون به سمت نواحی نجیب‌تر حرکت کرده که نشان از بهبود مقاومت خوردگی با گذشت زمان آئیل و کریستاله شدن ساختار آمورف دارد. در این مورد نیز با توجه به درصد ناچیز عنصر کروم در پوشش، بهبود مقاومت خوردگی پوشش‌های مورد بررسی با انجام تبلور فاز آمورف، به سطح انرژی بالای ساختارهای آمورف و تمایل شدید این ساختارها به خوردگی نسبت به ساختارهای کریستالی نسبت داده می‌شود. با مقایسه الگوهای پراش پرتو ایکس و منحنی‌های پلاریزاسیون به وضوح مشخص است که نمونه 10 ساعت

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ایجاد پوشش‌های آلیاژی- کامپوزیتی آهن- نیکل- کروم و مقایسه‌ی رفتار خوردگی پوشش‌های حاصل مورد بررسی واقع شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

1- با انجام فرایند رسوب‌دهی الکتریکی، امکان ایجاد محدودده‌ی ساختاری نانوکریستال و آمورف در پوشش‌های آهن- نیکل- کروم وجود دارد. افزایش چگالی جریان از مقدار 10 آمپر بر دسی‌متر مربع به حدود 40 آمپر بر دسی‌متر مربع و به دنبال آن افزایش نرخ رسوب‌دهی، تمایل پوشش به تشکیل ساختار آمورف را افزایش می‌دهد.

2- پوشش‌های آمورف آهن- نیکل- کروم حاصل از درصد کروم کمی (حداکثر 2.6 درصد وزنی) برخوردار بوده و به دلیل ایجاد ریزترک‌ها و حضور فاز ناپایدار آمورف، از مقاومت خوردگی پایین‌تری نسبت به ساختارهای نانوکریستالی برخوردار هستند. در واقع چگالی جریان خوردگی پوشش آمورف در حدود  $7.1 \times 10^{-5}$  آمپر بر دسی‌متر مربع برآورد گردید که بالاتر از مقدار چگالی جریان خوردگی حاصل از پوشش نانوساختار  $0.8 \times 10^{-5}$  آمپر بر دسی‌متر مربع می‌باشد.

3- با انجام عملیات حرارتی، تبلور فاز آمورف و کاهش سطح انرژی ساختار، مقاومت خوردگی پوشش‌ها افزایش می‌یابد. در این حالت چگالی جریان خوردگی از مقدار  $0.8 \times 10^{-5}$  آمپر بر دسی‌متر مربع به حدود  $0.6 \times 10^{-6}$  آمپر بر دسی‌متر مربع و اختلاف پتانسیل خوردگی نیز از مقدار 0.496- ولت به حدود 0.370- ولت می‌رسد.

4- ایجاد ساختارهای کامپوزیتی با افزایش چقرمگی پوشش‌ها و کاهش میزان ریزترک‌های موجود، نقش موثری در بهبود خواص خوردگی پوشش‌ها ایفا می‌نماید.

5- نقش ذرات تقویت کننده‌ی کاربرد سیلیسیم در بهبود مقاومت خوردگی بسیار بالاتر از نانولوله‌های کربنی می‌باشد.

#### 5- مراجع

- [1] Kang, J.C. and Lalvani, S.B. "Electrodeposition and Characterization of Amorphous Fe-Ni-Cr-based Alloys" Journal of applied electrochemistry, Vol. 25, pp.376-383, 1995.
- [2] Tavoozi, M. and Saedi, N., "Glass Metals and Amorphous-Nanocrystal Alloys" Malek-Ashtar Publishing, Tehran, pp. 28-36, 2013. (In persian)
- [3] Esrafil, B., "Metal Electroplating Engineering, Tarrah Publishing, Tehran, pp. 74-79, 2000. (In persian).
- [4] Brenner, A., "Electrodeposition of Alloy, National Bureau of Standards, Washington 1996.
- [5] Enayati, M.H., "Nanostructure Materials" Jahad Daneshgahi Publishing, Esfahan, pp.43-45, 2008. (In persian)
- [6] Kim, S.K. and Yoo, H., "Formation of Bilayer Ni-SiC Composite Coatings by Electrodeposition, Surface and Coating Technology", Vol. 275, Pp.564-569, 1998.
- [7] Gajalakshmi, S. and Snram, K., "Investigation of Mechanical Behavior of Ultra-Light Weight Nano Composite for Aero-Craft", International Journal of Science and Research, Vol. 4, pp. 1892-1895, 2015.
- [8] Shi, L., Sun, C., Gao, P., Zhou, F., Liu, W., "Mechanical Properties And Wear and Corrosion Resistance of Electro Deposited Ni-Co/SiC Nanocomposite Coating", Journal Applied Surface Science, Vol. 252, pp. 3591-3599, 2006.
- [9] Shi, X.L., Yang, H., Shao, G.Q., Duan, X.L., Yan, L., Xiong, Z. and Sun, P., "Fabrication and Properties of W-Cu Alloy Reinforced By Multi-Walled Carbon Nanotubes", Materials Science and Engineering, Vol. 457, Pp.18-23, 2007.
- [10] El-Sharif, M., Wang, X., Chisholm, C.U., and Watson, A., "Effect of Heat Treatment on Microstructure of Cr-Ni-Fe Coating Prepared

پلاریزاسیون خوردگی پوشش آلیاژی و پوشش‌های کامپوزیتی شده نشان می‌دهد که رفتار خوردگی پوشش‌های کامپوزیتی بهتر از پوشش آلیاژی اصلی است. در واقع با توجه به شباهت ساختاری و فازی پوشش‌های حاصل، این امر می‌تواند به نقش موثر فازهای تقویت کننده در بهبود چقرمگی پوشش و کاهش ریزترک‌های موجود نسبت داده شود [23, 24]. مطابق شکل 7، پوشش کامپوزیتی حاوی نانوذرات کاربید سیلیسیم مقاومت بهتری نسبت به پوشش کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی از خود نشان داده است. یکی از دلایل این اختلاف می‌تواند توزیع یکنواخت‌تر نانوذرات کاربید سیلیسیم در پوشش رسوبی باشد. چرا که نانولوله‌های کربنی مستعد به آگلومره شدن هستند و بنابراین سهم نانولوله در سطحی از پوشش که در تماس با محیط خوردنده است کاهش یابد. دلیل دیگر پتانسیل استاندارد نجیب ذرات کاربید سیلیسیم است که علاوه بر اصلاح پوشش سبب کاهش نرخ خوردگی می‌شود [24].

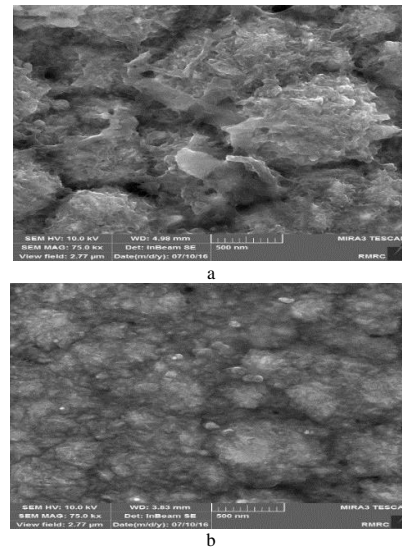


Fig.6 The FESEM images of as-deposited Fe-Ni-Cr composite coatings reinforced by (a) carbon nano tubes and (b) SiC nanoparticles.

شکل 6 تصاویر میکروسکوپی الکترونی گسیل میدانی از پوشش‌های آلیاژی آهن- کروم- نیکل تقویت شده توسط (a) نانولوله‌های کربنی و (b) نانوذرات کاربید سیلیسیم.

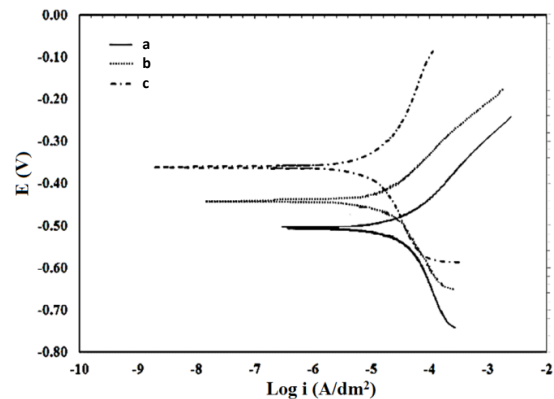


Fig. 7 Tafel Polarization curves of as-deposited Fe-Ni-Cr a) alloy and composite coating reinforced with b) CNT and c) SiC

شکل 7 منحنی‌های پلاریزاسیون پوشش‌های حاصل از فرایند رسوب‌دهی الکتریکی آلیاژی، (b) پوشش کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی و (c) پوشش کامپوزیتی حاوی نانوذرات کاربید سیلیسیم

- by Electrodeposition”, *Material Science*, Vol. 163, pp. 633-640, 1994.
- [11] Sziraki, L., Kuamann, E., El-Sharif, M., and Chisholm, C.U., “Electrochemical Behavior of Electrodeposited Strongly Disordered Fe-Ni-Cr Alloys”, *Electrochemistry Communication*, Vol. 2, pp. 619-625, 2000.
- [12] Alberto, C., Carlos, A. and Bidoia, E.D., “Electrodeposition of Amorphous Fe-Cr-P-Ni-C Alloys Morphological And Structural Characteristics”, *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, Vol.14, pp.39-44, 2002.
- [13] Dolati, A., Ghorbani, M. and Afshar, A., “The Electrodeposition of Quaternary Fe-Cr-Ni-Mo Alloys from the Chloride-Complexing Agents Electrolyte Part I. Processing”, *Surface and Coatings Technology*, Vol.166, pp.105-110, 2003.
- [14] Souza, C.A., May, J.E., A.T., Machado, A.L., Tachard, and Bidoia, E.D., “Preparation of Fe-Cr-P-Co Amorphous Alloys by Electrodeposition”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 215, pp. 75-82, 2005.
- [15] Xiang-Zhu, H., Chang-Bin, X. And Hong-Jun, W., “Electroplating Process of Amorphous Fe-Ni-Cr Alloy”, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.11, pp. 956-959, 2001.
- [16] Adelhani, H. And Arshadi, M., “Properties of Fe-Ni-Cr Alloy Coatings by Using Direct and Pulse Current Electrodeposition”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 476, pp. 234-237, 2009.
- [17] Huang, C.A., Chanh, J., Chen, C., Liao, K. and Mayer, J., “Microstructure and Electrochemical Corrosion Behavior of Cr-Ni-Fe Alloy Deposits Electroplated in the Presence of Trivalent Cr Ions”, *Thin Solid Films*, Vol. 544, pp. 69-7318, 2013.
- [18] Kanagaraj, R., Kannan, R., and Ganesan, S., “Synthesis and Characterisation of Electrodeposited Ni-Fe-Cr Thin Films”, *Journal of Ovonic Research*, Vol. 6, pp. 197-204, 2014.
- [19] Cullity, B.D., “Element of X-Ray diffraction”, 2rd edition, Addison Wesley, Massachusetts, pp. 45-85, 1978.
- [20] Miedema, A.R., Deboer, F.R., And Boom, R., “Model Predictions for The Enthalpy of Formation of Transition Metal Alloys”, Vol. 1, Pp. 341-359, 1997.
- [21] Naka, M., Hashimoto, K., and Masumoto, T., “High Corrosion Resistance of Chromium-Bearing Amorphous Iron Alloys In Neutral And Acidic Solutions Containing Chloride”, *Corrosion*, Vol. 32, pp. 146-152, 1976.
- [22] Mcbee, C.L., Kruger, J., “Nature of Passive Films on Iron-Chromium Alloys”, *Electrochimica Acta*, Vol. 17, pp.1337-1341, 1972.
- [23] Kawashima, A., Hashimoto, K., and Masumoto, T., “Stress Corrosion Cracking of Amorphous Iron Base Alloys”, *Corrosion Science*, Vol. 16, pp. 937-943, 1976.
- [24] Vaezi, M.R., Sadmezhaad, S.K., Nikzad, L., “Electrodeposition of Ni-SiC Nano-Composite Coatings and Evaluation of Wear and Corrosion Resistance and Electroplating Characteristics”, *Colloid and Surfaces*, Vol. 315, pp.176-182, 2008.





## تولید پوشش نانو کامپوزیتی یکنواخت پلی پیروول نانولوله کربنی / اکسید کادمیم برای محافظت از خوردگی فولاد زنگ نزن آستنیتی 304

محمدعلی صرفه‌جو<sup>1</sup>، علیرضا محمودیان<sup>2\*</sup>، داریوش افزالی گروه<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشکده علوم و فناوری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان  
 2- استادیار گروه فلزات، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان  
 3- دانشیار بخش شیمی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان  
 \* صندوق پستی 76315-117، [a.mahmoudian@kgut.ac.ir](mailto:a.mahmoudian@kgut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 96/5/7	در این پژوهش یک فیلم یکنواخت پلی پیروول اکسید کادمیم / نانولوله کربنی برای محافظت از فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 در مقابل خوردگی در محیط اسیدی 0.5 مولار هیدروکلریک اسید تولید شد. برای این منظور از روش رسوب‌شیمیایی برای سنتز CNT/CdO استفاده شد. از روش سنتز الکتروشیمیایی برای پوشش دهی سطح فولاد و یافتن شرایط بهینه آن استفاده شد. از آزمون و امیداندس الکتروشیمیایی برای به دست آوردن میزان بهینه نانوکامپوزیت استفاده شد. برای بررسی‌های مورفولوژیکی از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که نانوکامپوزیت نهایی از مقاومت خوبی در مقابل خوردگی برخوردار است و وجود CNT/CdO در زمینه پلیمری میزان تخلخل فیلم پوششی را کاهش داد. همچنین نتایج بیان کردند که چگالی جریان بهینه اعمالی برای پوشش دهی و pH بهینه برای آماده‌سازی محلول الکتروپلیمریزاسیون به ترتیب مقادیر 4mA/cm <sup>2</sup> و 9 است. مقدار 0.5% وزنی حجمی نانولوله کربنی عامل دار شده با اکسید کادمیم بهینه تقویت‌کننده نانو کامپوزیتی در زمینه پلی پیروول تعیین شد. پوشش نانوکامپوزیت پلی پیروول نانولوله کربنی/ اکسید کادمیم تشکیل شده بر سطح فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 بیش از 92.5% از خوردگی آن در محلول 0.5 مولار هیدروکلریک اسید محافظت کرد.
پذیرش: 96/9/6	
<b>کلیدواژگان:</b> پلاریزاسیون نانولوله کربنی / اکسید کادمیم پلی پیروول مورفولوژی	

## Production of uniform nanocomposite coating of polypyrrole carbon nanotube/ cadmium oxide to protect corrosion of austenitic stainless steel 304

Mohammad Ali Sarfejo, Ali Reza Mahmoudian\*, Daryoosh Afzali Goroh

Department of materials engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman.

\* P.O.B. 76315-117, Kerman, Iran, [a.mahmoudian@kgut.ac.ir](mailto:a.mahmoudian@kgut.ac.ir)

### Keywords

Polarization  
Carbon nanotube/Cadmium Oxide  
Polypyrrole  
Morphology

### Abstract

In this research, a uniform film of polypyrrole/CNT/cadmium oxide nanocomposite was produced to protect the austenitic stainless steel 304 against corrosion in 0.5 molar hydrochloric acid medium. For this purpose, the chemical deposition method was used for CNT / CdO synthesis. Electrochemical synthesis method was used to coat the stainless steel and to find optimal coating conditions. Electrochemical impedance spectroscopy test was used to find the optimum amount of reinforcement nanocomposite. Optical microscope and scanning electron microscope (SEM) were used to study the morphology of coating. Results showed that the final nano composite had a remarkable corrosion resistance and the presence of CNT / CdO reduced the porosities in the final polymer film. Also coating results showed that the optimum amount of apply current density and pH for electropolymerization were 4mA/cm<sup>2</sup> and 9 respectively. The 0.5% weight-volumetric functionalized carbon nanotube with Cadmium Oxide was determined as optimum amount of nano composite reinforcement using a polypyrrole matrix. Polypyrrole Carbon nanotube/Cadmium Oxide nanocomposite coating on the surface of austenitic stainless steel 304 protected more than 92.5% against corrosion in a 0.5 M solution hydrochloric acid

### 1-مقدمه

یک اکسیدکننده قوی در محلول سنتز مانند کلراید آهن، آمونیوم پر سولفات و... برای انجام واکنش اکسیداسیون مونومر آن استفاده می‌گردد [7,6,2]. روش الکتروشیمیایی سنتز پلیمرهای رسانا به سه شیوهی ولتامتری چرخه‌ای [6]، اعمال پتانسیل ثابت (کورتوآمپریمتری) [8,3] و اعمال جریان ثابت (کورتوپتانسیومتری) امکان‌پذیر است و بسط یافتن پلیمر در حالت گاز و بدون دخالت هیچ اکسیدکننده‌ای، که دارای

پلی پیروول یک پلیمر رساناست که در چند دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. این پلیمر در صنایع مختلف از جمله صنایع نوری، الکترونیک و در سال‌های اخیر در صنعت برای محافظت از خوردگی کاربرد زیادی یافته است [1]. پلیمریزاسیون پلی پیروول با اکسایش مونومر آن به روش‌های گوناگونی از جمله شیمیایی [2]، الکتروشیمیایی [3] و پلاسما [5,4] انجام‌پذیر است. در روش شیمیایی از

### Please cite this article using:

Sarfejo, M. A. Mahmoudian, A. R. and Afzali-Goroh, D., "Production of uniform nanocomposite coating of polypyrrole carbon nanotube/ cadmium oxide to protect corrosion of austenitic stainless steel 304", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 377-386, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

الکتروپلیمریزاسیون پلی پیروول و جریان یافتن آن‌ها به همراه مونومرهای پیروول به سطح فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 برای محافظت از خوردگی آن استفاده شده است.

پلیمرهای رسانا به دلیل انتقال الکترون با ایجاد یک مکانیزم حفاظت آندی از خوردگی جلوگیری می‌کنند، اما این پلیمرها از خواص مکانیکی مطلوبی برخوردار نیستند و به‌صورت خالص از یکنواختی کمی برخوردارند لذا استفاده از مواد افزودنی برای افزایش یکنواختی و بهبود خواص مکانیکی آن ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی مواد افزودنی مورد استفاده نباید تغییر مانع از رسانایی الکتریکی این پوشش‌ها گردد، به همین منظور در این تحقیق از نانولوله‌های کربنی عامل دار شده با اکسید کادمیم استفاده شده است. اکسید کادمیم به‌عنوان یک ماده دارای ساختار سرامیکی نیمه‌رسانا علاوه بر ایجاد خواص مکانیکی و حرارتی مطلوب در پوشش، به رسانندگی پوشش لطمه چندانی وارد نمی‌سازد. همچنین نانولوله‌های کربنی می‌توانند با ایجاد یک زنجیره‌ی به‌هم‌پیوسته به یکنواختی پوشش کمک نمایند.

## 2- مواد و روش‌ها

پیروول استفاده‌شده، با فرمول  $C_4H_5N$  و جرم حجمی  $0.987 \text{ gr/cm}^3$  با خلوص تقریبی 100% از شرکت مرک خریداری شد. در شرایطی که بین انجام آزمایش‌ها وقفه زمانی طولانی ایجاد می‌شد، قبل از مصرف پیروول، ابتدا دو بار تقطیر می‌شد. سایر مواد مصرفی شامل اسیدسولفوریک، با خلوص 98% و جرم حجمی 1.84، اسیدکلریدریک با خلوص 37% و سود خالص همگی از شرکت مرک تهیه شدند. همچنین به‌منظور سنتز نانوکامپوزیت اکسید کادمیم/CNT از نانولوله کربنی چند دیواره خریداری شده از شرکت تحقیقات نانو مواد آمریکا و از نمک نیترات کادمیم  $Cd(NO_3)_2$  از محصولات شرکت سیگما آلدریج استفاده شده است. فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 به‌صورت ورق با ضخامت 3 میلی‌متر تهیه شد. برای حصول اطمینان از ترکیب شیمیایی نمونه، آنالیز کوانتومتری انجام شد که نتیجه آن در جدول شماره 1 نشان داده شده است. ساخت الکتروود کار از فولاد زنگ نزن 304 ابتدا با برش ورق فولادی به شکل مربع‌هایی با ابعاد  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  آغاز شد و با لحیم کردن سیم مسی به آن و عایق کردن همه وجوه به‌جز وجه اصلی با استفاده از مانت گرم ادامه یافت و با پولیش سطح توسط سمباده‌های 220، 500، 800، 1200 و 2000 به پایان رسید. برای چربی زدایی از سطح الکتروود کار در مرحله پایانی از محلول 1 به 1 استون اتانول استفاده شد.

واکنش‌های پلیمریزاسیون الکتروشیمیایی پلی پیروول توسط دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات Autolab مدل PGSTAT 302 هماهنگ شده با نرم‌افزار NOVA ورژن 1.8 استفاده شد. پوشش دهی طبق روش اعمال جریان ثابت صورت پذیرفت. آزمون پلاریزاسیون الکتروشیمیایی تافلی نیز توسط همین دستگاه در محیط 0.5 مولار هیدروکلریک اسید انجام شد.

ساختاری کاملاً متفاوت با دو روش قبلی است، به پلیمریزاسیون پلاسما شناخته شده است [7]. پیروول به دلیل دارا بودن خواص گوناگون چون رسانایی الکتریکی، پایداری حرارتی، چگالی کم و... در صنایع مختلف ساخت خازن‌ها، باتری‌های قابل شارژ، محافظت از خوردگی و... کاربرد یافته است [10-12]. در روش الکتروشیمیایی سنتز این پلیمر، کامپوزیت‌های مختلفی شامل زمینه‌ی پلی پیروول و افزودنی‌هایی چون آلوتروپ‌های مختلف کربن و نانو ذرات سرامیکی استفاده شده است [15-12].

نانولوله کربنی یک آلوتروپ تک‌بعدی از کربن است که به‌صورت گرافن استوانه‌ای تشکیل می‌گردد و می‌تواند تک دیواره یا چند دیواره باشد [13]. نانولوله‌ها دارای خواص بسیار مطلوبی چون استحکام بالا، انعطاف‌پذیری، قابلیت پیچش خوب و به‌طور کلی خواص مکانیکی [14]، خواص شیمیایی [15-17] و خواص الکتریکی مناسب هستند و از برترین خواص نانولوله‌های کربنی می‌توان به قدرت رسانایی الکتریکی بالا [4،5] و چگالی جریان مجاز عبوری زیاد [18] آن‌ها اشاره نمود که وابسته به نظم چیده شدن اتم‌های کربن در آن هستند و می‌توانند بسیار متغیر باشند [19]. این خواص منحصربه‌فرد نانولوله‌های کربنی آن‌ها را در حوزه‌های گوناگونی چون نشر میدان [20]، پروب حس‌گرهای اندازه‌گیری و روشی [21]، نانو الکترونیک [7،8]، سلول‌های خورشیدی [22]، عملیات بیولوژیکی [23] و... پر کاربرد نموده است. در ادامه روند تحقیقات بر روی نانولوله‌های کربنی محققان تلاش کرده‌اند این خواص را با استفاده از کامپوزیت کردن آن‌ها به همراه دیگر مواد به حد اعلی خود برسانند که از این پژوهش‌ها می‌توان به تولید نانوکامپوزیت PAMAM/CNT به‌منظور حذف یون‌های فلزی سنگین از آب فاضلاب [24]، سنتز نانوکامپوزیت  $MnO_2/acid-treated \text{ CNT}$  به‌منظور افزایش بهره‌وری در باتری‌های ذخیره کننده انرژی [15،16،25] و... اشاره نمود.

تحقیقات در حوزه‌ی مقاومت به خوردگی پوشش‌های پلیمری رسانا با سنتز شیمیایی آنیلین بر روی سطح فولاد زنگ نزن فریتی توسط دیبری آغاز شد و به‌سرعت توسعه یافت و ادامه روند این حوزه از تحقیقات از کامپوزیت کردن آن‌ها با دیگر مواد می‌توان به کامپوزیت پلی پیروول اکسید زیرکونیوم، کورشل کیتوسان و پلی پیروول سیلیس و همچنین پلی پیروول/گرافن/یون‌های نادر موجود در خاک/دودسیل بنزن سولفونیک اسید اشاره کرد که گاهی تا 98% از خوردگی فلزات جلوگیری نموده‌اند [26-29].

در مشابه‌ترین تحقیق به بررسی حاضر محققان از نانولوله‌های سیلیسیم کامپوزیت شده با ترکیبات I-HAP به روش التراسونیک و سپس نفوذ آن‌ها به درون لایه‌ی پلی پیروول تولیدشده به روش الکتروشیمیایی با روش الکتروفوریتیک دیپوزیشن برای محافظت از خوردگی فولاد زنگ نزن آستنیتی 316 مورد استفاده در ایمپلنت‌ها استفاده کرده‌اند و به ضریب حفاظتی 97% دست یافتند [30]. در این تحقیق از روش ساده‌ی هم رسوبی شیمیایی برای کامپوزیت کردن نانولوله‌های کربنی با اکسید کادمیم و همچنین از روش ساده‌ی تک‌مرحله‌ای دیسپرس کردن نانولوله‌های کربنی عامل دار شده در محلول

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 پایه به‌دست‌آمده از آنالیز کوانتومتر

Table 1 Result of EDS analyses of basic austenitic stainless steel 304 composition

Others	Co	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C	Fe	Element
≤0.81	0.19	10.1	0.29	18.2	1.73	0.24	0.05	68.4	Concentration



**1-2- سنتز نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/اکسید کادمیم**

برای سنتز نانوکامپوزیت CNT/CdO در این تحقیق از روش ترسیب شیمیایی استفاده شد. اساس کار این روش بر رسوب‌دهی یک‌ذره جامد از فاز محلول بر مبنای واکنش‌های اکسایش-کاهش است. برای سنتز نانو ذرات سرامیکی فلزی رایج‌ترین واکنش مورد استفاده واکنش بین کاتیون‌های فلزی به وجود آمده در یک محلول اغلب آبی به همراه آنیون‌های هیدروکسید موجود در محلولی دیگر است که به آرامی به یکدیگر افزوده می‌گردند و مدام هم زده می‌شوند تا به ترتیب زمان لازم برای ایجاد رسوب و همچنین حذف پلاریزاسیون غلظتی به وجود آمده در محلول تأمین گردد. برای سنتز نانو ذرات سرامیکی بر روی یک‌پایه دیگر مانند نانولوله‌ها، گرافن و... لازم است ابتدا این مواد به صورت یک محلول کاملاً کلوئیدی و دیس پرس شده با محلول حاوی آنیون‌های هیدروکسید درآید. در این پژوهش صرفاً نانولوله‌های کربنی مورد استفاده قرار گرفتند. توزیع نانو ذرات توسط دستگاه التراسونیک در یک بازه زمانی 30 دقیقه‌ای انجام شد و 50 میلی‌لیتر محلول 0.5 مولار سود به همراه 2% وزنی-حجمی از نانولوله کربنی تهیه شد. از طرفی نیز محلول 0.25 مولار کادمیم نیترات به حجم 50 میلی‌لیتر تهیه گردید و با دبی تقریبی 0.5 میلی‌لیتر بر دقیقه به محلول اولیه اضافه و به صورت مداوم هم زده شد. پس از اتمام کار رسوب ایجاد شده توسط سانتریفیوژ از محلول جداسازی گردید و شستشو داده شد تا pH آن به مقدار تقریباً خنثی برسد. سپس به مدت 24 ساعت در دمای 100 درجه سانتی‌گراد خشک گردید. در مرحله نهایی تبدیل کادمیم هیدروکسید حاصل به اکسید کادمیم، در کوره در دمای 450 درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت پخت داده شد و پس از سرد شدن توسط آسیاب به خوبی خرد گردید. به منظور تأیید سنتز صحیح و به دست آوردن اندازه نانو ذرات اکسید کادمیم حاصل بر روی سطح بدنه نانولوله‌های کربنی از آنالیز XRD با تیوب تولیدکننده  $K_{\alpha}$  مس که با نرم‌افزار X'Pert HighScore هماهنگ شده استفاده شد و تحلیل گراف‌ها نیز با همین نرم‌افزار صورت گرفت. برای به دست آوردن اندازه ذرات (D) توسط آنالیز XRD از فرمول دبای-شرر استفاده شد (فرمول (1)) که بر اساس عرض پیک در نصف شدت بیشینه ( $\beta$ )، زاویه براگ مربوط به بزرگ‌ترین پیک ( $\theta$ )، ضریب شکل بلور و ( $\lambda$ ) طول موج پرتوی ایکس، استفاده شد.

$$D = \frac{k \times \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

**2-2- الکتروپلیمریزاسیون پلی پیرول**

فرآیند الکتروپلیمریزاسیون پلی پیرول توسط یک سل الکتروشیمیایی سه الکترودی شامل الکتروود کار، الکتروود مرجع کالومل و الکتروود شمارنده‌ی پلاتین و توسط محلول 0.3 مولار اسیدسولفوریک و 0.1 مولار مونومر پیرول که pH آن توسط سود تنظیم شد به روش اعمال چگالی جریان ثابت و در یک بازه زمانی 15 دقیقه‌ای صورت پذیرفت. برای به دست آوردن بهینه چگالی جریان پوشش دهی از چگالی‌های جریان 2، 4، 6 و 8 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع استفاده گردید. از طرفی برای به دست آوردن بهینه pH محلول پوشش دهی از pH‌های 5، 7، 9 و 11 استفاده گردید.

**3-2- الکتروپلیمریزاسیون پلی پیرول نانولوله کربنی/اکسید کادمیم**

بدین منظور از درصدهای وزنی حجمی 0.02، 0.1، 0.5 و 1 از نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/اکسید کادمیم که به صورت یک سوسپانسیون در محلول

الکتروپلیمریزاسیون پلی پیرول درآمده است استفاده شد و عیناً مراحل پوشش دهی پلی پیرول در چگالی جریان بهینه تکرار گردید.

**4-2- آزمون امپدانس الکتروشیمیایی**

برای مطالعات خوردگی به روش امپدانس الکتروشیمیایی، الکتروود کار مانند روش پلاریزاسیون آماده شد و پس از قرار دادن الکتروود در محلول نیم مولار هیدروکلریک اسید، مطالعات در پتانسیل خوردگی و در محدوده فرکانس بین 0.001 هرتز تا 100 کیلوهرتز و با اعمال پتانسیل مدارباز انجام گرفت و در نهایت نمودار نایکوئیست رسم شد.

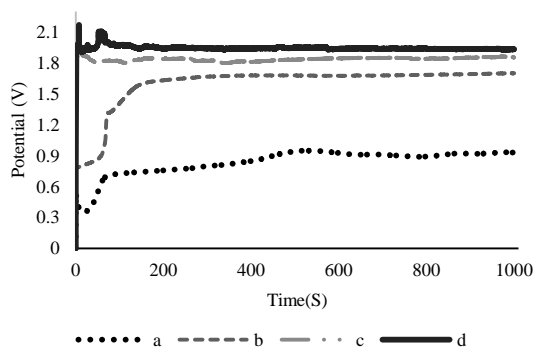
**3-نتایج و بحث****1-1- آنالیز XRD**

نتایج حاصل از آنالیز XRD محلول نهایی سنتز نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/اکسید کادمیم در شکل 1 آورده شده است. همان‌گونه که از شکل 1 مشخص است در محدوده‌ی 20 بین 18 تا 23 درجه‌یک پیک با شدت کم و پهنای زیاد مشاهده می‌گردد که با مقایسه آن با نمودارهای XRD ارائه‌شده در تحقیقات علی بدای و همکارانش و همچنین جینکوی فنگ و همکارانش می‌تواند مربوط به صفحات بدنه نانولوله‌های کربنی باشد [32,31] همچنین پیک‌های ایجاد شده در 20های 33.2، 38.4، 55.4، 66.07 و 69.45 می‌توانند به ترتیب مربوط به صفحات با اندیس‌های میلر (111)، (200)، (220)، (311) و (222) بلوره‌های مکعبی مربوط به اکسید کادمیم باشد [31]. شدت بیشینه حاصله مربوط به صفحه با اندیس میلر (111) است که به خوبی با الگوی دارای کد 01-073-2245 نرم‌افزار که مربوط به اکسید کادمیم مکعبی و همچنین مونتیپونیت<sup>1</sup> که یک محصول پودری از اکسید کادمیم است و در نرم‌افزار با کد 00-005-0640 مشخص است مطابقت دارد. همه این موارد نشانگر سنتز صحیح این ذره توسط فرآیند رسوب‌شیمیایی است. برای به دست آوردن اندازه این ذرات سنتز شده بر بدنه نانولوله کربنی با استفاده از پیک حاصل با شدت بیشینه استفاده شد. پیک حاصل همان‌گونه که اشاره شد در 20 حدود 33.2 حاصل شد، پهنای پیک در نصف شدت بیشینه تقریباً 0.4 درجه تعیین شد که باید به طول تبدیل شود، میزان ضریب شکل بلور به دلیل مکعبی بودن کریستال‌ها طبق بررسی گذشته میزان 0.94 و طول موج تیوب تولیدکننده مقدار 0.154 نانومتر تعیین شد. با جایگذاری این موارد در فرمول دبای-شرر مقدار میانگین اندازه ذرات 21.637 نانومتر تعیین شد.

**2-3- بررسی مورفولوژیکی برای به دست آوردن بهینه pH محلول پوشش دهی**

به‌عنوان یک پارامتر مؤثر بر مورفولوژی و نحوه پوشش دهی و در نتیجه، خواص نهایی محافظتی خوردگی است، لذا نیاز به تعیین یک مقدار بهینه دارد. در این تحقیق از محلول‌های الکتروپلیمریزاسیون در pH‌های 5، 7، 9 و 11 در دمای محیط و تحت چگالی جریان 6 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و در یک بازه زمانی 900 ثانیه‌ای پوشش دهی استفاده شد. از شکل 2 مشخص است که مورفولوژی پیرول در حالت پوشش دهی در محلول اسیدی به صورت دانه‌ای بسیار ریز است که با نتایج تحقیقات گذشته مطابقت دارد [33]. فرآیند جوانه‌زنی در محیط‌های اسیدی به سرعت اتفاق می‌افتد و منجر به تشکیل دانه‌های ریز می‌شود. سطح الکتروود کار از این

<sup>1</sup> Montepomite



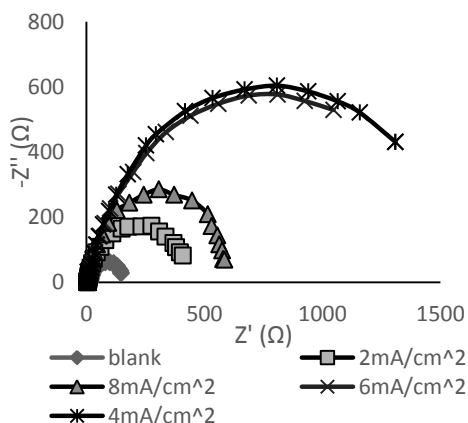
**Fig. 3** Time\_Potential diagram, with current densities a)  $2\text{mA}/\text{cm}^2$ , b)  $4\text{mA}/\text{cm}^2$ , c)  $6\text{mA}/\text{cm}^2$  & d)  $8\text{mA}/\text{cm}^2$

شکل 3 نمودار پتانسیل\_زمان مربوط به چگالی‌های جریان (a)  $2\text{mA}/\text{cm}^2$ , (b)  $4\text{mA}/\text{cm}^2$  (c)  $6\text{mA}/\text{cm}^2$  و (d)  $8\text{mA}/\text{cm}^2$

#### 4-3- بررسی بهینه چگالی جریان پوشش دهی با اندازه‌گیری امیدانس الکتروشیمیایی

از نمونه‌های پوشش داده‌شده و نمونه بدون پوشش در محلول نیم مولار هیدروکلریک اسید آزمون امیدانس الکتروشیمیایی گرفته شد. در شکل 4 نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه شاهد در کنار نمونه‌های پوشش داده‌شده با چگالی‌های مختلف آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد الگوی تمامی نمونه‌های پوشش داده‌شده و نمونه‌ی بدون پوشش تقریباً یکسان است و نمونه‌های پوشش داده‌شده از  $Z''$  و  $Z'$  بیشتری نسبت به نمونه شاهد برخوردارند و بیشترین میزان امیدانس مربوط به نمونه پوشش داده‌شده با چگالی جریان  $4\text{mA}/\text{cm}^2$  است که نتایج آزمون پلاریزاسیون را تأیید می‌کند.

منحنی نایکوئیست برای نمونه‌ی بدون پوشش و نمونه‌ی پوشش داده‌شده به ترتیب با مدارات معادل نشان داده‌شده در شکل 5 و شکل 6 که در آن  $R_s$ : مقاومت محلول،  $R_{ct}$ : مقاومت انتقال بار،  $Q$ : عنصر فاز ثابت،  $R_f$ : مقاومت پوشش و  $C_c$ : خازن لایه پوشش است با نرم‌افزار Z Simp Win تطبیق داده شد.



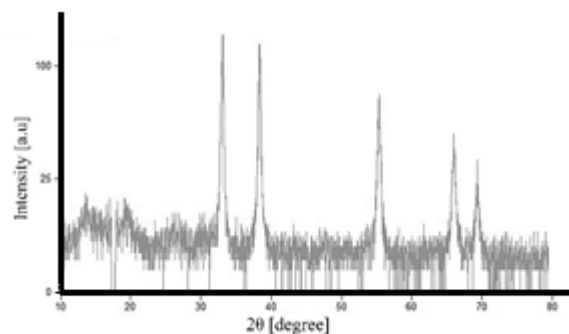
**Fig 4** Nyquist chart of control sample and coated samples with different current densities

شکل 4 نمودار نایکوئیست نمونه شاهد و نمونه‌های پوشش داده‌شده با چگالی جریان‌های مختلف

دانه‌ها پوشیده شده است و در مرز دانه‌ها، به دلیل پلیمریزاسیون ناقص و عدم وجود پیوند کامل بین پیروول موجود در دو دانه مجاور هم مکان‌هایی حاوی ترک و میکرو ترک به وجود آمده است. در pH خنثی مورفولوژی پوشش از حالت دانه‌ای به شکل فیلمی تبدیل شد، اما میزان چروک‌های به وجود آمده در این فیلم بسیار زیاد بود و ترک‌هایی در لبه این چروک‌ها مشاهده شد که در شکل 2b با فلش نمایش داده‌شده است. با افزایش بازیسیته محلول الکتروپلیمریزاسیون، از میزان این چروک‌ها کاسته شد، به‌گونه‌ای که در pH=9 میزان این چروک در پوشش حاصل بسیار کمتر از دیگر pH‌های پوشش دهی است و یک فیلم به نسبت یکنواخت‌تر از بقیه نمونه‌ها تشکیل شد و با افزایش بیشتر pH و رسیدن به مقدار 11 پوشش به وجود آمده بر سطح دارای ناهمگنی‌های بیشتری می‌گردد (شکل 2d).

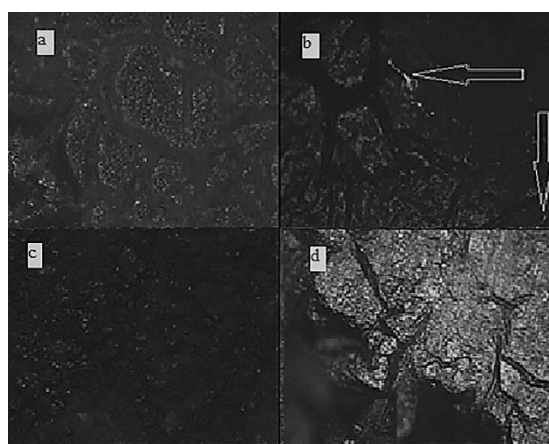
#### 3-3- نمودار پتانسیل\_زمان چگالی‌های جریان مختلف پوشش دهی

شکل 3 نشان‌دهنده نمودار پتانسیل\_زمان مربوط به چگالی‌های جریان 2، 4، 6 و 8 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع نمونه‌های پوشش داده‌شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است نمونه پوشش داده‌شده با چگالی جریان 4 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع کاملاً به‌صورت صعودی است و کمترین میزان نوسانات را در پتانسیل باگذشت زمان پوشش دهی داراست.



**Fig. 1** XRD pattern CNT/CdO powder

شکل 1 الگوی حاصل از آنالیز XRD پودر CNT/CdO



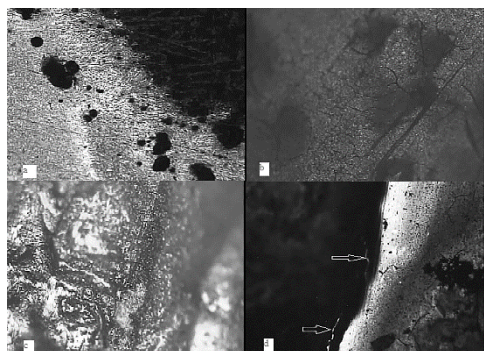
**Fig. 2** Optical microscope image at a magnification of around 50x for a) pH=5, b) pH=7, c) pH=9, d) pH=11

شکل 2 تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی 50 برای (a) pH=5، (b) pH=7، (c) pH=9 و (d) pH=11

نشان‌دهنده‌ی یک پوشش یکنواخت و کامل بر سطح فولاد است. نمونه پوشش داده‌شده با چگالی‌های جریان  $6\text{mA/cm}^2$  و  $8\text{mA/cm}^2$  به ترتیب در شکل 7c و 7d نشان داده‌شده است همان‌گونه که مشخص است در 7c نمونه دارای برجستگی‌های تاول مانند که با دایره نشان داده‌شده‌اند و در چگالی جریان  $8\text{mA/cm}^2$  پوشش دارای ترک است که با فلش نمایش داده‌شده‌اند و همچنین در نزدیکی این ترک‌ها مکان‌هایی وجود دارد که کاملاً از پیرول تهی است.

برای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی از سه نمونه پوشش داده‌شده با چگالی‌های جریان 2، 4 و 6 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع استفاده شد و نمونه پوشش داده‌شده با چگالی جریان 8 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، به دلیل ترک و عدم تشکیل پیرول بر بعضی از مکان‌های سطح از ادامه آنالیز حذف شد.

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را در بزرگنمایی 500 نشان می‌دهد. همان‌گونه که واضح است نمونه پوشش داده‌شده با چگالی جریان 2 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع پیرول در حال رشد است، نمونه پوشش داده‌شده با چگالی جریان 4 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع یک فیلم یکنواخت و با کمترین تخلخل به وجود آمد و پوشش دهی در چگالی جریان 6 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع فیلم پیرول ایجادشده دارای تخلخل‌های بسیار بزرگ است.

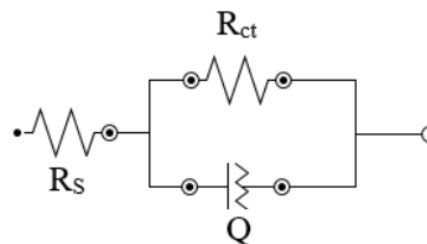


**Fig. 7** Optical microscope image at a magnification around 100x for coated specimens at different current densities a)  $2\text{mA/cm}^2$ , b)  $4\text{mA/cm}^2$ , c)  $6\text{mA/cm}^2$  & d)  $8\text{mA/cm}^2$

شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی 100 برای نمونه‌های پوشش داده‌شده با چگالی‌های مختلف (a)  $2\text{mA/cm}^2$  (b)  $4\text{mA/cm}^2$  (c)  $6\text{mA/cm}^2$  و (d)  $8\text{mA/cm}^2$

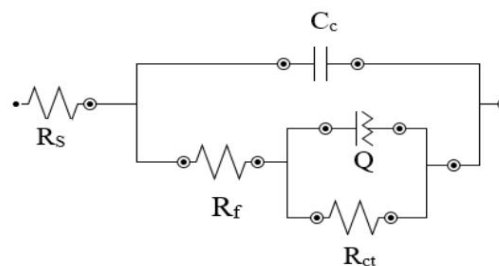
### 6-3- بررسی و بهینه‌سازی مقدار نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / اکسید کادمیم مورد استفاده

در ادامه به منظور سنتز کامپوزیت نهایی از درصد‌های وزنی-حجمی 0.02%، 0.1%، 0.5% و 1% از CNT/CdO در محلول بیان‌شده در بخش قبل برای انجام فرایند پوشش دهی استفاده شد. نمودار پتانسیل-زمان مربوط به الکتروپلیمریزاسیون پلی پیرول و پلی پیرول CNT/CdO با درصد‌های مختلف در شکل 9 آمده است. در مرحله ابتدایی تمام نمودارها با شروع فرایند در مدت‌زمان کوتاهی به یک حد بالایی از پتانسیل می‌رسند و سپس تقریباً ثابت می‌گردد. حد بالایی نمودار ابتدا با افزایش درصد CNT/CdO افزایش و مجدداً کاهش می‌یابد همچنین در نمونه‌های دارای CNT/CdO حد بالایی نمودار با نوساناتی روبه‌روست. این نوسانات با وجود استفاده از چگالی جریان 4 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و با تکرارپذیری بالا به وجود



**Fig. 5** Equivalent circuit used to match the impedance diagram obtained from the control sample

شکل 5 مدار معادل مورد استفاده جهت انطباق با طیف امپدانس بدست آمده از نمونه شاهد



**Fig. 6** Equivalent circuit used to match the impedance diagrams obtained for coated samples

شکل 6 مدار معادل مورد استفاده جهت انطباق با طیف‌های امپدانس بدست آمده برای نمونه‌های پوشش داده‌شده

با بررسی اجزای مدار معادل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار پارامترهای مربوط به هر جزء در جدول 2 آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت انتقال بار از  $147.5\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$  برای نمونه بدون پوشش به  $1234.1\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$  برای نمونه پوشش داده‌شده با چگالی جریان  $4\text{mA/cm}^2$  افزایش قابل توجهی داشته است، همچنین مقاومت پوشش برای این نمونه  $16.45\Omega\cdot\text{cm}^2$  است که از تمامی نمونه‌های پوشش داده‌شده بالاتر است.

تغییرات  $R_{ct}$  و  $R_f$  مربوط به خوردگی فلز پایه است [34] افزایش اولیه  $R_f$  و  $R_{ct}$  عمدتاً به سرعت تشکیل لایه‌ی اکسیدی بر سطح با توجه به افزایش چگالی جریان است و کاهش آن‌ها بعد از چگالی جریان بهینه عمدتاً مربوط به از دست رفتن حفاظت پوشش و ناشی از خوردگی الکتروشیمیایی فولاد است. همچنین ظرفیت خازنی پوشش  $C_c$  یک پارامتر مهم در اندازه‌گیری یکپارچگی پوشش است و به توانایی جذب آب توسط پوشش مربوط می‌گردد. نفوذ یون‌های کلرید به درون لایه‌ی پوشش باعث کم شدن  $R_f$  و افزایش  $C_c$  می‌گردد [35]. همان‌طور که از جدول 2 مشخص است، کمترین ظرفیت خازنی مربوط به نمونه‌ی پوشش داده‌شده با چگالی جریان  $4\text{mA/cm}^2$  است که بیانگر یکپارچگی بیشتر این پوشش و وجود مکان‌های نفوذ کمتر الکترولیت برای آن است که نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را تأیید می‌نماید. افزایش مجدد ظرفیت خازنی بیانگر از بین رفتن حفاظت پوشش و نفوذ الکترولیت به درون پوشش است.

### 5-3- بررسی میکروسکوپی نمونه‌های پوشش داده‌شده با چگالی‌های جریان مختلف

شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی 100 را برای چگالی‌های جریان مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که به‌وضوح مشخص است در نمونه پوشش داده‌شده با چگالی جریان  $2\text{mA/cm}^2$  قسمتی از سطح پوشش داده نشده است، شکل 7b تصویر مربوط به چگالی جریان  $4\text{mA/cm}^2$  به‌خوبی

آمدند که احتمالاً ناشی از نشست نانوکامپوزیت به همراه پلی پیروول بر روی سطح فلز است.

جدول 2 پارامترهای اجزاء مدار معادل بدست آمده از نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های پوشش داده‌شده با چگالی جریان‌های مختلف

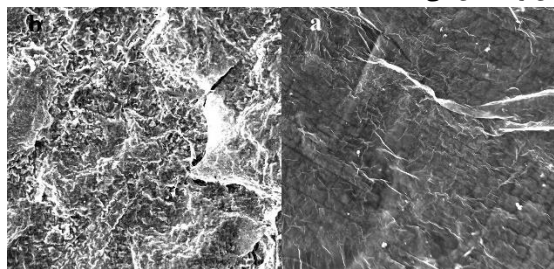
**Table 2** Parameters of the equivalent circuit components obtained from the control sample and the coated samples with different current densities

	$R_s (\Omega.cm^2)$	$C_c (f.cm^2)$	$R_f (\Omega.cm^2)$	$R_{ct} (K\Omega.cm^2)$	Q		$PE(\%) = \frac{R_{ct} - R_{ct0}}{R_{ct}} * 100$
					n	$Y (\mu f.cm^2)$	
Blanksample	14.7	--	--	147.5	0.8	$8.27 * 10^{-5}$	--
2mA/cm <sup>2</sup>	13.23	$6.64 * 10^{-8}$	15.84	395.8	0.8	$6.67 * 10^{-5}$	62.7
4mA/cm <sup>2</sup>	12.5	$5.48 * 10^{-8}$	16.45	1234.1	0.89	$26.4 * 10^{-5}$	88.04
6mA/cm <sup>2</sup>	12.92	$8.23 * 10^{-8}$	7.45	1049	0.84	$40.4 * 10^{-5}$	85.93
8mA/cm <sup>2</sup>	11.56	$1.92 * 10^{-7}$	9.76	599.7	0.81	$9.91 * 10^{-5}$	75.4

1%

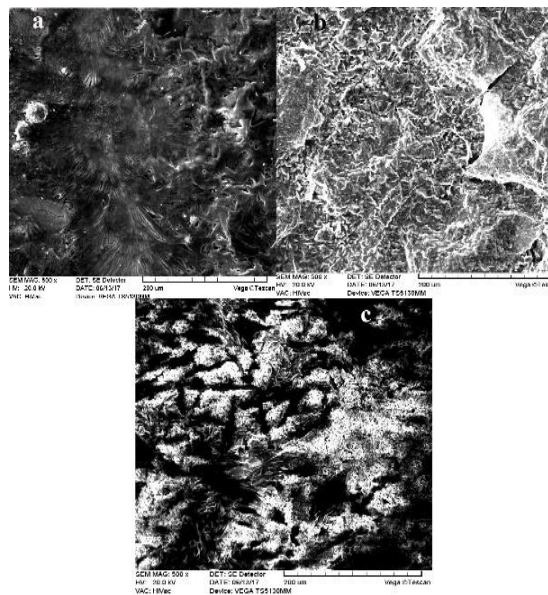
با افزایش درصد نانوکامپوزیت به محلول الکتروپلیمریزاسیون پلی پیروول، ابتدا پیروول با سرعت بیشتری بر سطح جوانه‌زنی و رشد می‌کند و سپس در درصدهای بسیار بالا نشست پیروول بر سطح الکتروود کار با مشکل روبه‌رو می‌شود. با افزایش درصد نانوکامپوزیت CNT/CdO ابتدا رسانندگی الکتریکی بالا می‌رود که این موضوع باعث افزایش پتانسیل در شکل 6 شده است و سپس افزایش بیش‌ازحد این نانوکامپوزیت از نشر و رسیدن پیروول به سطح الکتروود کار جلوگیری می‌کند و سطح در برخی نقاط عاری از پوشش است.

شکل‌های 10 و 11 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را برای حالات بهینه به دست آمده از بهینه‌سازی چگالی جریان پوشش دهی و بهینه‌سازی درصد مورد استفاده از مواد افزودنی را به ترتیب در بزرگنمایی‌های 500 و 2000 نشان می‌دهند. همان‌گونه که به‌وضوح مشخص است لایه پوششی به وجود آمده از پلی پیروول به همراه 0.5% وزنی از نانولوله کربنی/اکسید کادمیم (10b و 11b) یک فیلم بسیار یکنواخت‌تر از پوشش پلی پیروول (شکل 10a و 11a) ایجاد می‌کند و تقریباً هیچ‌گونه حفره‌ای در این نمونه وجود ندارد این در حالی است که وجود نقاط تاریک و روشن در نمونه پوشش دهی شده با پلی پیروول خالص بیانگر وجود پستی‌وبلندی در سطح پوشش اعمال شده است. نانولوله‌های کربنی عامل دار شده با افزایش رسانندگی پوشش می‌توانند به ایجاد فیلم محافظ آندی در سطح فلز کمک می‌کند و همچنین پس‌از آن در زمان قرارگیری در محیط خورنده می‌تواند با افزایش رسانندگی به انتقال سریع‌تر الکترون لازم برای برقراری مدار الکتروشیمیایی به‌دوراز سطح از واکنش خوردگی جلوگیری کند، اما اگر میزان این نانولوله‌های کربنی بیش‌ازحد باشد سریعاً در محلول ته‌نشین شده و آگلومره می‌شوند و دومرتبه چگالی جریان خوردگی افزایش یافته و درصد بهره‌وری پوشش را کاهش می‌دهد.



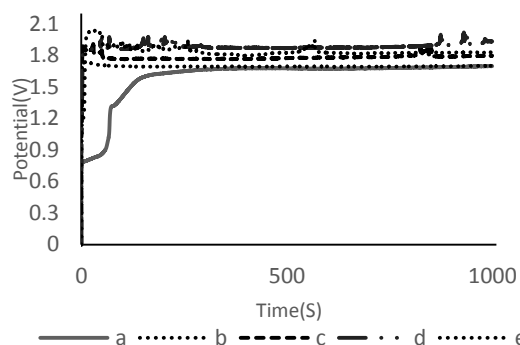
**Fig. 10** Scanning electron microscope image in se mode with a magnification of 500 for samples covered with: a) pour polypyrrole & b) polypyrrole Carbon nanotube/Cadmium Oxide

شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در مد se مربوط به (a) پوشش پلی پیروول خالص و (b) پوشش نانوکامپوزیت پلی پیروول نانولوله کربنی/اکسید کادمیم در بزرگنمایی 500



**Fig. 8** Scanning electron microscope image in se mode with a magnification of 500 for samples covered at three current densities, a) 2 mA/cm<sup>2</sup>, b) 5 mA/cm<sup>2</sup> & c) 7 mA/cm<sup>2</sup> at pH=9 and at the 900 seconds period

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در مد se با بزرگنمایی 500 را برای سه چگالی جریان پوشش دهی (a) 2mA/cm<sup>2</sup> (b) 4mA/cm<sup>2</sup> (c) و 7mA/cm<sup>2</sup> برای یک بازه زمانی 900 ثانیه‌ای



**Fig. 9** Potential-Time diagram for electropolymerization: a) pour polypyrrole, polypyrrole CNT/CdO nanocomposite with different percentages b) 0.02% CNT/CdO, c) 0.1% CNT/CdO, d) 0.5% CNT/CdO & e) 1% CNT/CdO

شکل 9 نمودار پتانسیل-زمان مربوط به الکتروپلیمریزاسیون پلی پیروول خالص، پلی پیروول CNT/CdO با درصدهای مختلف (a) پلی پیروول CNT/CdO (b) 0.02% (c) 0.1% (d) 0.5% و (e) CNT/CdO 1%

یافت. همچنین ظرفیت خازن نمونه پوشش داده‌شده با نانوکامپوزیت مقدار کمتری نسبت نمونه پوشش داده‌شده با پلی پیرول خالص است که نشانگر یکپارچگی بالاتر و نفوذ کمتر الکترولیت به پوشش نانو کامپوزیتی نسبت به پوشش پلی پیرول خالص است که با بررسی میزان تخلخل و یکنواختی این پوشش‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی\_روشی مطابق است.

### 8-3- بررسی ضخامت پوشش‌های تولیدشده

بررسی اندازه ضخامت پوشش‌ها با استفاده از مقطع برش و تصویر میکروسکوپ الکترونی\_روشی صورت پذیرفت. بدین منظور نمونه‌های پوشش داده‌شده با استفاده از میکرو برش به‌دقت به‌صورت مقطعی بریده‌شده و از سطح مقطع تصویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شد و تصویر حاصله با استفاده از نرم‌افزار image مورد بررسی قرار گرفت و ضخامت متوسط پوشش‌ها همان‌گونه که در شکل ۱۳ قابل‌مشاهده است حدود ۱۲۵.۶ میکرومتر تخمین زده شد.

### 9-3- بدست آوردن زمان مناسب غوطه‌وری برای انجام آزمون‌های

#### الکتروشیمیایی

پتانسیل مدارباز مربوط به نمونه فولاد استنلس استیل 304 و نمونه فولادی مذکور با پوشش پلی پیرول خالص غوطه‌ور شده در محلول اسیدکلریدریک نیم مولار باگذشت زمان اندازه‌گیری شد و نتایج حاصل در شکل 14 ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است پتانسیل مدارباز باگذشت زمان برای هر دو نمونه تا حدود 65 دقیقه با کاهش شدید روبه‌رو است و سپس تقریباً ثابت شده و ادامه می‌یابد. لذا از زمان 90 دقیقه غوطه‌وری برای آزمون‌های الکتروشیمیایی استفاده شد تا پس‌از آن رفتار خوردگی فلز با کمترین تغییر مواجه باشد.

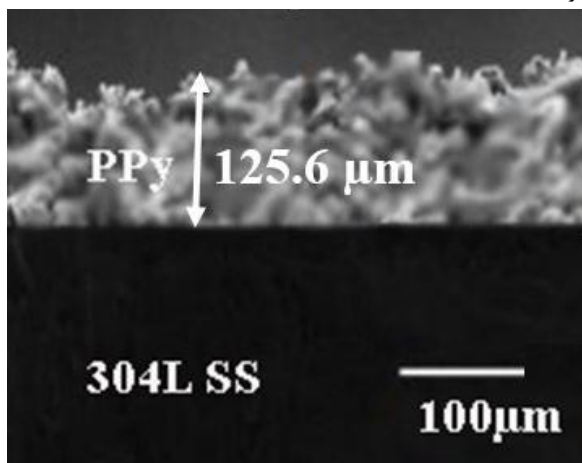


Fig. 13 Image of a scanning electron microscope from a cross section of a sample coated with a nanocomposite

شکل 13 تصویر میکروسکوپ الکترونی-روشی از سطح مقطع نمونه‌ی پوشش داده‌شده با نانوکامپوزیت

### 4-نتایج

شرایط بهینه برای ایجاد یک فیلم یکنواخت نانوکامپوزیت پلی پیرول نانولوله کربنی/کادمیم اکسید تعیین شد. در این شرایط پوشش تشکیل شده بر روی فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 دارای کمترین تخلخل و بیشترین پیوستگی و یکنواختی بود. بهترین بازسیته برای تشکیل یک فیلم یکنواخت پلی پیرول در pH=9 به دست آمد. در روش اعمال چگالی جریان ثابت، چگالی جریان

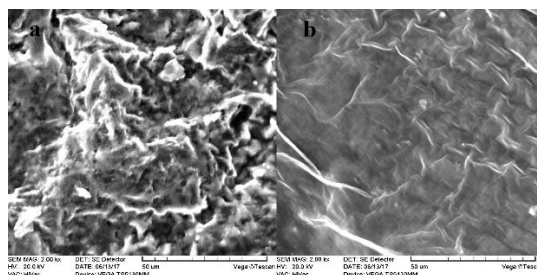


Fig. 11 Scanning electron microscope image in se mode with a magnification of 2000 for samples covered with: a) pour polypyrrole & b) polypyrrole Carbon nanotube/Cadmium Oxide  
شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی se در مد مربوط به (a) پوشش پلی پیرول خالص و (b) پوشش نانوکامپوزیت پلی پیرول نانولوله کربنی/کادمیم اکسید در بزرگمایی 2000

### 7-3- بررسی بهینه درصد مواد تقویت‌کننده نانوکامپوزیت با استفاده از

#### آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

برای دست‌یابی به درصد بهینه‌ی استفاده از نانولوله‌های کربنی عامل دار شده با اکسید کادمیم در پوشش نهایی از نمونه‌های پوشش داده‌شده با پلی پیرول حاوی 0.02، 0.1، 0.5 و 1 درصد وزنی\_حجمی نانولوله‌ی کربنی/کادمیم اکسید در محلول نیم مولار اسیدکلریدریک آزمون امپدانس الکتروشیمیایی گرفته شد که نتایج حاصل در شکل 12 آمده است. از مقایسه‌ی نمونه‌ی پوشش داده‌شده با پلی پیرول خالص در شرایط بهینه و نمونه‌های پوشیده شده با نانوکامپوزیت پلی پیرول نانولوله‌ی کربنی/اکسید کادمیم میزان امپدانس بیشتر نمونه‌های نانو کامپوزیتی مشهود است و این موضوع بیانگر بهبود خواص حفاظتی پوشش از خوردگی فولاد است.

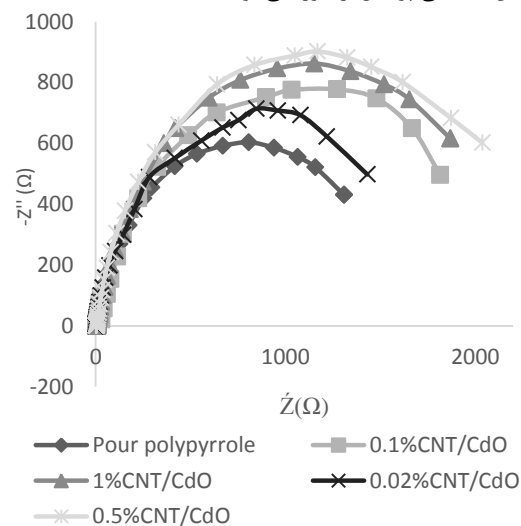


Fig. 12 Nyquist chart for samples coated with pure polypyrrole and polypyrrole containing different percentages of carbon nanotube / cadmium oxide

شکل 12 نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه‌های پوشش داده‌شده با پلی پیرول خالص و پلی پیرول حاوی درصد‌های مختلف نانولوله کربنی/اکسید کادمیم

بررسی پارامترهای مدار معادل نمونه‌های پوشش داده‌شده با نانوکامپوزیت در مقایسه با پوشش پلی پیرول خالص در جدول 3 آمده است. به‌وضوح مشخص است که مقاومت انتقال بار از  $1234.1 \text{K}\Omega \cdot \text{cm}^2$  برای نمونه‌ی پوشش داده‌شده با پلی پیرول خالص به  $2038.3 \text{K}\Omega \cdot \text{cm}^2$  برای نمونه‌ی پوشش داده‌شده با 0.5% وزنی حجمی نانولوله کربنی عامل دار شده افزایش

است تقدیر و تشکر می‌نمایند.

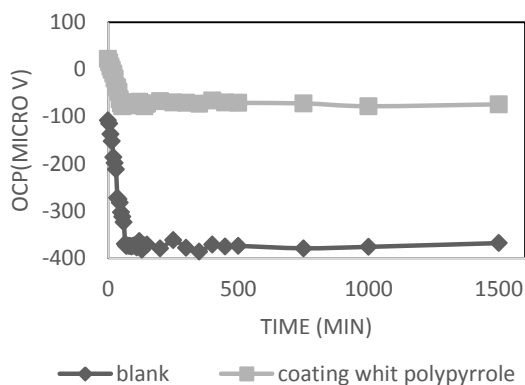


Fig. 14 Open circuit potential diagram in terms of immersion time

شکل 14 نمودار پتانسیل مدار باز بر حسب زمان غوطه‌وری

بهبود برای پوشش دهی  $4\text{mA}/\text{cm}^2$  تعیین شد. افزودن نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/کادمیم اکسید به پلی پیرول از طرفی میزان رسانندگی پوشش را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، با در هم تنیدگی نانولوله‌ها و پیوستگی آن‌ها در کل سطح، میزان تخلخل و غیریکنواختی‌های موجود در پلی پیرول را کاهش می‌دهد و در جلوگیری از رسیدن الکترولیت به سطح فلز و نفوذ آن به درون پوشش نقش بسزایی ایفا می‌کند. میزان بهینه تقویت‌کننده نانولوله کربنی/کادمیم اکسید 0.5% وزنی حجمی محلول پلیمریزاسیون به دست آمد. ضخامت پوشش‌ها با استفاده از تصویر سطح مقطع حدود 125 میکرومتر تخمین زده شد.

## 5-سیاسگزار

در پایان محققان از دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان که با حمایت مالی خود نقش مهمی در انجام این تحقیق ایفا کرده

**جدول 3** پارامترهای اجزاء مدار معادل بدست آمده از نمونه‌ی شاهد، نمونه‌ی پوشش داده‌شده با پلی پیرول خالص و نمونه‌های پوشش داده‌شده با پلی پیرول حاوی درصدی مختلف نانولوله/اکسید کادمیم

**Table 3** Parameters of the equivalent circuit components obtained from the control, a sample coated with pure polypyrrole and samples coated with polypyrrole containing different percentages of carbon nanotube / cadmium oxide

	$R_s (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_c (\text{f} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_f (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct} (\text{K}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	Q		$\text{PE}(\%) = \frac{R_{ct} - R_{ct0}}{R_{ct}} * 100$
					n	Y ( $\mu\text{f} \cdot \text{cm}^2$ )	
Blank Sample	14.7	--	--	147.5	0.8	$8.27 * 10^{-5}$	--
Pour polypyrrole	12.5	$5.48 * 10^{-8}$	16.45	1234.1	0.89	$26.4 * 10^{-5}$	88.04
0.02% CNT/CdO	11.8	$3.96 * 10^{-8}$	17.69	1432	0.8	$18.8 * 10^{-5}$	89.7
0.1% CNT/CdO	11.12	$4.59 * 10^{-8}$	20.22	1817	0.8	$15.9 * 10^{-5}$	91.88
0.5% CNT/CdO	13.1	$1.49 * 10^{-8}$	23.99	2038.3	0.8	$15.8 * 10^{-5}$	92.76
1% CNT/CdO	12.36	$2.83 * 10^{-8}$	21.48	1870.99	0.8	$19.3 * 10^{-5}$	92.1

Nanocomposites" Ceram. Int., Vol. 40, No. 6, pp. 8013–8020, 2014.

- [11] Hosseini, MG. Bagheri, R. and Najjar, R., "Electropolymerization of Polypyrrole and Polypyrrole-ZnO Nanocomposites on Mild Steel and Its Corrosion Protection Performance" Journal of Applied Polymer Science, Vol. 121, pp. 3159–3166, 2011.
- [12] Alam, R. Mobin, M. and Aslam, J., "Surface & Coatings Technology Polypyrrole / graphene nanosheets / rare earth ions / dodecyl benzene sulfonic acid nanocomposite as a highly effective anticorrosive coating" Surf. Coat. Technol., Vol. 307, pp. 382–391, 2016.
- [13] Kaushik, BK. and Majumder, MK., "Carbon Nanotube Based VLSI Interconnects, Analysis and Design, Indian Institute of Technology Roorkee" Springer, Springer New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London, Chapter 2, pp. 17-30, 2015.
- [14] Sun, Y. Sun, J. Liu, M. and Chen, Q., "Mechanical Strength of Carbon Nanotube–Nickel Nanocomposites" Nanotechnology, Vol. 18, No. 50, p. 505704(6), 2007.
- [15] Dai, H., "Carbon Nanotubes: Synthesis, Integration, and Properties" Acc. Chem. Res., Vol. 35, pp. 1035–1044, 2002.
- [16] McEuen, PL. and Park, J. Y., "Electron Transport in Single-Walled Carbon Nanotubes" Mrs Bulletin, Vol.29, No. April, pp. 273-275, 2004.
- [17] Cook, BG. French, W. R. and Varga, K., "Electron Transport Properties of Carbon Nanotube-Graphene Contacts" Appl. Phys. Lett., Vol. 101, No. 15, pp. 10–13, 2012.
- [18] Yao, Z. Kane, C. and Dekker, C., "High-Field Electrical Transport in Single-Wall Carbon Nanotubes" Phys. Rev. Lett., Vol. 84, No. 13, pp. 2941–2944, 2000.
- [19] Asli, NA. Shamsudin, MS. Falina, AN. Azmina, MS. Suriani, AB. Rusop, M. and Abdullah, S., "Field Electron Emission Properties of Vertically Aligned Carbon Nanotubes Deposited on a Nanostructured Porous Silicon Template: The Hidden Role of The Hydrocarbon/Catalyst Ratio" Microelectron. Eng., Vol. 108, pp. 86–92, 2013.
- [20] Tripathi, AK. Jain, V. Saini, K. and Lahiri, I., "Field Emission Response from Multi-Walled Carbon Nanotubes Grown On

- [1] Olad, A. and Naseri, B., "Preparation, Characterization and Anticorrosive Properties of a Novel Polyaniline/Clinoptilolite Nanocomposite" Prog. Org. Coatings, Vol. 67, No. 3, pp. 233–238, 2010.
- [2] Duchet, J. Legras, R. and Demoustier-champagne, S., "Chemical Synthesis of Polypyrrole: Structure – Properties Relationship" Synthetic Metals, Vol. 98, No. July, pp. 113–122, 1998.
- [3] Lu, G. Li, C. and Shi, G., "Polypyrrole Micro and Nanowires Synthesized by Electrochemical Polymerization of Pyrrole in The Aqueous Solutions Of Pyrenesulfonic Acid" Polymer, Vol. 47, pp. 1778–1784, 2006.
- [4] Kamal, MM. and Bhuiyan, AH., "Direct Current Electrical Conduction Mechanism in Plasma Polymerized Pyrrole Thin Films Kamal & Bhuiyan" Synthetic Metals, Vol. 2, No. 2, pp. 1–9, 2014.
- [5] Wang, J. K. Neoh, G. and Kang, E. T., "Comparative Study of Chemically Synthesized and Plasma Polymerized Pyrrole and Thiophene Thin Films" Thin Solid Films, Vol. 446, pp. 205–217, 2004.
- [6] Sharifirad, M. Omrani, A. Rostami, A. A. and Khoshroo, M., "Electrodeposition and Characterization of Polypyrrole Films On Copper" J. Electroanal. Chem., Vol. 645, No. 2, pp. 149–158, 2010.
- [7] Skotheim, TA. and Reynolds, JR., "Handbook of Conducting Polymers, processing and application, CRC Press" Taylor & Francis Group, Vol. II, Chapter 8, Marcel Dekker, New York, pp. 8.1- 8.13, 1997.
- [8] Gholami, M. Ghasemi, A. Loghavi, MM. Behkami, S. and Ahamdi-dokht-faraghe, A., "Preparation of a Miniaturised Iodide Ion Selective Sensor Using Polypyrrole and Pencil Lead: Effect of Double-Coating, Electropolymerisation Time, and Current Density" Chemical Papers, Vol. 67, No. 8, pp. 1079–1086, 2013.
- [9] Tsai, M. Chen, P. and Do, J., "Preparation and characterization of Ppy / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Al Used as a Solid-State Capacitor" Journal of Power Sources, Vol. 133, pp. 302–311, 2004.
- [10] Navale, ST. Khuspe, GD. Chougule, M. A. and Patil, VB. "Room Temperature NO<sub>2</sub> Gas Sensor Based on Ppy / A -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Hybrid

## 6-مراجع

- Electrochemically Engineered Copper Foil” *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 187, pp. 39–45, 2017.
- [21] Okuyama, H. Iwata, N. and Yamamoto, H., “Position-Selective Growth of Vertically Aligned Carbon Nanotubes for Application of Electronic-Measuring Nanoprobes” *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, Vol. 37, No. 1, pp. 49–53, 2007.
- [22] De Nicola, F. Salvato, M. Cirillo, C. Crivellari, M. Boscardin, M. Passacantando, M. Nardone, M. De Matteis, F. Motta, N. De Crescenzi, M. and Castrucci, P., “100% Internal Quantum Efficiency in Polychiral Single-Walled Carbon Nanotube Bulk Heterojunction/Silicon Solar Cells” *Carbon N. Y.*, Vol. 114, No. 2017, 2017.
- [23] Alimohammadi, V. Sedighi, M. and Jabbari, E., “Experimental Study on Efficient Removal Of Total Iron From Wastewater Using Magnetic-Modified Multi-Walled Carbon Nanotubes,” *Ecol. Eng.*, Vol. 102, pp. 90–97, 2017.
- [24] Hayati, B. Maleki, A. Najafi, F. Daraei, H. Gharibi, F. and McKay, G., “Synthesis and Characterization of PAMAM/CNT Nanocomposite as a Super-Capacity Adsorbent for Heavy Metal (Ni<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, As<sup>3+</sup>, Co<sup>2+</sup>) Removal From Wastewater” *J. Mol. Liq.*, Vol. 224, pp. 1032–1040, 2016.
- [25] Xu, D. Li, B. Wei, C. He, YB. Du, H. Chu, X. Qin, X. Yang, Q. H. and Kang, F., “Preparation and Characterization of MnO<sub>2</sub>/acid-treated CNT Nanocomposites for Energy Storage with Zinc Ions” *Electrochim. Acta*, Vol. 133, pp. 254–261, 2014.
- [26] Aravindan, N. Sangaranarayanan, M. V., “Influence of Solvent Composition on the Anti-Corrosion Performance of Copper-Polypyrrole (Cu-Ppy) Coated 304 Stainless Steel”. *Progress in Organic Coatings*. 2016 Jun 30; 95:38-45.
- [27] Kumar, A. M. Rajendran, N., “Influence of Zirconia Nanoparticles on the Surface and Electrochemical Behaviour of Polypyrrole Nanocomposite Coated 316L SS in Simulated Body Fluid”. *Surface and Coatings Technology*. 2012 Dec 31; 213:155-66.
- [28] Ruhi, G. Modi, OP. Dhawan, SK., “Chitosan-Polypyrrole-SiO<sub>2</sub> Composite Coatings with Advanced Anticorrosive Properties. *Synthetic Metals*”. 2015 Feb 28; 200:24-39.
- [29] Alam, R. Mobin, M. Aslam, J., “Polypyrrole/Graphene Nanosheets/rare Earth Ions/dodecyl Benzene Sulfonic Acid Nanocomposites as a Highly Effective Anticorrosive Coating”. *Surface and Coatings Technology*. 2016 Dec 15; 307:382-91.
- [30] Ananth, K. P. Nathanael, A. J. Jose, S. P. Oh, T. H. Mangalaraj, D., “a Novel Silica Nanotube Reinforced Ionic Incorporated Hydroxyapatite Composite Coating on Polypyrrole Coated 316L SS For Implant Application”. *Materials Science and Engineering: C*. 2016 Feb 1; 59:1110-24.
- [31] Feng, J. Xiong, S. Qian, Y. and Yin, L., “Synthesis of Nanosized Cadmium Oxide (CdO) as a Novel High Capacity Anode Material for Lithium-Ion Batteries: Influence of Carbon Nanotubes Decoration and Binder Choice” *Electrochim. Acta*, Vol. 129, pp. 107–112, 2014.
- [32] Badawi, A. Al-Hosiny, N. Abdallah, S. Merazga, A. and Talaat, H., “Single Wall Carbon Nanotube/Titania Nanocomposite Photoanodes Enhance The Photovoltaic Performance of Cadmium Selenide Quantum Dot-Sensitized Solar Cells” *Mater. Sci. Semicond. Process*. Vol. 26, No. 1, pp. 162–168, 2014.
- [33] Aeiyaich, S. Aaron, J. J. and Diderot, D., “Of Strongly Adherent Coating on Iron and Mild Steel in Aqueous Media” Vol. 41, No. 1, pp. 1801–1809, 1996.
- [34] Pan, TJ. Zuo, XW. Wang, T. Hu, J. Chen, ZD. Ren, Y. J., “Electrodeposited Conductive Polypyrrole/Polyaniline Composite Film For the Corrosion Protection of Copper Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells”. *Journal of Power Sources*. 2016 Jan 20; 302: 180-8.
- [35] Ruhi, G. Bhandari, H. Dhawan, S. K., “Designing of Corrosion Resistant Epoxy Coatings Embedded With Polypyrrole/Sio 2 Composite”. *Progress in Organic Coatings*. 2014 Sep 30; 77(9):1484-98.







## بررسی خواص مقاومت فشاری و ضربه کامپوزیت آلومینیم-گرانول آلومینا تولید شده به روش ریخته‌گری تحت فشار

قدرت الله رودینی<sup>1\*</sup>، مرتضی خسروی<sup>2</sup>، محسن خمیری<sup>3</sup>

1- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- مربی، مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

\* زاهدان، صندوق پستی 987-98155، ghodratollah.roudini@eng.usb.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/2/31

پذیرش: 96/10/7

### کلیدواژگان:

گرانول آلومینا

آلومینیم

کامپوزیت

سینترینگ

### چکیده

کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیم - آلومینا با خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب از مواد مدرن مهندسی هستند. این کامپوزیت‌ها بطور وسیع در بسیاری از صنایع (هوا-فضا، اتومبیل، الکترونیک و غیره) استفاده می‌شوند. در این پژوهش پیش‌فرم گرانول آلومینا با اندازه‌ها مختلف (20-100 μm) تولید و در دماهای 1300°C و 1400°C و به مدت زمان دو ساعت سینتر شدند. سپس آنها در دمای 700°C و به مدت یک ساعت پیش‌گرم شدند. سپس پیش‌فرم‌های گرانول آلومینا بوسیله مذاب آلومینیم با فشار 3MPa با روش ریخته‌گری تحت فشار فلزخورانی شدند. بعد از ساخت کامپوزیت‌ها خواص ساختاری آنها با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مطالعه شد. نتایج حاصل از بررسی ریزساختاری نشان داد که در دمای بالای سینترینگ مقدار حفرات کم و درات آلومینا به خوبی به همدیگر متصل شده‌اند. همچنین خواص مکانیکی استحکام فشاری، استحکام ضربه و میکروسختی نیز در کامپوزیت‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای سینترینگ گرانول آلومینا، باعث افزایش استحکام فشاری و سختی کامپوزیت می‌شود ولی مقاومت به ضربه کاهش می‌یابد.

## Compression and impact strength study of aluminum- alumina granule produced by squeeze-casting method

Ghodratollah Roudini<sup>\*</sup>, Morteza Khosravi, Mohsen Khammari

Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

\* P.O.B. 987-98155, Zahedan, Iran, ghodratollah.roudini@eng.usb.ac.ir

### Keywords

Alumina granule

Aluminium

Composite

Sintering

### Abstract

Aluminum-ceramic metal matrix composite is a class of modern engineering materials with interesting physical and mechanical properties. These composites are used widely in many industrial (aerospace, automobile, electronic and etc). In present study, alumina granules preforms with different size (20-100 μm) were made and sintered at 1300°C and 1400°C for 2 h. Then the preforms were preheated at 700°C for 1h. Finally, molten Al was infiltrated into the preforms under load of 3 MPa by squeeze casting method. After composites making their microstructures were studied by SEM and optical microscope. The microstructure results showed that composite with higher sintering temperature has low porosities and well connected granules. Also, compressive strength, impact resistance and hardness of the composites were investigated. The results showed that sintering temperature improved compressive strength and hardness of the composites, but impact strength decreased. The strength and brittleness of the composites is higher for the composites with high sintering temperature.

### 1-مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی، خواص مکانیکی قابل توجهی همچون استحکام فشاری، مقاومت به خستگی و خزش بالا [1]، مقاومت به سایش و پایداری حرارتی خوبی را نشان می‌دهند [2] و به همین دلیل کاربردهای متعددی در صنایع هوافضا، خودروسازی و نظامی پیدا کرده‌اند [3]. کامپوزیت‌ها از دو یا چند ماده مجزا ساخته شده است که می‌تواند فلزی، سرامیکی و یا پلیمری باشد. هدف از ساخت کامپوزیت‌ها رسیدن به خواصی که به تنهایی هیچ یک از اجزاء سازنده کامپوزیت ندارند [4]. معمولاً جزء

تقویت‌کننده کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دو شکل الیافی یا ذره‌ای می‌باشند

که در یک زمینه فلزی توزیع شده‌اند [5].

استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی به جای فلزات مزایایی چون، افزایش نسبت استحکام به وزن، پایداری زیاد ابعادی نسبت به تغییرات دمایی محیط، افزایش مقاومت خزشی و بهبود استحکام خستگی را دارد [6]. از جمله برتری‌های کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به کامپوزیت‌های پلیمری می‌توان به استحکام، سختی، هدایت الکتریکی و حرارتی و تحمل حرارتی

### Please cite this article using:

Roudini, G. Khosravi, M. and Khammari, M., "Compression and impact strength study of aluminum- alumina granule produced by squeeze-casting method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 387-394, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

بالتر اشاره نمود. از خصوصیات اصلی کامپوزیت‌های زمینه فلزی بالا بودن استحکام است [5].

گستره وسیعی از آلیاژهای آلومینیم در کامپوزیت های زمینه فلزی استفاده می‌شود. چگالی اغلب آلیاژهای آلومینیم به چگالی آلومینیم خالص نزدیک است که این مقدار تقریباً 2.7 (گرم بر سانتی‌متر مربع) است. آلومینیم خالص در دمای 660 سانتیگراد ذوب می‌شود. این دمای ذوب نسبتاً پایین در مقایسه با اکثر فلزات، مناسب برای ماده زمینه کامپوزیت، باعث تسهیل فرآیند تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی پایه آلومینیم در برابر روش‌هایی مانند متالورژی پودر و روش‌های قالب‌گیری می‌گردد. در این میان کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی به علت وزن پایین، استحکام بالا، مقاومت سایشی عالی و ضریب انبساط حرارتی پایین در مقایسه با آلیاژ زمینه دسته مهمی از مواد پیشرفته هستند [7].

مقاومت سایشی آلومینیم کم است. به همین دلیل کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم بهبود قابل توجهی در خواص سایشی در مقایسه با آلومینیم از خود نشان داده‌اند [8]. کامپوزیت‌های تقویت‌شده ذره‌ای استفاده‌های زیادی دارند که از دلایل آن می‌توان به عدم وابستگی خواص مکانیکی به جهت قرارگیری ذرات دانست. تحقیقات نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات سرامیکی دارای خواص مکانیکی و سایشی بهتری هستند [9].

اغلب مواد تقویت‌کننده مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، سرامیک‌ها اکسیدها، کاربیدها، نیتrideها هستند. سرامیک‌ها موادی ویژه از لحاظ استحکام و سختی در محیط‌های با دمای معمولی و دما بالا هستند. تقویت‌کننده‌ها به دو گروه عمده تقویت‌کننده‌های ذره‌ای یا ویسکرها و تقویت‌کننده های الیافی تقسیم می‌شوند [10].

نقش تقویت‌کننده به نوع ساختار کامپوزیت زمینه فلزی وابسته است. در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات، زمینه تحمل‌کننده بار اعمالی است. نقش تقویت‌کننده ایجاد استحکام و سختی کامپوزیت به واسطه جلوگیری از تغییر شکل زمینه است، که این عمل با موانع فیزیکی ایجاد شده به وسیله تقویت‌کننده انجام می‌شود [11].

یکی از مهمترین تقویت‌کننده‌ها در ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینا می‌باشد [12]. آلومینا، اکسید آلومینیم است و ماده معدنی بلوری آن کوراندوم نام دارد. آلومینا به دلیل سختی، استحکام و دمای ذوب بالا به عنوان ماده ساینده مورد استفاده قرار می‌گیرد [13].

تحقیقات زیادی برای ساخت کامپوزیت‌های ذره‌ای توسط پودر آلومینا و سایر سرامیک‌ها با زمینه آلومینیم و آلیاژهای آلومینیم انجام شده است [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰].

خرم خورشید و همکارانش توانستند از پودر شیشه‌ای  $Al_{84}Gd_6Ni_7Co_3$  و آلومینیم خالص به روش ای.آر.بی<sup>۱</sup> کامپوزیتی با خواص قابل ملاحظه تولید کنند. در این تحقیق نشان داده شد، در کامپوزیتی که طی 9 مرحله از فرآیند ای.آر.بی قرار گرفته است، ذرات تقویت‌کننده به خوبی توزیع شده و تخلخل کامپوزیت بسیار کم شده و استحکام و سختی کامپوزیت نیز به صورت معناداری نسبت به آلومینیم خالصی که تحت عملیات مشابه قرار گرفته؛ افزایش یافته است [9].

بودوکوری و همکارانش با کاربرد بور<sup>۲</sup> و کاربرد سیلیسیم<sup>۳</sup> به عنوان تقویت‌کننده و آلومینیم، با استفاده از روش‌های آلیاژسازی مکانیکی و

متالورژی پودر توانستند کامپوزیتی تولید کنند که سختی آن تا حد زیادی نسبت به آلومینیم افزایش یافت و مشاهده شد که هر چه مقدار کاربرد بور در پودر آسیاب شده بیشتر بود استحکام به دست آمده نهایی نیز بیشتر شد [15].

در یکی از آخرین تحقیقات انجام شده در مورد کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم زارع و همکارانش توانستند با کامپوزیت‌سازی آلومینیم به وسیله نانو-لوله‌های کربنی، استحکام کامپوزیت آن را نسبت به آلومینیم تا 30 درصد افزایش دهند و این در حالی بود که چگالی کامپوزیت تولید شده نسبت به آلومینیم خالص کاهش یافته بود. البته انعطاف پذیری کامپوزیت تولید شده نیز نسبت به آلومینیم خالص کاهش یافته بود [18].

در تحقیق دیگری رحیمیان و همکارانش، اثر اندازه و مقدار ذرات پودر آلومینا بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیم- پودر آلومینا که به روش متالورژی پودر ساخته شد را مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده شد که با افزایش مقدار ذرات آلومینا و نیز کاهش اندازه ذرات آن، استحکام و چگالی کامپوزیت افزایش یافت و همچنین با افزایش مقدار آلومینا در کامپوزیت انعطاف‌پذیری کاهش یافت اما در یک مقدار مشخص آلومینا با کاهش اندازه ذرات آلومینا انعطاف‌پذیری افزایش یافت [19].

به جای استفاده از ذرات سرامیکی می‌توان از گرانول آن‌ها در ساخت کامپوزیت استفاده کرد. گرانول سازی فرآیندی برای بزرگ کردن و مجتمع کردن ذرات کوچک است که به طور گسترده در صنایع استفاده می‌شود [21]. خواص گرانول به عوامل مختلفی از جمله روش ساخت، اندازه، شکل ذرات و دمای سینترینگ بستگی دارد. با کاهش اندازه ذرات و افزایش دمای سینترینگ می‌توان استحکام و دانسیته گرانول را افزایش داد [22، 23].

شفیعی و همکارانش در تحقیقی برای ساخت گرانول آلومینا نشان دادند که با افزایش نسبت چسب به آلومینا، اندازه ذرات گرانول آلومینا و استحکام پس از سینتر آن‌ها افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش دمای سینترینگ مقدار تخلخل گرانول کاهش می‌یابد [23].

در این تحقیق به جای استفاده از پودر آلومینا، از گرانول آلومینا برای ساخت کامپوزیت استفاده شد. از آنجایی که گرانول دارای تخلخل است باعث کاهش چگالی کامپوزیت ساخته شده می‌شود. سینترینگ گرانول‌ها باعث کاهش تخلخل‌ها و افزایش استحکام آنها می‌شود که در این تحقیق تاثیر این عوامل بر خواص مکانیکی کامپوزیت بررسی شد.

## 2-روش انجام آزمایش

ساخت کامپوزیت آلومینیم- گرانول آلومینا به روش ریخته‌گری تحت فشار انجام گرفت. قالب و پیش فرم در کوره الکتریکی پیش گرم و مذاب توسط کوره القایی آماده گردید. کوره القایی مورد استفاده ساخت شرکت تپکا می‌باشد. مذاب مورد استفاده در بوته‌ای که از جنس کاربرد سیلیسیم بود تهیه شد. کوره پیش‌گرم از نوع الکتریکی مقاومتی و ساخت شرکت تجهیز سرام است که می‌تواند حداکثر دمای 1200 سانتیگراد را تامین نماید. دمای پیش‌گرم برای همه نمونه‌های گرانول قبل از تزریق مذاب 700 سانتیگراد انتخاب شد. مشخصات مواد اولیه که برای ساخت گرانول‌ها مورد استفاده قرار گرفته در جدول 1 آمده است.

از محلول پلی وینیل الکل<sup>۴</sup> با غلظت‌های مختلف به عنوان مایع پیوند دهنده استفاده شد. پنج درصد وزنی پودر خشک اولیه را در تمام آزمایش‌ها سیلیس<sup>۵</sup> تشکیل می‌دهد و مابقی آن آلومینا<sup>۱</sup> است. برای تهیه گرانول از 285

<sup>1</sup> - Accumulative Roll Bonding (ARB)

<sup>2</sup> - B<sub>4</sub>C

<sup>3</sup> - SiC

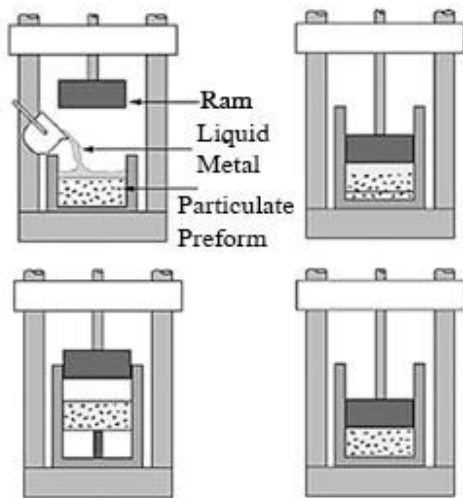
<sup>4</sup> - PVA

<sup>5</sup> - SiO<sub>2</sub>

تولیدی است. کسر حجمی گرانول به کار رفته در کامپوزیت که در جدول 2 آمده است توسط نرم افزار ایمج جی محاسبه شده است.

**جدول 1** مشخصات مواد اولیه برای ساخت کامپوزیت آلومینوم-گرانول آلومینا  
**Table 1** specifications of materials for manufacturing aluminum-alumina granular composite

نوع ماده	اندازه ذرات (μm)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	خلوص (%)
پودر آلومینا	1	6	99.5
پودر سیلیس	6.5-8.5	6	99.4
آلومینیم	-----	----	99.5



**Fig.1** Overview of in-semination methode to manufacturing composite particles [14]

شکل 1 شمای کلی از روش فلزخورانی برای تولید کامپوزیت ذره‌ای [14]

**جدول 2** درصد تخلخل کامپوزیت‌ها و درصد حجمی گرانول در کامپوزیت‌ها  
**Table 2** porosity percent of composites and volum fraction of granuls in composites

شرایط سینترینگ	اندازه گرانول (μm)	درصد تخلخل گرانول	درصد حجمی گرانول
بدون سینتر	840	23	55
بدون سینتر	500	19	62
بدون سینتر	300	17	67
بدون سینتر	150	11	75
2 h – 1300 °C	840	15	55
2 h – 1300 °C	500	13	62
2 h – 1300 °C	300	10	67
2 h – 1300 °C	150	8	75
2 h – 1400 °C	840	13	55
2 h – 1400 °C	500	9	62
2 h – 1400 °C	300	7	67
2 h – 1400 °C	150	4	75

شکل‌های 2، 3 و 4 از آزمون فشار نمونه‌های مختلف کامپوزیت‌های ساخته شده به دست آمده است. از آنجایی که از آزمون فشار برای بررسی

گرم آلومینا و 15 گرم سیلیس با میانگین اندازه ذره 8.1-6.5 میکرومتر به عنوان پودر اولیه و از محلول پلی وینیل الکل در آب مقطر به عنوان مایع پیوند دهنده درحفظه اختلاط یک لیتری استفاده شد. ابتدا اختلاط خشک پودر اولیه را در مدت زمان کمی (درحدود 5 دقیقه) با حرکت پروانه همزن و سرعت 150 دور بر دقیقه انجام شد. سپس 68 و 78 میلی‌لیتر از مایع پیوند دهنده را با دبی 150 میلی‌لیتر بر ساعت به تدریج با روش پاشیدن در درون دستگاه به آن اضافه شد و پس از مدتی اختلاط، گرانول‌های مورد نظر از دستگاه خارج شده و برای خشک کردن آن‌ها، در دمای محیط آزمایشگاه به مدت 12 ساعت روی یک سطح صاف قرار گرفت.

به منظور افزایش استحکام دانه‌های گرانول عملیات سینترینگ بر روی آنها انجام شد. جهت سینتر کردن گرانول آلومینا، از ظرفی گرافیتی که به شکل استوانه ساخته شده بود؛ استفاده شد و دماهای 1300 و 1400 سانتیگراد جهت سینترینگ انتخاب شد.

در این پژوهش از سه نوع گرانول در چهار اندازه متفاوت برای ساخت کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیم استفاده شد. گرانول‌ها در سه نوع سینتر نشده، سینتر شده در دو دمای 1300 و 1400 سانتیگراد تهیه شدند. از ظرفی گرانول‌ها در اندازه‌های متفاوت 150، 300، 500، 840 میکرومتر تهیه شدند و در مجموع 12 نوع گرانول برای ساخت کامپوزیت تهیه شد.

برای تزریق مذاب در بین گرانول‌های آلومینا از یک پیستون و سیلندر استفاده شد که شمای کلی فرآیند تزریق مذاب در شکل 1 نشان داده شده است. برای این منظور از یک دستگاه پرس هیدرولیک استفاده گردید که فشاری معادل 10 مگاپاسکال، تنش روی مذاب اعمال کرد تا تزریق مذاب بطور کامل انجام شود.

نمونه‌های کامپوزیت تولید شده برای آزمون فشار، استوانه‌ای به قطر 20 میلی‌متر و ارتفاع 30 میلی‌متر بودند و توسط دستگاه آزمون فشار<sup>۱</sup> با نرخ کرنش 0.02 میلی‌متر بر دقیقه، مورد آزمایش قرار گرفتند.

آزمون ضربه توسط دستگاهی با ظرفیت حداکثر 4 ژول انجام شد. نمونه‌های آزمون ضربه به شکل مکعب مستطیل و با سطح مقطع 10×10 میلی‌متر و طول 55 میلی‌متر تهیه شد که در قسمت وسط آن شیار به عمق 5 میلی‌متر ایجاد شد و در قسمت انتهایی شیار سوراخی به قطر 2 میلی‌متر تعبیه گردید.

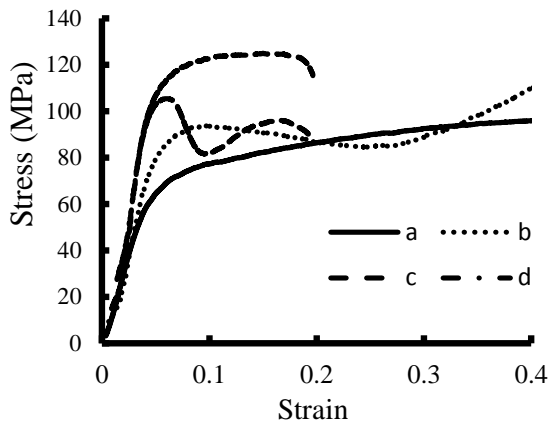
### 3-نتایج و بحث

در ابتدا درصد تخلخل کامپوزیت‌ها به روش ارشمیدس محاسبه شد. جدول 2 نتایج درصد تخلخل به دست آمده از نمونه‌های کامپوزیت شده را نشان می‌دهد. مشاهده شد که با کاهش اندازه گرانول‌ها تخلخل کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه چگالی آلومینیم در تمامی نمونه‌ها تقریباً ثابت است پس می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش اندازه گرانول‌ها، کسر حجمی گرانول در کامپوزیت زیاد می‌شود و از آنجایی که چگالی آلومینا از آلومینیم بیشتر است؛ می‌توان گفت با افزایش کسر حجمی گرانول، چگالی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و تخلخل کاهش می‌یابد.

باتوجه به نتایج جدول 2، در یک اندازه گرانول مشخص، با افزایش دمای سینترینگ تخلخل نمونه کاهش یافته است. همچنین در یک دمای سینترینگ ثابت با کم شدن اندازه گرانول مقدار تخلخل کامپوزیت کم شده است که علت آن افزایش کسر حجمی تقویت‌کننده گرانول در کامپوزیت

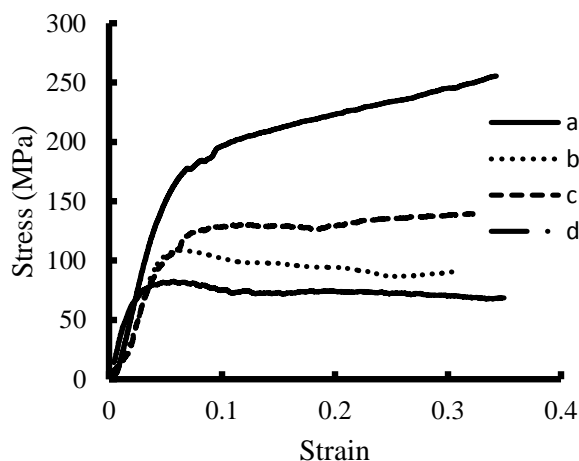
<sup>1</sup> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>2</sup> - INSTRON 4206



**Fig. 3** stress-strain curve of pressure test for composite with granules sintered in 1300 °C a) with 840  $\mu\text{m}$  granules b) with 500  $\mu\text{m}$  granules c) with 300  $\mu\text{m}$  granules d) with 150  $\mu\text{m}$  granules

شکل 3 نمودار تنش-کرنش آزمون فشار کامپوزیت‌های دارای گرانول سینتر شده در 1300 سانتیگراد (a) 840 میکرومتر (b) 500 میکرومتر (c) 300 میکرومتر (d) 150 میکرومتر



**Fig. 4** stress-strain curve of pressure test for composite with granules sintered in 1400 °C a) with 840  $\mu\text{m}$  granules b) with 500  $\mu\text{m}$  granules c) with 300  $\mu\text{m}$  granules d) with 150  $\mu\text{m}$  granules

شکل 4 نمودار تنش-کرنش آزمون فشار کامپوزیت‌های دارای گرانول سینتر شده در 1400 سانتیگراد (a) 840 میکرومتر (b) 500 میکرومتر (c) 300 میکرومتر (d) 150 میکرومتر

نتایج آزمون ضربه که در جدول ۳ آمده است این امر را نشان می‌دهد که با بزرگتر شدن اندازه گرانول در کامپوزیت‌ها به علت افزایش تخلخل، انرژی شکست کاهش می‌یابد. همچنین در یک اندازه مشخص با افزایش دمای سینترینگ به علت افزایش استحکام گرانول، استحکام ضربه‌ای کامپوزیت نیز افزایش می‌یابد. تصاویر میکروسکوپ روبشی از سطح کامپوزیت‌ها در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ آمده است. شکل ۵ نشان می‌دهد در نمونه‌های سینتر نشده به علت استحکام کم گرانول‌ها، در حین پولیش شکسته شده‌اند و در محل گرانول حفرات مشاهده می‌شود. همچنین فصل مشترک نمونه‌های سینتر نشده دارای اتصال ضعیفی می‌باشند و در درون گرانول حفرات دیده می‌شود که دلیل بر تخلخل و پایین بودن استحکام فشاری نمونه‌های سینتر نشده می‌باشد.

خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها استفاده شد؛ از کرنش شکست و استحکام نهایی نمونه‌ها قابل مقایسه با هم نمی‌باشد. به همین دلیل استحکام تسلیم برای مقایسه خواص مکانیکی گزینه مناسبی به نظر می‌رسد.

نتایج بدست آمده از منحنی‌ها نشان می‌دهد در یک اندازه گرانول ثابت، با افزایش دمای سینترینگ به دلیل این که استحکام گرانول افزایش می‌یابد؛ در نتیجه استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیتی نیز افزایش می‌یابد.

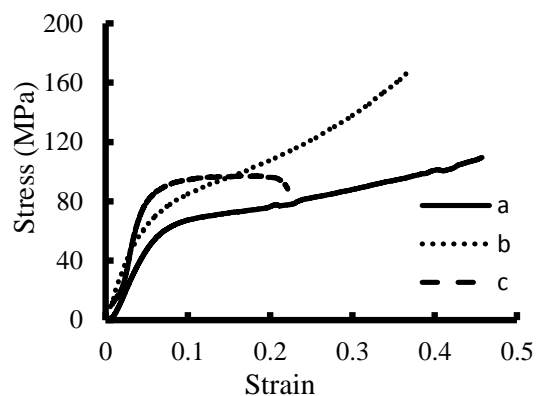
همچنین شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهند در یک دمای سینترینگ مشخص با کم شدن اندازه گرانول، استحکام افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش کسر حجمی گرانول موجود در کامپوزیت می‌باشد. بدین معنی که هر چه درصد ماده تقویت‌کننده در کامپوزیت بیشتر شود استحکام مکانیکی کامپوزیت بیشتر می‌شود.

جدول شماره ۳ استحکام تسلیم فشاری نمونه‌های کامپوزیتی را در مقایسه با هم نشان می‌دهد.

**جدول ۳** استحکام تسلیم فشاری و انرژی شکست ضربه نمونه‌های کامپوزیت

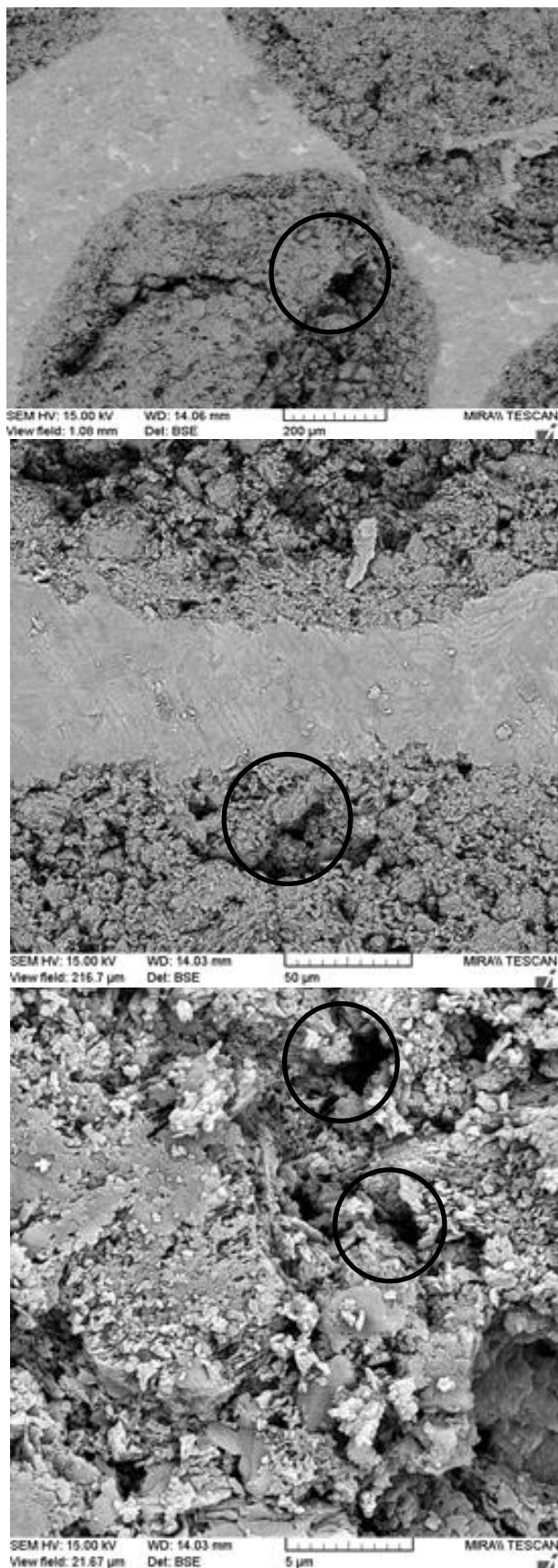
**Table 3** yield strength and impac fracture energy of sample composites

استحکام تسلیم (MPa)	انرژی شکست ضربه (ژول)	نمونه کامپوزیت با گرانول مشخص	
		اندازه گرانول	شرایط سینتر
50	0.25	840	بدون سینتر
60	0.3	500	بدون سینتر
70	0.34	300	بدون سینتر
-	0.38	150	بدون سینتر
62	0.28	840	2 hr – 1300 °C
75	0.32	500	2 hr – 1300 °C
85	0.36	300	2 hr – 1300 °C
95	0.4	150	2 hr – 1300 °C
75	0.48	840	2 hr – 1400 °C
95	0.54	500	2 hr – 1400 °C
100	0.56	300	2 hr – 1400 °C
160	0.6	150	2 hr – 1400 °C



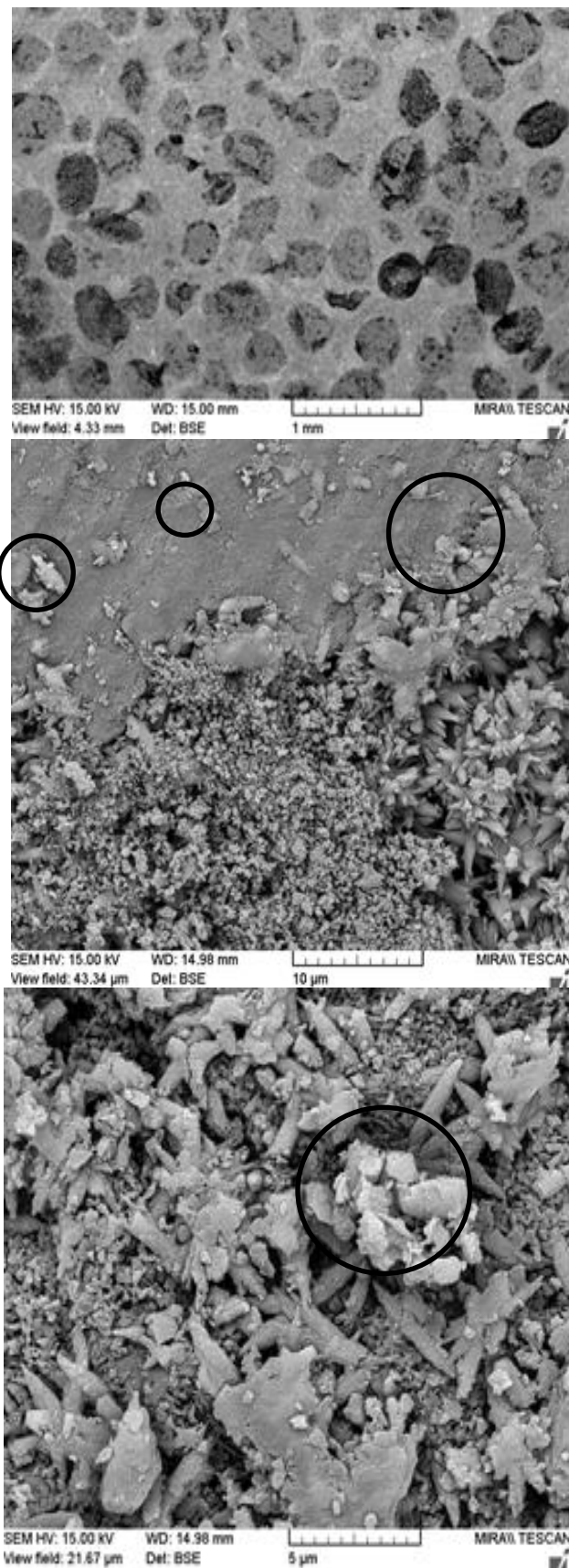
**Fig. 2** stress-strain curve of pressure test for composite with non-sintered granules a) with 840  $\mu\text{m}$  granules b) with 500  $\mu\text{m}$  granules c) with 300  $\mu\text{m}$  granules

شکل 2 نمودار تنش-کرنش آزمون فشار کامپوزیت‌های دارای گرانول سینتر نشده (a) 840 میکرومتر (b) 500 میکرومتر (c) 300 میکرومتر



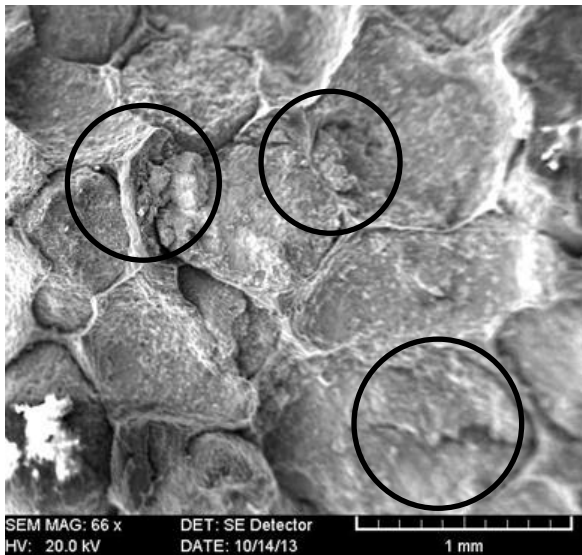
**Fig. 6** SEM image of composite with sintered granules in 1300°C (500 μm diameter)

شکل 6 تصویر میکروسکوپ الکترونی کامپوزیت آلومینیم-گرانول آلومینا با گرانول 500 میکرومتر و سینتر شده در 1300 سانتیگراد



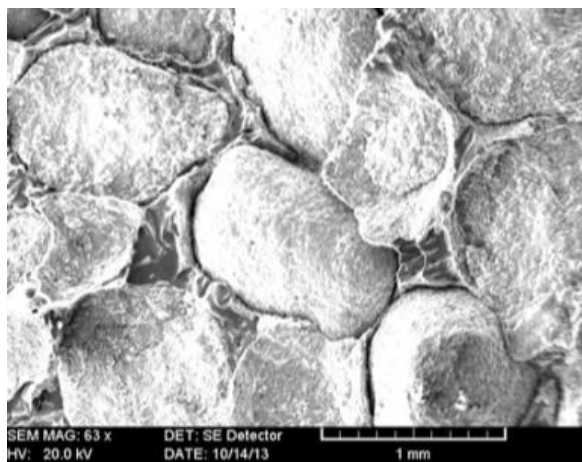
**Fig. 5** SEM image of composite with non-sintered granules (500 μm diameter)

شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت آلومینیم-گرانول آلومینا (سینتر نشده) با اندازه گرانول 500 میکرومتر



**Fig. 8** SEM image of cross section fracture of composite with sintered granules in 1300°C (500 μm diameter)

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح مقطع شکست برای کامپوزیت با گرانول آلومینا سینتر شده در دمای 1300 سانتیگراد و 500 میکرومتر



**Fig. 9** SEM image of cross section fracture of composite with sintered granules in 1400°C (840 μm diameter)

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح مقطع شکست برای کامپوزیت با گرانول آلومینا سینتر شده در دمای 1400 سانتیگراد و 840 میکرومتر

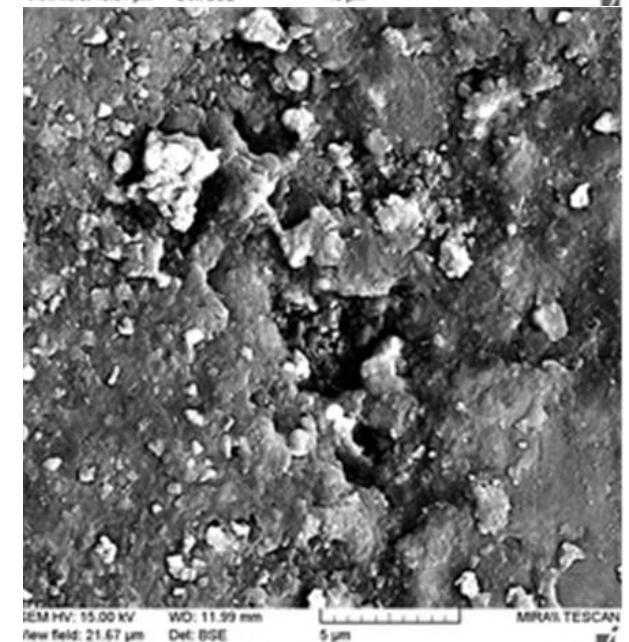
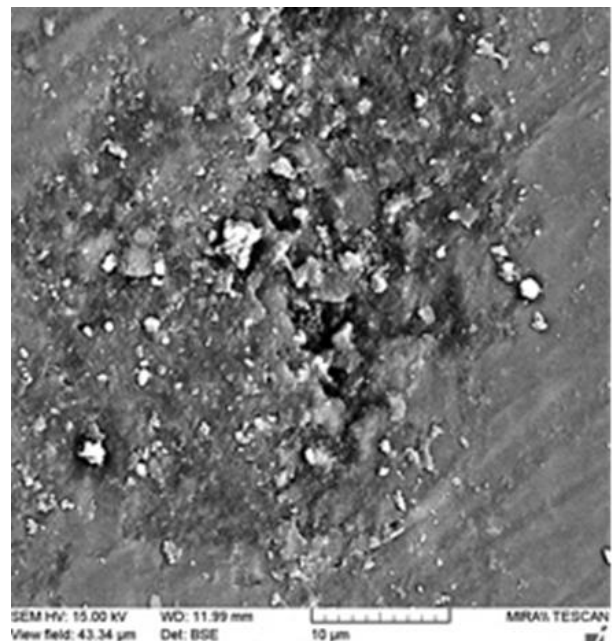
شکل 8 نشان می دهد تقریباً تمام گرانول ها دچار شکست شده اند که این دلیل بر پایین بودن استحکام گرانول و انجام سینترینگ ناقص می باشد. همچنین مشاهده می شود که شکست فاز زمینه به صورت نرم اتفاق افتاده است. شکل 9 نشان می دهد تعداد کمتری از گرانول ها از درون شکسته اند که نشان دهنده استحکام بالای این گرانول ها و سینترینگ کامل تر نسبت به دمای 1300 می باشد. شکست فاز زمینه هم مانند تصویر قبلی به صورت نرم اتفاق افتاده است.

#### 4-نتیجه گیری

با توجه به آزمون های انجام شده و بررسی های صورت گرفته در این تحقیق نتایج کلی به صورت زیر به دست آمد:

تصاویر گرفته شده از نمونه های سینتر شده در دمای 1300 سانتیگراد که در شکل 6 آمده است؛ نشان می دهد سینتر به طور کامل انجام نشده است و هنوز حفراتی در درون گرانول ها دیده می شود اما نسبت به نمونه های سینتر نشده میزان حفرات کمتر شده است. همچنین تصاویر فصل مشترک نشان از پیوند بهتری بین زمینه و فصل مشترک نسبت به نمونه های سینتر شده دارد.

در شکل 7 نیز مشاهده می شود که با افزایش دمای سینترینگ به 1400 سانتیگراد، مقدار تخلخل در گرانول ها کم شده است و از این رو، این. همچنین در نمونه های سینتر شده اتصال دایمی بین ذرات آلومینا ایجاد می شود که این موارد باعث افزایش استحکام فشاری این کامپوزیت ها شده است.



**Fig. 7** SEM image of composite with sintered granules in 1400°C (500 μm diameter)

شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی کامپوزیت آلومینیم-گرانول آلومینا با گرانول 500 میکرومتر و سینتر شده در 1400 سانتیگراد

- by Powder Metallurgy Technique and Evaluating Mechanical Properties," *Perspectives in Science*, Vol. 8, pp. 428-431, 2016.
- [16] Hodder, K. J. and Izadi, H. and McDonald, A. G. and Gerlich, A. P., "Fabrication Of Aluminum-Alumina Metal Matrix Composites Via Cold Gas Dynamic Spraying at Low Pressure Followed by Friction Stir Processing," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, pp. 114-121, 2012.
- [17] Wu, C. and Ma, K. and Wu, J. and Fang, P. and Luo, G. and Chen, F. and Shen, Q. and Zhang, L. and Schoenung, J. M. and Lavernia, E. J., "Influence of Particle Size and Spatial Distribution of B<sub>4</sub>C Reinforcement on The Microstructure and Mechanical Behavior of Precipitation Strengthened Al Alloy Matrix Composites," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 675, pp. 421-430, 2016.
- [18] Zare, H. and Jahedi, M. and Toroghinejad, M. R. and Meratian, M. and Knezevic, M., "Compressive, Shear, and Fracture Behavior of CNT Reinforced Al Matrix Composites Manufactured by Severe Plastic Deformation," *Materials and Design*, Vol. 106, pp. 112-119, 2016.
- [19] Rahimian, M. and Parvin, N. and Ehsani, N., "Investigation of Particle Size and Amount of Alumina on Microstructure and Mechanical Properties of Al Matrix Composite Made by Powder Metallurgy," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 1031-1038, 2010.
- [20] Alhajeri, S. N. and Al-Fadhalah, K. J. and Almazrouee, A. I. and Langdon, T. G., "Microstructure Andmicrohardness of an Al-6061 Metal Matrix Composite Processed by High-Pressure Torsion," *Materials Characterization*, Vol. 118, pp. 270-278, 2016.
- [21] Saleh, K. and Vialatte, L. and Guigon, P., "Wet Granulation in a Batch High Shear Mixer," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 3763-3775, 2005.
- [22] Lin, C. S. and Lin, S. T., "Effects of Granule Size and Distribution on the Cold Isostatic Pressed Alumina," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, pp. 657-661, 2008.
- [23] Shafiee Afarani, M. and Samimi, A. and Bahadori Yekta, E., "Synthesis of Alumina Granules by High Shear Mixer Granulator: Processing and Sintering," *Powder Technology*, Vol. 237, pp. 32-40, 2013.
- به طور کلی با افزایش دمای سینترینگ گرانولها، تخلخل نمونهها کاهش یافته و خواص مکانیکی ( استحکام فشاری و سختی ) کامپوزیت‌های حاوی گرانول آلومینا بهبود یافته است.
  - مقدار چگالی و استحکام فشاری کامپوزیت‌ها بعد از سینترینگ گرانول-ها افزایش می‌یابد.
  - با بزرگتر شدن اندازه گرانول آلومینا در کامپوزیت‌های تولید شده، چون میزان تخلخل درون و بین گرانول‌ها بیشتر می‌شود، در نتیجه استحکام فشاری و انرژی مورد نیاز برای شکسته شدن کامپوزیت در اثر ضربه کاهش می‌یابد.
  - تحلیل‌های ریز ساختاری از سطح مقطع شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که هم شکست بین دانه‌ای و هم شکست درون دانه‌ای رخ می‌دهد. با افزایش دمای سینترینگ تعداد شکست از درون دانه‌های گرانول کاهش یافته است که نشان‌دهنده افزایش استحکام گرانول‌ها می‌باشد.
- ### 5-مراجع
- [1] Roudini, G. and Asgharian, A. and Khosravi, M., "High Volume Fraction Aluminum /Alumina-Fused Silica Hybrid Particulate Metal Matrix Composite," *Advanced Materials Research*, Vol. 701, pp. 3-7, 2013.
- [2] Sharma, P. and Sharmab, S. and Khandujaa, D., "A Study on Microstructure of Aluminium Matrix Composites," *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 3, pp. 240-244, 2015.
- [3] Bodunrina, O. M. and Alanemea, K. K. and Chownb, L. H., "Aluminium Matrix Hybrid Composites: a Review of Reinforcement Philosophies; Mechanical, Corrosion and Tribological Characteristics," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 4, pp. 434-445, 2015.
- [4] Rosso, M., "Ceramic and Metal Matrix Composites: Routes and Properties," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, pp. 364-375, 2006.
- [5] Chawla, N. and Chawla, K. K., "Metal Matrix Composites," Springer, New York, 107, 2006.
- [6] Singh, J. and Chauhan, A., "Characterization of Hybrid Aluminum Matrix Composites for Advanced Applications- a Review," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 5, pp. 159-169, 2016.
- [7] Sharma, S., "The sliding Wear behavior of Al 6061-garnet Particulate composites," *Wear*, Vol. 249, pp. 1036-45, 2001.
- [8] Avettand-Fènoël, M. N. and Simar, A., "A Review About Friction Stir Welding of Metal Matrix Composites," *Materials Characterization*, Vol. 120, pp. 1-17, 2016.
- [9] Khoramkhorshid, S. and Alizadeh, M. and Taghvaei, A. H. and Scudino, S., "Microstructure and Mechanical Properties of Al-Based Metal Matrix Composites Reinforced With Al<sub>84</sub>Gd<sub>6</sub>Ni<sub>7</sub>Co<sub>3</sub> Glassy Particles Produced by Accumulative Roll Bonding," *Materials and Design*, Vol. 90, pp. 137-144, 2016.
- [10] Kaczmar, J. W. and Pietrzakb, K. and WoosinÅskic, W., "The Production and Application of Metal Matrix Composite Materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 106, pp. 58-67, 2000.
- [11] Pandi, G. and Muthusamy, S., "A Riew on Machining and Tribological Behaviors of Aluminium Hybrid Composites," *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 1399-1408, 2012.
- [12] Zabihi, M. and Toroghinejad, M. R. and Shafyei, A., "Shear Punch Test in Al/Alumina Composite Strips Produced by Powder Metallurgy and Accumulative Roll Bonding," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 667, pp. 383-390, 2016.
- [13] Kouzeli, M. and Dunand, D. C., "Effect of Reinforcement Connectivity on The Elasto-Plastic Behavior of Aluminum Composites Containing Sub-Micron Alumina Particles," *Acta Mater*, Vol. 51, pp. 6105-6121, 2003.
- [14] Dabade, U. A. and Jadhav, M. R., "Experimental Study of Surface Integrity of Al/SiC Particulate Metal-Matrix Composites in Hot Machining," *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 914-919, 2016.
- [15] Bodukuri, A. K. and Eswaraiiah, K. and Katla Rajendar, K. and Sampath, V., "Fabrication of Al-Sic-B<sub>4</sub>C Metal Matrix Composite







## تحلیل تجربی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت هیبریدی بر پایه رزین اپوکسی / نانو صفحات گرافن / لاستیک نیتریل کربوکسیل شده

فرامرز آشنای قاسمی<sup>1</sup>، محمد حسین صابریان<sup>2</sup>، اسماعیل قاسمی<sup>3\*</sup>، سجاد دانش پایه<sup>4</sup>

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

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- استاده، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

4- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14975-112، i.ghasemi@ippi.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/6/19

پذیرش: 96/10/23

### کلیدواژگان:

خواص مکانیکی

رزین اپوکسی

نانو صفحات گرافن

لاستیک نیتریل کربوکسیل شده

در این تحقیق، خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های بر پایه رزین اپوکسی تقویت شده با نانو صفحات گرافن و لاستیک نیتریل کربوکسیل شده (XNBR) بررسی شده است. نانو صفحات گرافن در سه سطح 0، 0.75 و 1.5 درصد وزنی و لاستیک XNBR در سه سطح 0، 5 و 10 درصد وزنی به زمینه رزین اپوکسی اضافه شدند. نمونه‌ها به روش دستی ساخته و قالب‌گیری شدند و آزمون‌های مکانیکی در دمای محیط جهت تعیین استحکام کششی، مدول کششی، ازدیاد طول تا پارگی و استحکام ضربه انجام شدند. همچنین از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) جهت مشاهده نحوه پراکندگی نانو صفحات گرافن در زمینه رزین اپوکسی استفاده شد. مشاهده شد که نانو صفحات گرافن در 0.75 درصد وزنی پراکندگی مناسب داشته و در درصدهای بالاتر دچار کلوخگی شده است. حضور نانو صفحات گرافن باعث کاهش استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی ترکیبات می‌شود. این درحالی است که حضور نانو صفحات گرافن مدول کششی و استحکام ضربه را به ترتیب 20 و 23 درصد افزایش داده است. از طرف دیگر، افزودن لاستیک XNBR استحکام و مدول کششی را 18~ درصد دچار کاهش و استحکام ضربه و ازدیاد طول تا پارگی را به ترتیب به طور چشمگیری تا 130 و 46 درصد افزایش داده است. همچنین، حضور همزمان نانو صفحات گرافن و لاستیک XNBR در زمینه رزین اپوکسی، کاهش 10 درصدی استحکام کششی را به دنبال داشته است. این در حالی است که مدول کششی، ازدیاد طول تا پارگی و استحکام ضربه به ترتیب نسبت به اپوکسی خالص 6، 29 و 143 درصد افزایش پیدا کرده‌اند.

## Experimental investigation on mechanical properties of hybrid nano-composite based on epoxy/ graphene nano-platelets/ carboxylated acrylonitrile butadiene rubber

Faramarz Ashenai Ghasemi<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Saberian<sup>1</sup>, Ismail Ghasemi<sup>2\*</sup>, Sajjad Daneshpayeh<sup>1</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Department of Materials Science and Engineering, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14975-112, Tehran, Iran, i.ghasemi@ippi.ac.ir

### Keywords

Mechanical properties

Epoxy

Graphene

XNBR

### Abstract

In this study, mechanical properties of nano-composites based on epoxy reinforced with graphene nano-platelets and XNBR is investigated. Fillers were added to the epoxy matrix in 0, 0.75 and 1.5 wt. % levels for graphene nano-platelets and 0, 5 and 10 wt. % levels for XNBR. Samples were prepared by hand method and mechanical tests were performed in room temperature to determine tensile strength, tensile modulus, elongation at break and impact strength. FESEM images were used to determine the state of graphene nano-platelets dispersion. It was observed that graphene nano-platelets had well dispersion in 0.75 wt.% but in high loading of them, aggregation was observed. Graphene nano-platelets decreased tensile strength and elongation. On the other hand, enhanced tensile modulus and impact strength by 20% and 23%, respectively. Adding XNBR declined tensile strength and modulus by ~18% and increased impact strength and elongation by considerable amount of 130% and 46%, respectively. Simultaneous presence of graphene nano-platelets and XNBR in epoxy matrix decreased tensile strength by ~10%. On the other hand, tensile modulus, elongation and impact strength increased by 6%, 29% and 143% compared to neat epoxy.

### 1-مقدمه

محققان اثر افزودن نانو ذرات مختلفی از جمله نانو ذرات سیلیکا [1]، نانو ذرات تیتانیوم [2-3]، نانو لوله‌های کربنی [4-5]، نانو ذرات رس [6] را بر روی خواص مکانیکی ماتریس‌های پلیمری بررسی کرده‌اند.

در دهه‌های اخیر، نانو تکنولوژی باعث پیشرفت چشمگیر خواص کامپوزیت‌ها شده است. حضور فاز ثانویه با ابعاد نانو متری در زمینه‌های پلیمری می‌تواند خواص مکانیکی را به مراتب بیشتر از تقویت‌کننده‌های معمولی افزایش دهد.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Ashenai-Ghasemi, F. Saberian, M. H. Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Experimental investigation on mechanical properties of hybrid nano-composite based on epoxy/graphene nano-platelets/ carboxylated acrylonitrile butadiene rubber", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 395-402, 2018.

بررسی کرده اند. توماس و همکاران [17] لاستیک HTPB<sup>1</sup> را در غلظت‌های 0، 5، 10، 15 و 20 (phr) با ماتریس رزین اپوکسی ترکیب کردند و نتایج را با مرجع [18] که ماتریس رزین اپوکسی با لاستیک CTBN<sup>2</sup> ترکیب شده بود مقایسه کردند.

به طور کلی وقتی یک لاستیک به رزین گرماسخت اضافه می‌گردد ویژگی‌های لاستیکی آن (مدول کششی پایین) باعث کاهش مدول کششی ترکیب می‌شود. افزودن HTPB به رزین اپوکسی نسبت به CTBN کاهش کمتری در مدول کششی ایجاد می‌کند. کاهش در استحکام کششی نیز مرتبط با کمتر بودن سفتی کامپوزیت رزین اپوکسی/HTPB است.

از طرف دیگر، حضور الاستور HTPB در رزین اپوکسی در همه نسبت‌ها به دلیل افزایش چقرمگی باعث افزایش استحکام ضربه می‌شود. در غلظت 10phr بیشترین افزایش، 47 درصد، مشاهده شده است و در غلظت‌های بالاتر با بیشتر شدن غلظت HTPB اندازه ذرات جمع شده لاستیک بیشتر شده و باعث کاهش استحکام ضربه نسبت به غلظت 10phr می‌شود.

متیو و همکاران [19] رزین اپوکسی را با لاستیک HLNR<sup>3</sup> با درصد‌های وزنی 5، 10، 15 و 20 اصلاح کردند. آنها افزایش چقرمگی و ازدیاد طول تا پارگی را با افزودن HLNR تا 15 درصد وزنی را مشاهده کردند.

در 20 درصد وزنی HLNR، چقرمگی نسبت به حالت 15 درصد وزنی لاستیک کاهش یافت. علاوه بر آن، کاهش پیوسته مدول کششی و استحکام کششی با افزایش غلظت لاستیک در ماتریس رزین اپوکسی گزارش شده است. رفتاری مشابه از سامانه رزین اپوکسی اصلاح شده با لاستیک در مرجع‌های [20-21] گزارش شده است.

به منظور دستیابی به خواص مکانیکی بهتر، ترکیب همزمان نانو پرکننده‌ها و لاستیک توسط پژوهشگران مختلفی انجام شده است. به طور کلی، از آنجایی که افزودن لاستیک به زمینه رزین اپوکسی باعث کاهش استحکام و مدول کششی می‌شود، اضافه کردن یک نانو ذره می‌تواند این اثر نامطلوب را تا حدودی جبران کند.

ونگ و همکاران [10] نشان دادند که افزودن 0.5 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی چند جداره به سامانه رزین اپوکسی تقویت شده با CTBN، افزایش ازدیاد طول تا پارگی و همچنین مدول کششی را در پی داشته است. افزایش استحکام و مدول کششی نانو کامپوزیت‌های سه‌تایی رزین اپوکسی/گرافن/CTBN نسبت به کامپوزیت‌های دوتایی رزین اپوکسی/CTBN نیز توسط درزال و همکاران [22] گزارش شده است.

در تحقیق حاضر، برای موازنه بین چقرمگی و افزایش مدول، اثر افزودن نانو صفحات گرافن و لاستیک نیتریل کربوکسیل شده (XNBR)<sup>4</sup> بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شده است.

دردهای وزنی مختلف نانو ذرات (0، 0.75 و 1.5) و XNBR (0، 5 و 10) در ماتریس رزین اپوکسی استفاده شده است. به منظور تعیین خواص مکانیکی ترکیبات (استحکام و مدول کششی، ازدیاد طول تا پارگی و استحکام ضربه) از آزمون کشش تک محوری، آزمون ضربه استفاده شده است. همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) جهت مشاهده پراکندگی نانوذرات به کار گرفته شده است.

بین نانو ذرات مختلف، گرافن به دلیل خواص مکانیکی عالی از جمله مساحت سطح بالا، هدایت حرارتی عالی، مدول کششی بسیار بالا و غیره [7] بسیار مورد توجه قرار گرفته است و کاربردهای زیادی در صنایع خودرو، هوافضا، الکترونیک و باتری پیدا کرده است [8-9]. گرافن به طور گسترده برای تقویت کردن انواع مختلف ماتریس‌های پلیمری استفاده می‌شود.

در میان انواع مختلف ماتریس‌های پلیمری، رزین اپوکسی با قابلیت‌های بالایی از جمله سفتی بالا، خواص چسبندگی، پایداری ابعادی خوب و مقاومت شیمیایی بالا کاربرد فراوانی در صنعت دارد [10].

اثر افزودن گرافن بر ماتریس رزین اپوکسی در مقالات بسیاری بررسی شده است. به طور مثال رفیعی و همکاران [11] اثر افزودن سه نوع نانو پرکننده مختلف، گرافن و نانو لوله‌های کربنی تک جداره و چند جداره، به رزین اپوکسی در مقادیر ثابت 0.1 درصد وزنی برای هر نمونه را بررسی و مقایسه کردند. آنها برای نانو کامپوزیت‌های گرافن افزایش 31 درصد در مدول کششی و 40 درصد در استحکام کششی نسبت به رزین اپوکسی خالص را گزارش کردند که با توجه به درصد بسیار کم نانوذرات خواص به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده بود.

از طرف دیگر، نانو کامپوزیت‌های نانو لوله‌های کربنی در مدول و استحکام کششی به ترتیب افزایشی به میزان 3 و 14 درصد نسبت به رزین اپوکسی خالص داشتند که در مقایسه با گرافن به مراتب کمتر بوده است.

اثر ترکیب نانو صفحات گرافن با رزین اپوکسی توسط زمان و همکاران [12] نیز بررسی شده است و نتایج حاصل از آزمون کشش حاکی از آن بود که افزودن گرافن به طور پیوسته باعث کاهش استحکام کششی ترکیب شده است. از طرف دیگر افزایش درصد وزنی گرافن تا 2.5 درصد وزنی ابتدا باعث افزایش مدول کششی و سپس کاهش آن شده است.

رفتار مشابه برای کاهش استحکام کششی و افزایش مدول کششی در اثر افزودن گرافن به رزین اپوکسی در مرجع دیگری نیز گزارش شده است [13]. در نانو کامپوزیت 6 درصد وزنی گرافن، مدول کششی حدود 23 درصد افزایش و استحکام نهایی کششی حدود 54 درصد کاهش نسبت به رزین اپوکسی خالص داشته‌اند.

ونگ و همکاران [14] اثر دو نوع گرافن، GnP-5 و GnP-C750، با نسبت‌های منظر متفاوت روی خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی کردند. همانطور که مشخص است گرافن به دلیل مدول بالاتر باعث افزایش مدول سامانه رزین اپوکسی می‌شود.

آنها نشان دادند که GnP-5 به دلیل نسبت منظر بالاتر و همچنین پراکندگی بهتر در ماتریس رزین اپوکسی مدول کششی را بیشتر از GnP-C750 افزایش می‌دهد. اما به دلیل پیوند ضعیف بین رزین اپوکسی و GnP-5 استحکام کششی ترکیب رزین اپوکسی/GnP-5 نسبت به رزین اپوکسی خالص کاهش پیدا کرده است. این در حالی است که استحکام کششی ترکیب رزین اپوکسی/GnP-C750 تقریباً ثابت مانده است.

در کنار خواص مطلوب رزین اپوکسی، ساختار شکننده این ماده در بسیاری از کاربردها یک عیب محسوب می‌شود. بنابراین چقرمه کردن این ماده یک نکته حائز اهمیت است.

بین روش‌های مختلف چقرمه کردن، ترکیب رزین اپوکسی با یک لاستیک مناسب، به عنوان فاز دوم، یک روش معمول و بسیار موثر است [16-15]. برخی محققان اثر افزودن فاز لاستیکی به ماتریس رزین اپوکسی را

<sup>1</sup> Hydroxyl-terminated polybutadiene

<sup>2</sup> Parts per hundred

<sup>3</sup> Carboxyl terminated butadiene acrylonitrile

<sup>4</sup> Hydroxylated liquid natural rubber

<sup>5</sup> Carboxylated acrylonitrile butadiene rubber

**2- مواد و روش‌ها****1-2- مواد**

در این تحقیق از سامانه رزین اپوکسی تهیه شده از شرکت مواد شیمیایی ویژه سیبا (محصول کشور سوئیس)، شامل رزین اپوکسی با نام تجاری LY556 (رزین بر پایه بیسفنول نوع A) به عنوان پایه و سخت‌کننده با نام تجاری HY917 و شتاب‌دهنده با نام تجاری DY-070 به عنوان عامل پخت استفاده شده است. نانو صفحات گرافن از نوع XGnP-C750 تهیه شده از شرکت ایکس جی ساینس آمریکا با قطر متوسط  $0.3 \mu\text{m}$  تا  $2 \mu\text{m}$ ، ضخامت متوسط  $20 \text{ nm}$  و مساحت سطح متوسط  $750 \text{ m}^2/\text{g}$  مورد استفاده قرار گرفت. لاستیک مورد استفاده در این تحقیق، XNBR با 26 درصد اکریلونیتریل با نام تجاری Nipol® NX 775 محصول شرکت شیمیایی زئون (محصول کشور ژاپن) می‌باشد.

**2-2- نمونه سازی**

برای ساخت آمیزه‌های دوتایی رزین اپوکسی / XNBR، ابتدا XNBR با نسبت  $90 \text{ mg/ml}$  در حلال استون حل شد و پس از ترکیب شدن با رزین اپوکسی، به منظور خارج کردن استون از ترکیب، در دمای  $60^\circ\text{C}$  تحت خلاء قرار گرفت. سپس مقادیر مشخصی از سخت‌کننده (90 phr) و شتاب‌دهنده (2 phr) به ترکیب اضافه و توسط همزن مکانیکی به مدت 5 min هم زده شدند و جهت حباب‌زدایی و اطمینان از ناپدید شدن هر گونه اثری از استون، به مدت 30 min تحت خلاء قرار گرفتند.

برای ساخت نمونه‌های شامل نانو صفحات گرافن، ابتدا مقدار مشخصی از نانو صفحات گرافن در استون (با نسبت  $15 \text{ mg/ml}$ ) توسط دستگاه فراصوت به مدت 30 min پراکنده شدند و سپس به رزین اپوکسی افزوده و آنگاه به مدت 10 min با همزن مکانیکی هم زده شدند. جهت خارج کردن استون، ترکیب در دمای  $60^\circ\text{C}$  به مدت 4 ساعت تحت خلاء قرار گرفت. سپس مقادیر وزن شده‌ای از سخت‌کننده (90 phr) و شتاب‌دهنده (2 phr) به ترکیب اضافه شدند و جهت حباب‌زدایی و اطمینان از خروج کامل استون به مدت 30 min تحت خلاء قرار گرفتند.

برای ساخت نانو کامپوزیت‌های سه‌تایی ابتدا XNBR حل شده در استون و نانو صفحات گرافن پراکنده شده در استون به رزین اپوکسی اضافه شدند. پس از خروج استون از ترکیب، سخت‌کننده و شتاب‌دهنده به ترتیب با نسبت‌های 90 phr و 2 phr به ترکیب اضافه و توسط همزن مکانیکی به مدت 10 min هم زده شدند. ترکیب حاصل جهت حباب‌زدایی به مدت 30 min تحت خلاء قرار گرفت.

همه ترکیب‌ها پس از آماده‌سازی به صورت دستی در قالب‌های سیلیکونی قالب‌گیری شدند و به مدت 4 ساعت جهت پخت در دمای  $80^\circ\text{C}$  و سپس جهت پسا پخت شدن به مدت 8 ساعت در دمای  $140^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. به طور کلی 9 نمونه برای ترکیبات ساخته شده در نظر گرفته شده بود که در جدول 1 ارائه شده است و از هر ترکیب دست‌کم تعداد 3 نمونه جهت آزمون کشش و ضربه تهیه شد.

**2-3- آزمون‌ها**

آزمون کشش مطابق با استاندارد ISO 527-1 توسط دستگاه زونیک رول<sup>1</sup> مدل Z100 در دمای محیط انجام شد. سرعت فک‌ها  $5 \text{ mm/min}$  در نظر

گرفته شد و آزمون تا گسیختگی کامل نمونه‌ها ادامه یافت. نتایج نهایی حاصل از آزمون کشش برای هر ترکیب از میانگین 3 عدد ناشی از 3 تکرار بدست آمده است. آزمون ضربه در دمای محیط و مطابق با استاندارد ISO 179 توسط دستگاه آزمون ضربه شارپی ساخت دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی انجام شد. نتایج نهایی حاصل از آزمون ضربه برای هر ترکیب از میانگین 3 عدد ناشی از 3 تکرار بدست آمده است. جهت مشاهده نحوه پراکندگی نانو صفحات گرافن در ماتریس رزین اپوکسی، سطح شکست نمونه‌ها ابتدا به کمک طلا به ضخامت حدود  $10 \mu\text{m}$  روکش‌دهی شدند و تصاویر به کمک دستگاه FESEM با نام MIRA3 TESCAN تهیه شد.

**3- نتایج و بحث****1-3- استحکام کششی**

بعد از انجام آزمون کشش، نمودار تنش-کرنش یکی از ترکیبات به عنوان نمونه در شکل 1 نشان داده شده است.

شکل 2 تأثیر حضور نانو صفحات گرافن بر استحکام کششی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزودن نانو صفحات گرافن در تمام درصد‌های وزنی باعث کاهش استحکام کششی رزین اپوکسی شده است. کاهش استحکام کششی می‌تواند به دلیل فصل مشترک ضعیف بین زمینه رزین اپوکسی و نانو صفحات گرافن باشد که باعث می‌شود انتقال بار به درستی انجام نپذیرد و کاهش استحکام کششی را به دنبال داشته باشد [23]. علاوه بر این، همان‌طور که از تصویر FESEM در شکل 3 مشخص است، نانو صفحات گرافن در 1.5 درصد وزنی دچار کلوخگی شده که باعث عدم توزیع مناسب تنش و ایجاد تمرکز تنش شده و استحکام کششی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [24].

بیشترین کاهش استحکام کششی مربوط به نمونه حاوی 1.5 درصد وزنی نانو صفحات گرافن است که نسبت به سامانه اپوکسی خالص 14~ درصد کاهش یافته است. کاهش استحکام کششی در اثر افزودن نانو صفحات گرافن توسط محققان دیگری نیز گزارش شده است [12, 25].

**جدول 1** فرمولاسیون ترکیبات تهیه شده**Table 1** Sample formulations of materials

شماره ترکیب	گرافن (درصد وزنی)	XNBR (درصد وزنی)	سامانه رزین اپوکسی (درصد وزنی)
1	0	0	100
2	0.75	0	99.25
3	1.5	0	98.5
4	0	5	95
5	0	10	90
6	0.75	5	94.25
7	1.5	5	93.5
8	0.75	10	89.25
9	1.5	10	88.5

اثر افزودن XNBR به زمینه رزین اپوکسی در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزودن XNBR در تمام درصد‌های وزنی استحکام کششی سامانه رزین اپوکسی را کاهش داده است. به طور کلی، ذرات لاستیک به دلیل داشتن مدول پایین به عنوان تمرکز تنش عمل کرده و باعث کاهش استحکام کششی می‌شوند [26-27]. اضافه کردن 10 درصد وزنی XNBR بیشترین اثر منفی روی استحکام کششی داشته و باعث کاهش 17~ درصدی نسبت به رزین اپوکسی خالص شده است.

<sup>1</sup> Zwick/Roell

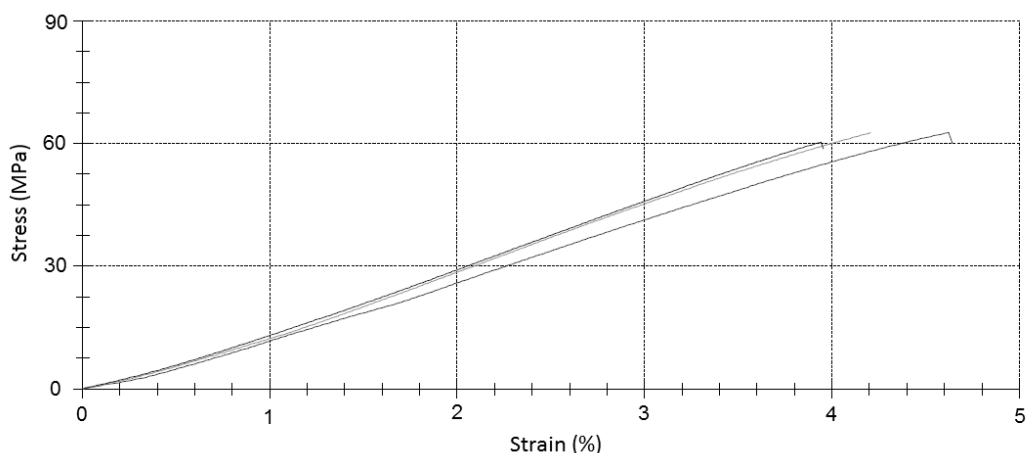


Fig. 1 The stress-strain diagram of sample including 0.75 wt.% graphene

شکل 1 نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی شامل 0.75 درصد وزنی گرافن

شکل 5 اثر حضور همزمان نانو صفحات گرافن و لاستیک XNBR بر استحکام کششی رزین اپوکسی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به اثر منفی نانو صفحات گرافن و لاستیک XNBR، تمام ترکیبات استحکام کششی کمتری نسبت به رزین اپوکسی خالص دارند. با افزودن 0.75 درصد وزنی نانو صفحات گرافن، استحکام کششی کامپوزیت‌های رزین اپوکسی/ XNBR به میزان اندکی نسبت به کامپوزیت‌های شامل 5 و 10 درصد وزنی XNBR افزایش پیدا کرده و در 1.5 درصد وزنی باعث کاهش استحکام کششی ترکیبات شده است که علت می‌تواند پراکندگی نامناسب این نانو صفحات و ایجاد کلوخگی در زمینه رزین اپوکسی باشد.

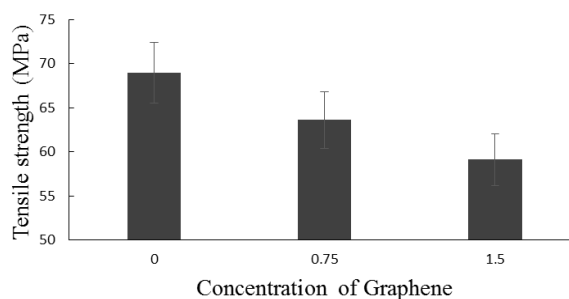


Fig. 2 The effect of graphene on tensile strength of epoxy/ graphene samples

شکل 2 تأثیر حضور نانو صفحات گرافن بر استحکام کششی نمونه‌های اپوکسی/ گرافن

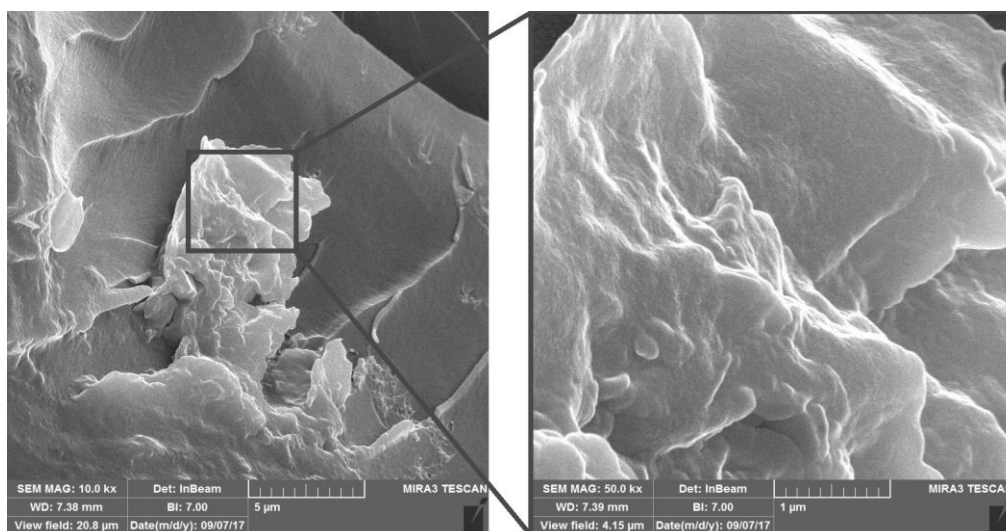


Fig. 3 The image of sample including 1.5 wt.% graphene

شکل 3 تصویر نمونه‌ی شامل 1.5 درصد وزنی گرافن

لاستیکی با ماتریس پلیمری یک عامل مهم و تأثیرگذار بر کاهش مدول کششی است. کاهش 19 درصدی مدول کششی نمونه حاوی 10 درصد وزنی XNBR نشان دهنده سازگاری خوب و چسبندگی مناسب لاستیک XNBR به زمینه رزین اپوکسی است که این سازگاری از برهم کنش گروههای قطبی موجود در دو فاز حاصل می شود.

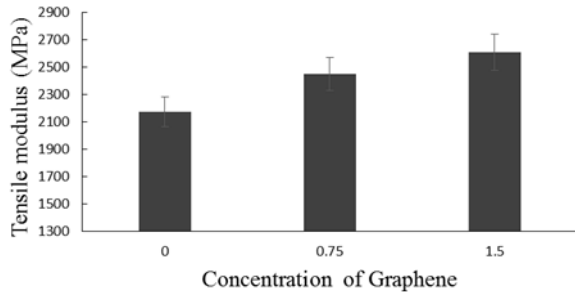


Fig. 6 The effect of graphene on tensile modulus of epoxy/ graphene samples

شکل 6 تأثیر حضور نانو صفحات گرافن بر مدول کششی نمونه های اپوکسی/ گرافن

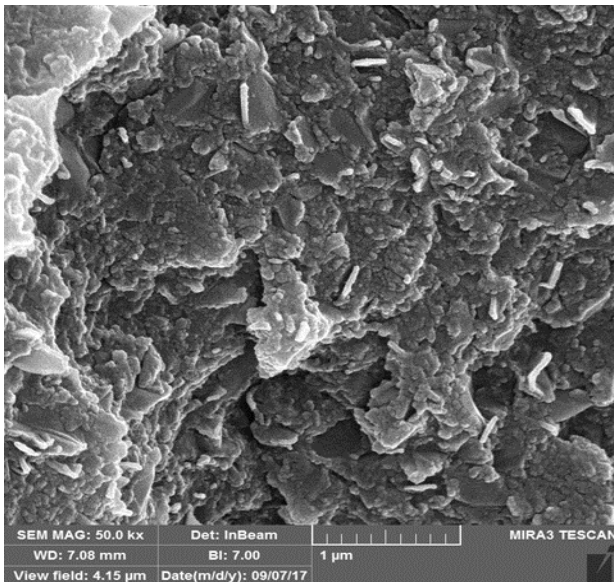


Fig. 7 The image of sample including 0.75 wt.% graphene

شکل 7 تصویر نمونه ی شامل 0.75 درصد وزنی گرافن

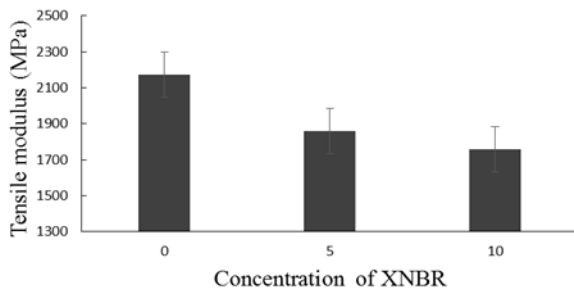


Fig. 8 The effect of XNBR on tensile modulus of epoxy/ XNBR samples

شکل 8 تأثیر حضور XNBR بر مدول کششی نمونه های اپوکسی/ XNBR

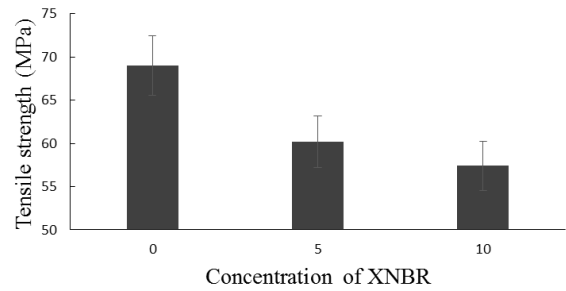


Fig. 4 The effect of XNBR on tensile strength of epoxy/ XNBR samples

شکل 4 تأثیر حضور XNBR بر استحکام کششی نمونه های اپوکسی/ XNBR

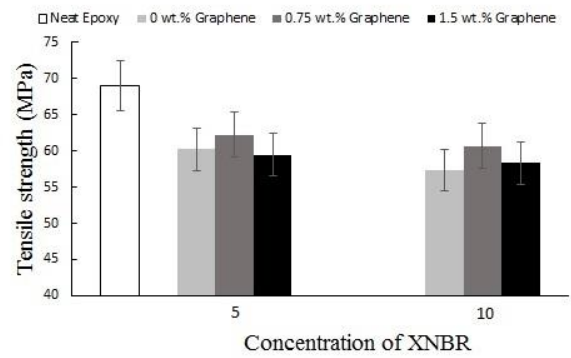


Fig. 5 The simultaneous effect of graphene and XNBR on tensile strength of epoxy/ graphene/ XNBR samples

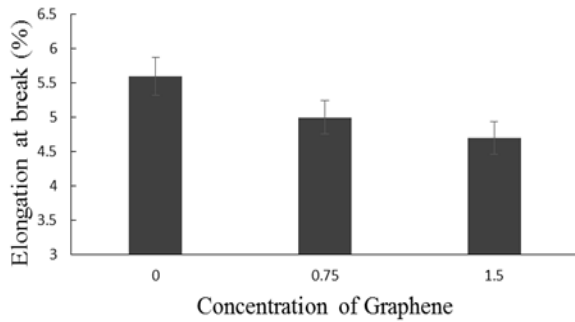
شکل 5 تأثیر حضور همزمان نانو صفحات گرافن و XNBR بر استحکام کششی نمونه های اپوکسی/ گرافن/ XNBR

### 2-3- مدول کششی

تغییرات مدول کششی نانو کامپوزیت های رزین اپوکسی/ گرافن در شکل 6 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، نانو صفحات گرافن مدول کششی سامانه رزین اپوکسی را افزایش داده است. مدول کششی بالا، نحوه ی پراکندگی و نسبت منظر بالا سه عامل مهم در افزایش مدول کششی هستند [14]. همان طور که از تصویر FESEM در شکل 7 قابل مشاهده است، نانو صفحات گرافن در 0.75 درصد وزنی پراکندگی مناسبی در زمینه داشته و با توجه به مدول کششی و نسبت منظر بالا باعث افزایش مدول کششی سامانه رزین اپوکسی شده اند. مدول کششی نانو کامپوزیت های دارای 0.75 و 1.5 درصد وزنی نانو صفحات گرافن به ترتیب 13~ و 20 درصد نسبت به رزین اپوکسی خالص افزایش یافته است. این نکته قابل توجه است که با وجود کلوخه ها در 1.5 درصد وزنی گرافن، افزایش چمگشیر مدول کششی نانو کامپوزیت های رزین اپوکسی/ گرافن مشاهده شده است.

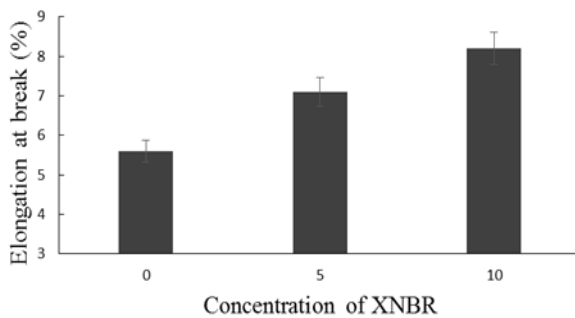
اثر افزودن لاستیک XNBR به رزین اپوکسی در شکل 8 نشان داده شده است. همان طور که انتظار می رفت، سامانه رزین اپوکسی/ XNBR مدول کششی کمتری نسبت به رزین اپوکسی خالص دارد که علت می تواند مدول بسیار پایین لاستیک XNBR باشد. کاهش مدول کششی در اثر افزودن فاز لاستیک توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [28-29]. سازگاری فاز

همان طور که در شکل 13 مشخص است، افزودن نانو صفحات گرافن تا 0.75 درصد وزنی افزایش 23 درصدی استحکام ضربه را به دنبال داشته است. نانو صفحات گرافن از راه‌های مختلفی چون ایجاد حفره، پل زدن و انحراف مسیر ترک می‌توانند باعث افزایش انرژی اتلافی ترک شوند و استحکام ضربه را افزایش دهند [32].



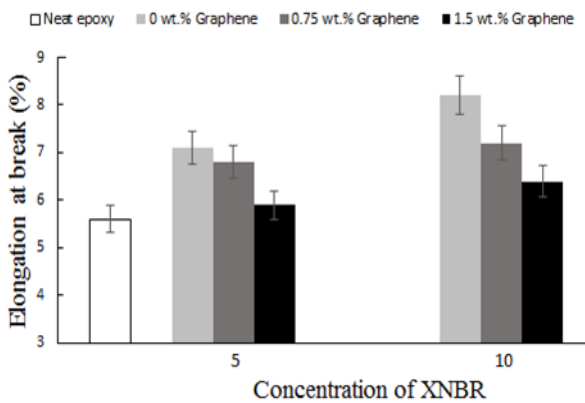
**Fig. 10** The effect of graphene on elongation at break of epoxy/graphene samples

شکل 10 تأثیر حضور نانو صفحات گرافن بر ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌های اپوکسی/گرافن



**Fig. 11** The effect of XNBR on elongation at break of epoxy/XNBR samples

شکل 11 تأثیر حضور XNBR بر ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌های اپوکسی/XNBR



**Fig. 12** The simultaneous effect of graphene and XNBR on elongation at break of epoxy/graphene/XNBR samples

شکل 12 تأثیر حضور همزمان نانو صفحات گرافن و XNBR بر ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌های اپوکسی/گرافن/XNBR

شکل 9 تأثیر حضور همزمان نانو صفحات گرافن و لاستیک XNBR بر مدول کششی رزین اپوکسی را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، افزودن 0.75 درصد وزنی نانو صفحات گرافن باعث جبران کاهش مدول کششی در اثر افزودن لاستیک XNBR می‌شود. با افزایش درصد وزنی نانو صفحات گرافن به 1.5 درصد وزنی، مدول کششی کامپوزیت‌های شامل 5 و 10 درصد وزنی XNBR ~25 درصد افزایش پیدا می‌کنند.

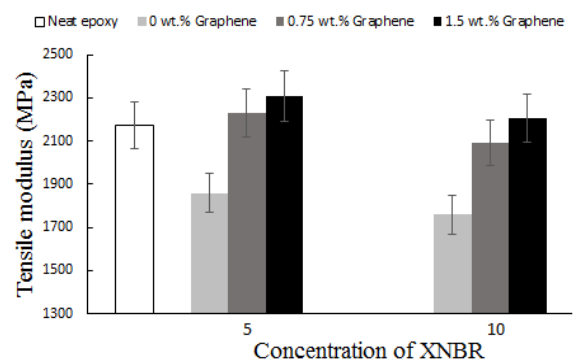
### 3-3- ازدیاد طول تا پارگی

شکل 10 نمایشگر تأثیر حضور نانو صفحات گرافن بر ازدیاد طول تا پارگی رزین اپوکسی است. ازدیاد طول تا پارگی به طور پیوسته با افزودن نانو صفحات گرافن تا 16 درصد کاهش پیدا کرده است. واضح است که وجود نانو ذرات گرافن به دلیل سفتی زیاد، از ازدیاد طول تا پارگی ترکیبات رزین اپوکسی/XNBR می‌کاهد [24]. کاهش ازدیاد طول تا پارگی نانو کامپوزیت‌های رزین اپوکسی/گرافن در مرجع [30] نیز گزارش شده است. اثر افزودن لاستیک XNBR بر ازدیاد طول تا پارگی در شکل 11 قابل مشاهده است. به طور کلی، فاز لاستیکی به علت نرم‌تر بودن و دارا بودن فاز ارتجاعی بیشتر باعث افزایش ازدیاد طول تا پارگی می‌شود [15,31]. افزودن 10 درصد وزنی XNBR افزایش چشمگیر ~46 درصدی ازدیاد طول تا پارگی را در پی داشته است.

همان طور که پیش‌تر بیان شد، افزودن فاز لاستیکی XNBR باعث افزایش زیاد طول تا پارگی زمینه اپوکسی شده و حضور نانو صفحات گرافن در کامپوزیت‌های رزین اپوکسی/XNBR باعث کاهش آن می‌شود. این روند افزایش و کاهش در شکل 12 قابل مشاهده است. حضور 1.5 درصد وزنی نانو صفحات گرافن در کامپوزیت شامل 10 درصد وزنی XNBR، باعث کاهش 22 درصدی ازدیاد طول تا پارگی شده است. لازم به ذکر است که این ترکیب نسبت به اپوکسی خالص 14 درصد افزایش ازدیاد طول تا پارگی داشته است که مساله بسیار حائز اهمیتی است.

### 3-4- استحکام ضربه

رزین اپوکسی به دلیل داشتن ساختاری شکننده استحکام ضربه کمی دارد. افزودن فاز لاستیکی و حضور برخی نانو ذرات در زمینه رزین اپوکسی می‌تواند استحکام ضربه و چقرمگی را بهبود بخشد [19]. شکل 13 تأثیر حضور نانو صفحات گرافن بر استحکام ضربه رزین اپوکسی را نشان می‌دهد.



**Fig. 9** The simultaneous effect of graphene and XNBR on tensile modulus of epoxy/graphene/XNBR samples

شکل 9 تأثیر حضور همزمان نانو صفحات گرافن و XNBR بر مدول کششی نمونه‌های اپوکسی/گرافن/XNBR

استحکام کششی را داشته است که نسبت به رزین اپوکسی خالص 10~ درصد کاهش یافته است.

- در بین نانو کامپوزیت‌های سه‌تایی، ترکیب شامل ۱.۵ درصد وزنی نانو صفحات گرافن و ۵ درصد وزنی لاستیک XNBR بیشترین مدول کششی را داشته است که نسبت به رزین اپوکسی خالص ۶~ درصد افزایش یافته است.
- در بین نانو کامپوزیت‌های سه‌تایی، ترکیب شامل ۰.۷۵ درصد وزنی نانو صفحات گرافن و ۱۰ درصد وزنی لاستیک XNBR بیشترین ازدیاد طول تا پارگی و استحکام ضربه را داشته است که نسبت به رزین اپوکسی خالص به ترتیب ۲۹~ و ۱۴۳~ درصد افزایش پیدا کرده است.
- به طور کلی با افزودن نانو ذرات گرافن به سامانه رزین اپوکسی/ XNBR مدول و استحکام ضربه افزایش پیدا کرده‌اند در صورتی که ازدیاد طول تا شکست و استحکام کششی دچار کاهش شده‌اند. از طرف دیگر حضور XNBR موجب افزایش استحکام ضربه و ازدیاد طول تا شکست رزین اپوکسی شده است. بنابراین با حضور همزمان یک نانو ذره و یک لاستیک در رزین اپوکسی به یک ترکیب سه تایی با توازن مناسب در خواص مکانیکی تولید شده است.

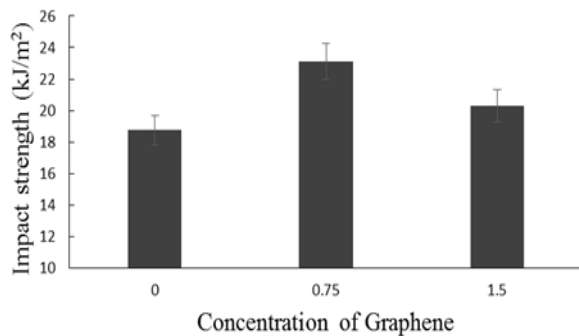


Fig. 13 The effect of graphene on impact strength of epoxy/ graphene samples

شکل 13 تأثیر حضور نانو صفحات گرافن بر استحکام ضربه نمونه‌های اپوکسی/ گرافن

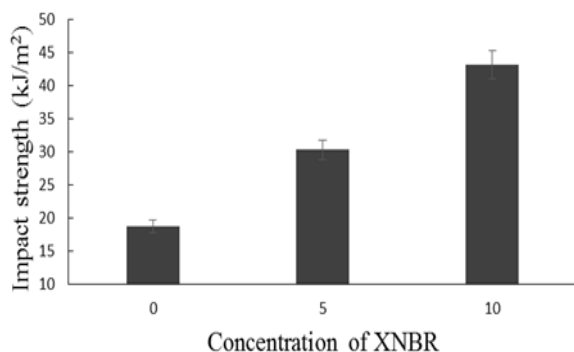


Fig. 14 The effect of XNBR on impact strength of epoxy/ XNBR samples

شکل 14 تأثیر حضور XNBR بر استحکام ضربه نمونه‌های اپوکسی/ XNBR

اما در درصد‌های بالاتر گرافن استحکام ضربه کاهش پیدا کرده است. کلوخه شدن گرافن در 1.5 درصد وزنی باعث ایجاد تمرکز تنش شده که این توزیع تنش محلی اطراف کلوخه‌ها باعث ایجاد بستر مناسب برای به وجود آمدن میکروتکرک‌ها شده و استحکام ضربه را کاهش می‌دهد [33].

شکل 14 تأثیر حضور لاستیک XNBR بر استحکام ضربه رزین اپوکسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اضافه کردن لاستیک XNBR باعث افزایش استحکام ضربه رزین اپوکسی شده است. در رزین‌های اپوکسی اصلاح شده با لاستیک، انرژی زیادی هنگام تغییر شکل پلاستیک جذب می‌شود. حضور فاز لاستیکی در زمینه‌های پلیمری با پیوندهای عرضی زیاد، مثل رزین اپوکسی، از طریق اتلاف انرژی زیاد هنگام جدا شدن پیوندهای بین لاستیک و زمینه و همچنین حفره‌های به وجود آمده به دلیل حفره‌زایی ذرات لاستیک می‌تواند سامانه را چقرمه‌تر کرده و افزایش استحکام ضربه را به دنبال داشته باشد [19,33]. در این تحقیق با افزودن 10 درصد وزنی XNBR افزایش چشمگیر 130 درصدی استحکام ضربه مشاهده شده است.

اثر حضور همزمان نانو صفحات گرافن و XNBR بر استحکام ضربه رزین اپوکسی در شکل 15 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کامپوزیت‌های رزین اپوکسی/ XNBR دارای استحکام ضربه بالاتری نسبت به رزین اپوکسی خالص هستند. افزودن نانو صفحات گرافن تا 0.75 درصد وزنی به این کامپوزیت‌ها باعث افزایش استحکام ضربه تا 2.4 برابر نسبت به رزین اپوکسی خالص می‌شود. همان‌طور که بحث شد، در درصد‌های بالاتر نانو صفحات گرافن (1.5 درصد وزنی) به دلیل تشکیل کلوخه‌ها باعث کاهش استحکام ضربه می‌شوند. لازم به ذکر است که این نانو کامپوزیت‌های سه‌تایی نسبت به رزین اپوکسی خالص افزایش 125 درصدی استحکام ضربه داشته‌اند.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های بر پایه‌ی رزین اپوکسی تقویت شده با نانو صفحات گرافن و لاستیک XNBR به صورت تجربی بررسی و نتایج زیر به دست آمد:

- در بین نانو کامپوزیت‌های دوتایی، افزودن نانو صفحات گرافن به ماتریس رزین اپوکسی اثر منفی بر استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی داشته است و در 1.5 درصد وزنی بیشترین کاهش برای استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی به ترتیب 14 و 16 درصد بوده است.
- در بین نانو کامپوزیت‌های دوتایی، حضور تنها 0.75 درصد وزنی نانو صفحات گرافن در زمینه رزین اپوکسی باعث افزایش 23 درصدی استحکام ضربه شده و حضور 1.5 درصد وزنی این نانو ذرات افزایش 20 درصدی مدول کششی را به دنبال داشته است.
- در بین نانو کامپوزیت‌های دوتایی، افزودن لاستیک XNBR در 10 درصد وزنی به زمینه رزین اپوکسی باعث کاهش استحکام و مدول کششی به ترتیب به میزان 17 و 19 درصد شده است. این در حالی است که اثر چشمگیر افزایشی XNBR (در 10 درصد وزنی) روی ازدیاد طول تا پارگی و استحکام ضربه رزین اپوکسی به ترتیب 46 و 130 درصد بوده است.
- در بین نانو کامپوزیت‌های سه‌تایی، ترکیب شامل 0.75 درصد وزنی نانو صفحات گرافن و 5 درصد وزنی لاستیک XNBR بیشترین

- [14] Wang, F. L. T. Drzal, et al. "Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Graphene Nanoplatelet/epoxy Composites." *Journal of Materials Science* 50(3): 1082-1093. 2015.
- [15] Kargarzadeh, H. I. Ahmad, et al., (2015). "Mechanical Properties of Epoxy-Rubber Blends."
- [16] Bagheri, R., B. Marouf, et al. (2009). "Rubber-toughened Epoxies: A Critical Review." *Journal of Macromolecular Science®, Part C: Polymer Reviews* 49(3): 201-225.
- [17] Thomas, R., D. Yumei, et al. (2008). "Miscibility, Morphology, Thermal, and Mechanical Properties of A DGEBA Based Epoxy Resin Toughened with a Liquid Rubber." *Polymer* 49(1): 278-294.
- [18] Thomas, R., J. Abraham, et al. (2004). "Influence of Carboxyl-terminated (Butadiene-co-acrylonitrile) Loading on the Mechanical and Thermal Properties of Cured Epoxy Blends." *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 42(13): 2531-2544.
- [19] Mathew, V. S., C. Sinturel, et al. (2010). "Epoxy Resin/liquid Natural Rubber System: Secondary Phase Separation and its Impact on Mechanical Properties." *Journal of Materials Science* 45(7): 1769-1781.
- [20] Ratna, D. (2007). *Epoxy Composites: Impact Resistance and Flame Retardancy*, iSmithers Rapra Publishing.
- [21] Ramos, V. D., H. M. Da Costa, et al. (2005). "Modification of Epoxy Resin: A Comparison of Different Types of Elastomer." *Polymer Testing* 24(3): 387-394.
- [22] Wang, F., L. T. Drzal, et al. (2016). "Enhancement of Fracture Toughness, Mechanical and Thermal Properties of Rubber/epoxy Composites by Incorporation of Graphene Nanoplatelets." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 87: 10-22.
- [23] Raza MA, Westwood AVK, Brown AP, Stirling C. Texture, Transport and Mechanical Properties of Graphite Nanoplatelets/silicone Composites Produced by Three Roll Mill. *Compos Sci Technol* 2012; 72:467-75.
- [24] Zakaria, M. R., M. H. Abdul Kudus, et al. (2017). "Comparative Study of Graphene Nanoparticle and Multiwall Carbon Nanotube Filled Epoxy Nanocomposites Based on Mechanical, Thermal and Dielectric Properties." *Composites Part B: Engineering* 119: 57-66.
- [25] King JA, Klimek DR, Miskioglu I, Odegard GM (2014) Mechanical Properties of Graphene Nanoplatelet/epoxy Composites. *J Compos Mater*. doi:10.1177/0021998314522674.
- [26] Arends CB. *Polymer toughening*. New York (USA): Marcel Dekker Inc.; 1996.
- [27] Dadfar, M. and F. Ghadami (2013). "Effect of Rubber Modification on Fracture Toughness Properties of Glass Reinforced Hot Cured Epoxy Composites." *Materials & Design* 47: 16-20.
- [28] Poonpipat, Y., K. Leelachai, et al. (2017). "Fracture Behavior of Silica Nanoparticles Reinforced Rubber/epoxy Composite." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*: 0731684417709952.
- [29] Leelachai, K., P. Kongkachuichay, et al. (2017). "Toughening of Epoxy Hybrid Nanocomposites Modified with Silica Nanoparticles and Epoxidized Natural Rubber." *J Polym Res* 24: 41.
- [30] I. Zaman, H.-C. Kuan, Q. Meng, A. Michelmore, N. Kawashima, T. Pitt, L. Zhang, S. Gouda, L. Luong and J. Ma, "A Facile Approach to Chemically Modified Graphene and its Polymer Nanocomposites," *Advanced Functional Materials*, Vol. 22, no. 13, pp. 2735-2743, 2012.
- [31] Zhou, W. and J. Cai (2012). "Mechanical and Dielectric Properties of Epoxy Resin Modified Using Reactive Liquid Rubber (HTPB)." *Journal of applied polymer science* 124(5): 4346-4351.
- [32] Nouri-Niyaraki, M. Ashenai-Ghasemi, F. Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Experimental Analysis of Graphene Nanoparticles and Glass Fibers Effect on Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/EPDM Based Nanocomposites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. \*\*, No. \*\*, pp. \*\*\*, 2016. (In Persian فارسی)
- [33] Park, Y. T., Y. Qian, et al. (2015). "Epoxy Toughening with Low Graphene Loading." *Advanced Functional Materials* 25(4): 575-585.

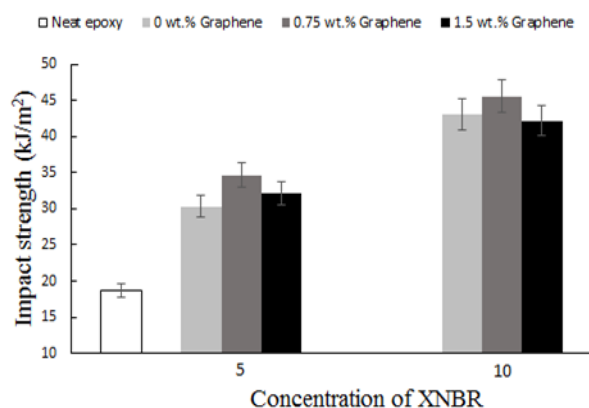


Fig. 15 The simultaneous effect of graphene and XNBR on impact strength of epoxy/ graphene/ XNBR samples

شکل 15 تأثیر حضور همزمان نانو صفحات گرافن و XNBR بر استحکام ضربه نمونه‌های اپوکسی/گرافن/ XNBR

### 5-سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق قرارداد شماره 6913 مورخ 1396/4/3 انجام گردیده است.

### 6-مراجع

- [1] Jumahat, A. C. Soutis, et al., "Tensile Properties of Nanosilica/Epoxy Nanocomposites." *Procedia Engineering* 41: 1634-1640. 2012.
- [2] Bezy, N. A. Fathima, A. L., "Effect of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on Mechanical Properties of Epoxy-Resin System." *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(5) 143-151. 2015.
- [3] Kumar, K. P. K. Ghosh, et al., "Improving Mechanical and Thermal Properties of TiO<sub>2</sub>-Epoxy Nanocomposite." *Composites Part B: Engineering* 97: 353-360. 2016.
- [4] Montazeri, A. J. Javadpour, et al., "Mechanical Properties of Multi-walled Carbon Nanotube/epoxy Composites." *Materials & Design* 31(9): 4202-4208. 2010.
- [5] Yue, L. G. Pircheraghi, et al., "Epoxy Composites with Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets – Dispersion and Synergy Effects." *Carbon* 78: 268-278. 2014
- [6] Ying, Z. L. Xianggao, et al., "Highly Exfoliated Epoxy/clay Nanocomposites: Mechanism of Exfoliation and Thermal/mechanical Properties." *Composite Structures* 132: 44-49. 2015.
- [7] Wei, J. T. Vo. et al., "Epoxy/graphene Nanocomposites-Processing and Properties: a Review." *RSC Advances* 5(90): 73510-73524. 2015.
- [8] Potts, J. R. D. R. Dreyer, et al., "Graphene-based Polymer Nanocomposites." *Polymer* 52(1): 5-25. 2011.
- [9] Galpaya, D., M. Wang, et al., "Preparation of Graphene Oxide/epoxy Nanocomposites with Significantly Improved Mechanical Properties." *Journal of Applied Physics* 116(5): 053518. 2014.
- [10] Wang, Y. C. Wang, et al., "Carboxyl-terminated Butadiene-acrylonitrile-toughened Epoxy/carboxyl-modified Carbon Nanotube Nanocomposites: Thermal and Mechanical Properties." *Express Polym Lett* 6(9): 719-728. 2012.
- [11] Mohammad A. Rafiee, Javad Rafiee, Zhou Wang, Huaihe Song, Zhong-Zhen Yu, and Nikhil Koratkar. *ACS Nano*, 2009, 1 (12), pp 1881-1890.
- [12] Zaman, I., T. T. Phan, et al., "Epoxy/graphene Platelets Nanocomposites with Two Levels of Interface Strength." *Polymer* 52(7): 1603-1611. 2011.
- [13] King, J. A. D. R. Klimek, et al., "Mechanical Properties of Graphene Nanoplatelet/epoxy Composites." *Journal of applied polymer science* 128(6): 4217-4223. 2013.





## بررسی تجربی چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه دار در برابر ضربه سرعت پایین شاریپی

مسعود عصفوری<sup>1</sup>، امید رحمانی<sup>2\*</sup>، محمدرضا زمانی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان  
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان  
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
\* صندوق پستی 45371-38791، [Omid.rahmani@znu.ac.ir](mailto:Omid.rahmani@znu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>دریافت: 96/7/14 پذیرش: 96/10/2</p> <p><b>کلیدواژگان:</b> سیم حافظه‌دار چندلایه فلز-الیاف طراحی تاگوچی ضربه شاریپی</p>	<p>در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی میزان جذب انرژی در چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار در برابر ضربه سرعت پایین پرداخته شده است. پارامترهای مورد آزمایش در این پژوهش، زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در گلره تقویت شده با 2 رشته سیم حافظه‌دار می‌باشند و برای اعمال ضربه از دستگاه ضربه شاریپی 200J استفاده شده است. از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌های این پژوهش استفاده گردید و نمونه‌های مورد بررسی بر اساس آرایه متعامد L16 ساخته شدند. در استفاده از این آرایه پارامترهای زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار در 4 سطح و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در 2 سطح مورد آزمایش قرار گرفتند. گلره‌های مورد بررسی از 19 لایه که حاوی 3 لایه آلومینیومی بودند، ساخته شدند. برای بررسی تاثیر تغییرات پارامترها بر روی میزان جذب انرژی ضربه شاریپی چندلایه، بر روی داده‌های استخراجی تحلیل واریانس انجام گرفت. مشخص شد که تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری این سیم‌ها در چندلایه به ترتیب به میزان 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد بر روی میزان جذب انرژی چندلایه تاثیرگذار می‌باشد. همچنین آنالیز واریانس نشان داد که تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری این سیم‌ها در چندلایه، با اطمینان به ترتیب 92.1 درصد، 90.6 درصد و 71 درصد بر تغییرات میزان جذب انرژی ضربه تاثیرگذار می‌باشد.</p>

### An Experimental investigation on Nitinol shape memory alloy reinforced GLAREs against Charpy low velocity impact

**Masoud Osfoury<sup>1</sup>, Omid Rahmani<sup>1\*</sup>, Mohammad Reza Zamani<sup>2</sup>**  
1- Department of Mechanical engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
2- Department of Mechanical engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran  
\* P.O.B. 45371-38791, Zanjan, Iran, [Omid.Rahmani@znu.ac.ir](mailto:Omid.Rahmani@znu.ac.ir)

**Keywords**  
Charpy impact  
Fiber metal laminate  
GLARE  
Shape memory alloy  
Nitinol

**Abstract**  
This research is on the energy absorption level in a metal-fiber laminate reinforced with a shape-memory-alloy and against low velocity impact. The parameters of the study are fiber angle, level of pre-strain and position of memory wires in a GLARE reinforced with 2 memory-wires, and a 200-J Charpy-Impact device was used to exert the impact. Moreover, we have focused on effects of changes in fiber's angel, the location of shape-memory wires and their pre-strain effect on energy absorption level of GLARE, which is reinforced with two shape-memory-wires, against a Charpy-impact of 200 Jules. Taguchi method was used in designing of the experiments for this research and the investigated specimen were constructed based on L16 orthogonal array. During the usage of array, parameters of "fiber angel" and the "pre-strain level of shape-memory wires" were tested in 4levels as well as the parameter related to the location of shape-memory-wires, tested in 2levels. The scrutinized GLAREs were constructed of 16layers containing 3layers of aluminum. The analysis of variance was performed on extracted data to investigate the effect of changes in parameters on the energy absorption level of laminate-Charpy-impact. It was found that the changes in following parameters of pre-strain of shape-memory wires, fiber's angel and the location of these wires in laminate, have the influence of 39.12%, 32.13%, 4.56% , respectively, on the energy absorption level of laminate. The variance analysis also proved that changes in energy absorption have confidence level of 92.1%, 90.6% and 71% respectively with the changes in aforementioned parameters.

**1-مقدمه**  
در سال‌های اخیر نیاز به استفاده توأمان از خواص مختلف مواد، مهندسیین را به تحقیق در مورد مواد جدید و توسعه آن واداشته است. چندلایه‌های فلز-

الیاف یکی از موادی هستند که در آن هم خواص ویژه استحکامی کامپوزیت‌های الیاف-پلیمر وجود دارد و هم خواص چقرمگی و مقاومت در برابر ضربه و بارگذاری‌های دینامیکی فلزات قابل ملاحظه می‌باشد. دسته‌ای از

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:  
Osfoury, M. Rahmani, O. and Zamani, M. R., "An Experimental investigation on Nitinol shape memory alloy reinforced GLAREs against Charpy low velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 403-414, 2018.

افزایش سرعت اولیه ضربه‌زنده و در نتیجه افزایش انرژی ناشی از ضربه، تعداد لایه‌های جدا شده، مساحت جدایش بین لایه‌ها و نیز تعداد لایه‌های شکسته شده افزایش می‌یابد، در حالی که روند جذب انرژی نمونه‌ها با افزایش سرعت ضربه زنده تغییر نمی‌کند [9].

صدیقی و داریوشی به بررسی تأثیر زاویه الیاف در روی جذب انرژی ضربه سرعت‌پایین چندلایه فلز الیاف پرداختند. آن‌ها برای تحقیق خود از 2 دستگاه ضربه شاری با انرژی‌های اعمالی متفاوت  $z$  150 و  $z$  6 استفاده کردند، هر چند نتایج آزمایش‌ها آن‌ها برای هر دستگاه مقدار متفاوتی را نشان می‌داد اما آن‌ها نتیجه گرفتند که لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف 0 درجه مقاومت به ضربه نمونه را به شدت افزایش می‌دهد، لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف 90 درجه نمونه را شکننده‌تر می‌کند و لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف 45 درجه، اگر در بخش پشتی نمونه قرار گیرند، انرژی ضربه‌ای جذب شده را افزایش می‌دهند. در واقع نیروی وارد شده باعث شکست کامپوزیت روی خط 45 درجه و موازی الیاف می‌شود و این نوع شکست موجب پاره شده لایه آلومینیومی مقابل آن می‌شود. به بیان دیگر لایه آلومینیومی ابتدا دچار کرنش پلاستیک زیادی شده و سپس می‌شکند که این امر باعث جذب انرژی زیادی به وسیله این لایه می‌گردد [10].

یکی دیگر از موادی که به منظور بهبود خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌ها نظر محققان را به خود جلب کرده است، آلیاژهای حافظه‌دار می‌باشد. هنگامی که آلیاژ حافظه‌دار تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد فاز کریستالی آن از مارتنزیت به مارتنزیت دوقلوبی تغییر کرده و با اعمال حرارت به آن، تغییر فاز مارتنزیت دوقلوبی به فاز آستنیت اتفاق افتاده و منجر به بازیابی شکل اولیه آلیاژ می‌شود، این فرآیند با عنوان حافظه‌داری این آلیاژها شناخته می‌شود. همچنین در نمودار تنش و کرنش این آلیاژها در سیکل بارگذاری-باربرداری 1 حلقه هیستریزس به وجود می‌آید که مساحت داخلی این حلقه معادل با میزان انرژی است که آلیاژ مستهلک می‌سازد. این 2 خاصیت باعث شده است که این آلیاژها یکی از کاندیداها برای تقویت کامپوزیت‌های الیاف پلیمر در برابر بارگذاری ضربه‌ای باشند.

سان و همکاران به مطالعه پاسخ ضربه‌ای چندلایه متعامد الیاف شیشه - اپوکسی تک جهته تقویت‌شده با آلیاژهای حافظه‌دار که در موقعیت‌های مختلف قرار گرفته بودند، پرداختند. آن‌ها ابتدا از طریق فرایند تزریق رزین در خلأ صفحات بدون آلیاژ حافظه‌دار را تولید کرده و سپس در بین این صفحات، یک لایه حاوی سیم حافظه‌دار در ارتفاع‌های مختلف قرار دادند. نسبت این ارتفاع‌ها به نسبت کل ضخامت چندلایه، اعداد  $1/8$ ،  $1/2$ ،  $7/8$  و  $15/16$  را شامل می‌شد. آن‌ها همچنین نمونه‌هایی با 2 صفحه حاوی سیم حافظه‌دار را نیز ساخته و آزمایش کردند. در این دسته از نمونه‌ها 2 لایه حافظه‌دار در ارتفاع‌های  $15/16$  و  $14/16$  ضخامت،  $15/16$  و  $1/2$  ضخامت، در  $14/16$  و  $1/2$  ضخامت، در  $14/16$  و  $1/2$  ضخامت و در ارتفاع‌های  $1/2$  و  $1/8$  ضخامت نمونه قرار داشتند. آزمایش ضربه سرعت‌پایین آن‌ها با دستگاه ضربه افتان J. 28 انجام گرفت. پاسخ‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها تحلیل شده و پارامترهای مؤثر مانند نیروی تماس (F)، جابجایی (D) و انرژی (E) استخراج شدند. برای تجزیه و تحلیل مدهای آسیب، آن‌ها نمونه‌ها را ابتدا با استفاده از بازرسی چشمی بررسی کرده و برای مشاهده بهتر از میکروسکوپ الکترونی استفاده کردند. نتایج تجربی مطالعه آن‌ها نشان داد که مقاومت چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار در برابر ضربه سرعت‌پایین بیشتر از چندلایه‌هایی است که با سیم حافظه‌دار تقویت نشده‌اند، همچنین در صورتی که

این کامپوزیت‌ها که با عنوان گلره‌ها شناخته می‌شوند، دارای لایه‌های فلزی از جنس آلومینیوم هستند که با الیاف شیشه تقویت شده‌اند. این مواد در برابر بارگذاری‌های ضربه‌ای مقاومت بالایی داشته و نسبت به آلومینیوم یکپارچه چگالی پایین‌تری دارند.

ضربه وارد بر پیکره هواپیما می‌تواند ضربه کم‌سرعت مانند افتادن بار بر روی بدنه، برخورد ماشین و سنگ‌ریزه و افتادن ابزار کار بر روی پیکره هواپیما یا برخوردهای پرسرعت مانند برخورد هواپیما با پرندگان و تگرگ و یا برخورد گلوله با بدنه هواپیماهای جنگی را شامل شود. هر برخوردی که دارای سرعتی کمتر از  $10 \text{ m/s}$  باشد جزو این دسته از برخوردها حساب می‌شود [4-1].

آشنای قاسمی و همکاران پاسخ دینامیکی ورق یکسر گیردار کامپوزیتی با لایه فلزی تحت ضربه با اجرام کوچک و بزرگ را با استفاده از مدل 2 درجه آزادی جرم و فنر و نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از ورق آلومینیومی کم ضخامت در بین لایه‌های کامپوزیت باعث بهبود مقاومت ورق در اثر اعمال ضربه می‌شود [5].

جاروسلا و همکاران به مقایسه رفتار چندلایه‌های فلز-الیاف شیشه-اپوکسی/آلومینیوم و کربن-اپوکسی/آلومینیوم پرداختند. در پژوهش آن‌ها تأثیر جهت‌گیری الیاف و همچنین تجزیه و تحلیل مدت‌زمان بارگذاری، منطقه آسیب و عمق تخریب و ارتباط آن‌ها با سطوح مختلف انرژی ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده امکان تعیین نقاط مشخصی را که ممکن است در مراحل خاصی از فرآیند تخریب ساختار چندلایه، تخریب در آنجا رخ دهد را ایجاد می‌کند. این مودهای تخریب شامل ریزترک‌های محلی و لایه‌لایه شدن می‌باشند که سبب کاهش سفتی چندلایه شده و آسیب بیشتر به واسطه ترک‌های موجود در چندلایه را باعث می‌شوند. آن‌ها دریافتند که چندلایه‌های دارای الیاف کربن، نسبت به لمینیت‌هایی که حاوی الیاف شیشه هستند، تمایل بیشتری به سوراخ شدن دارند و لایه‌لایه شدن در کامپوزیت و جدایش بین صفحات فلزی و لایه‌های الیاف-پلیمر در چندلایه‌های فلز-الیاف مد اصلی تخریب می‌باشد. آن‌ها دریافتند که در چندلایه‌های گلره جذب انرژی عمدتاً از طریق تغییر شکل پلاستیک و همچنین از طریق شروع لایه‌لایه شدن و پخش آن می‌باشد، در حالی که در چندلایه‌های کارال(الیاف کربن-اپوکسی/آلومینیوم) جذب انرژی ضربه از طریق نفوذ و سوراخ کردن چندلایه اتفاق می‌افتد [6].

شنگینگ و همکاران پاسخ دینامیکی ضربه و نحوه شکست ورق‌های فلز-الیاف تحت ضربه سرعت‌پایین را مورد بررسی قرار دادند، نمونه‌های آن‌ها متشکل از 1 لایه شیشه - اپوکسی (شامل الیاف تک جهته و یا پارچه الیاف 0درجه - 90 درجه) بود که در بین 2 لایه آلومینیوم چسبیده بودند. آن‌ها برای بررسی تجربی از دستگاه تست ضربه افتان و برای مطالعه عددی از نرم افزارهای استاندارد المان محدود استفاده کردند. آن‌ها مدهای شکست، بیشترین نیروی تماسی و مقدار نیروی تماسی در طول زمان برخورد را شبیه‌سازی نموده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج بررسی آن‌ها تطبیق قابل قبول نتایج تجربی را با خروجی‌های حاصل از مدل‌سازی نشان داد [7].

چندلایه‌های فلز-الیاف بر پایه کامپوزیت‌های گرمانرم توسط کانت ول و همکارانش بررسی شد، آن‌ها دریافتند که این دسته از چندلایه‌ها نسبت به چندلایه‌های با ماتریس گرماسخت برای تحمل ضربه و جذب انرژی ناشی از آن و از لحاظ استحکام شکست خواص بهتری دارند [8].

سزیکار بروجردی و همکاران به بررسی تجربی و تحلیلی ضربه کم‌سرعت بر صفحات چندلایه فلز-الیاف پرداختند. آن‌ها دریافتند که با

نیود مقایسه کردند، آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که در صورتی که صفحه کامپوزیتی با آلیاژ حافظه‌دار تقویت شود استحکام صفحه به شدت افزایش می‌یابد [15].

سیلیو پاپادا و همکاران به بررسی آزمایشگاهی اثر تقویت‌کنندگی سیم‌های حافظه‌دار و سیم‌های فولادی روی مواد مرکب رزین-الیاف در مقابل ضربه سرعت‌پایین پرداختند و دریافتند که اثر تقویت‌کنندگی سیم‌های حافظه‌دار بیشتر از سیم‌های فولادی می‌باشد. آن‌ها همچنین به این موضوع پی بردند که اثر تقویت‌کنندگی سیم‌های حافظه‌دار در مقابل ضربه سرعت‌پایین روی کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی کمتر از کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی می‌باشد [16].

رضائی پارسا و اسلامی فارسانی به بررسی تجربی تأثیر تقویت‌کنندگی پیش‌کرنش‌های مختلف سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار نیتینول تعبیه‌شده در چندلایه‌های فلز-الیاف در برابر ضربه سرعت‌پایین پرداختند. آن‌ها برای انجام آزمایش‌های خود از دستگاه ضربه افتان استفاده کردند. جنس چندلایه مورد بررسی آن‌ها آلومینیوم-شیشه-اپوکسی بود که درون آن‌ها 6 سیم با پیش‌کرنش‌های 1، 2 و 3 درصد تعبیه شده بود. نتیجه بررسی آن‌ها نشان داد که با افزایش پیش‌کرنش سیم‌ها، مدت‌زمان تماس ضربه زنده با قطعه افزایش و شوک نیروی ضربه، جابجایی ضربه زنده و میزان سطح آسیب کاهش می‌یابد [17].

آشنای قاسمی و همکاران به بررسی پاسخ آلومینیوم ترک‌دار که با چندلایه‌های فلز-الیاف تعمیر شده بودند، در برابر ضربه شارپی پرداختند. پیچ چندلایه فلز-الیاف مورد استفاده آن‌ها از یک لایه آلومینیوم و 2 لایه پارچه بافته شده الیاف شیشه تشکیل می‌شد. نمونه‌های مورد بررسی آن‌ها دارای 3 پارامتر طول ترک، زاویه ترک و نحوه چیدمان لایه‌ها در چندلایه فلز-الیاف بود. نتیجه آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که برای نمونه‌های دارای ترک بلندتر تأثیر زاویه ترک در جذب انرژی ضربه بیشتر خواهد بود. در پژوهش آن‌ها مشخص شد که جذب انرژی ضربه شارپی در نمونه‌ها، بیشتر متأثر از چیدمان لایه‌ها خواهد بود. همچنین آن‌ها دریافتند که میزان جذب انرژی در نمونه‌های دارای ترک با زاویه 45 درجه 25 درصد بیشتر از نمونه‌های دارای زاویه 0 درجه خواهد بود. آن‌ها همچنین دریافتند که نحوه چیدمان لایه‌ها و محل قرارگیری لایه آلومینیومی در چندلایه پیچ تعمیر بر روی میزان جذب انرژی بسیار مؤثر می‌باشد. به طوری که با افزایش فاصله لایه فلزی پیچ تعمیر از آلومینیوم دارای ترک، میزان جذب انرژی چندلایه کاهش می‌یابد [18].

خلیلی و همکاران یک ترکیب جدید از کامپوزیت‌های فلز-الیاف را معرفی نمودند. نمونه‌های آن‌ها از صفحات فولاد/آلومینیوم/الیاف-پلیمر تشکیل شده بود. آن‌ها روی نمونه‌های ساخته شده آزمایشات مختلفی را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که کامپوزیت‌های فلز-الیاف حد تحمل بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های الیاف-پلیمر دارند. همچنین میزان مساحت زیر نمودار تنش و کرنش در چندلایه فلز-الیاف بزرگتر از ناحیه زیر نمودار در چندلایه الیاف-پلیمر می‌باشد. در آزمایشات آن‌ها مشخص شد که حضور لایه‌های فولادی در چندلایه باعث افزایش میزان جذب انرژی ضربه و همچنین افزایش سختی چندلایه می‌شود. همچنین سختی خمشی چندلایه‌هایی که با صفحات فولادی تقویت شده‌اند 16 برابر بیشتر از سختی خمشی چندلایه‌های الیاف-پلیمر خواهد بود، این در حالیست که استفاده کردن از فولاد در چندلایه باعث افزایش وزن چندلایه می‌شود [19].

با توجه به آنچه از تحقیقات گذشته موجود حاصل شد، نیاز به ساخت چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار و بررسی خواص ضربه‌ای

سیم‌ها در 2 صفحه قرار بگیرند و میانگین فاصله آن‌ها از ضربه زنده کمینه باشد میزان جذب انرژی ضربه نیز بیشینه خواهد بود [11].

هو و همکاران به مطالعه اثر مقاوم‌سازی چندلایه‌های مورد استفاده در بدنه هواپیماها که با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی و سوپرالاستیک تقویت شده بودند، پرداختند. آن‌ها در بررسی خود ابتدا به مطالعه عددی رفتار چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار در برابر ضربه سرعت‌پایین پرداخته و برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند، سپس، آن‌ها به بررسی پاسخ گذرای چندلایه پرداخته و توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌ها را به دست آوردند. نتایج عددی استخراج‌شده نشان داد که هر 2 مقدار تنش و تغییر شکل در چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار از چندلایه فاقد آلیاژ حافظه‌دار کمتر است. این مسئله ثابت کرد که تعبیه آلیاژ حافظه‌دار در چندلایه‌های پلیمر-الیاف می‌تواند به‌طور مؤثر باعث بهبود مقاومت سازه در برابر ضربه سرعت‌پایین شود. آن‌ها در نهایت به بررسی تأثیر حضور آلیاژ حافظه‌دار شکلی و سوپرالاستیک در چندلایه به‌منظور مقاوم‌سازی چندلایه در برابر ضربه سرعت‌پایین پرداختند. مقادیر تنش ماکزیمم و تغییر شکل در چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به چندلایه غیرمسلح با آلیاژ حافظه‌دار به ترتیب به میزان 18.28 و 9.43 درصد کاهش داشته است و نیز مقادیر مذکور برای چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ سوپرالاستیک نسبت به چندلایه غیرمسلح با آلیاژ حافظه‌دار کاهشی معادل 8.12 درصد و 5.19 درصد را نشان داد. در آخر آن‌ها نتیجه گرفتند که تقویت کردن چندلایه با آلیاژ حافظه‌دار می‌تواند منجر به تولید چندلایه‌هایی شود که در برابر ضربه سرعت‌پایین مقاومت بالاتری نسبت به چندلایه غیرمسلح دارند [12].

شن و همکاران در پژوهش خود به بررسی قابلیت مقاومت ضربه‌ای هر 2 سیم حافظه‌دار شکلی و سوپرالاستیک نیتینول پرداختند. سیم‌های مورد بررسی آن‌ها 0.3 mml قطر داشتند و تحت سطوح مختلف انرژی ضربه و دماهایی بین دمای شروع آستنیت و دمای پایان آستنیت آزمایش شدند. آن‌ها در بررسی خود از 1 نوع جدیدی از طرح آزمایش‌ها استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که مسلح کردن چندلایه با هر دو نوع از سیم‌های سوپرالاستیک و حافظه‌دار شکلی نیتینول باعث افزایش قابل‌ملاحظه مقاومت چندلایه در برابر ضربه می‌شود و این سیم‌ها می‌توانند انرژی ضربه را به میزان بسیار بیشتر از فلزات دیگر مانند آهن، مس و آلومینیوم مستهلک کنند. همچنین آن‌ها دریافتند که آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیتینول نسبت به آلیاژ سوپرالاستیک می‌تواند در مدت‌زمان کمتری مقدار انرژی بیشتری را از ضربه زنده جذب و آن را مستهلک کند. آن‌ها همچنین دریافتند که تقویت‌کنندگی آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیتینول در برابر ضربه شدیداً به دمای محیط آزمایش وابسته است و این وابستگی به دما مخصوصاً در محدوده دمایی شروع و پایان آستنیت به شکل شدیدی قابل رؤیت است. تحقیقات آن‌ها برای مقاوم‌سازی خودروها در برابر ضربات ناشی از تصادفات مورد استفاده قرار گرفت [13].

ژانگ و همکاران دو دسته صفحه کامپوزیتی ساختند، یک دسته از این صفحات به سیم‌های حافظه‌دار تک‌جهته و دسته دیگر به سیم‌های حافظه‌دار بافته‌شده مسلح بود، آن‌ها به تحلیل ارتعاشی ناشی از برخورد پرداختند. مطالعه آن‌ها نشان داد که با کنترل تحول مارتنزیت به آستنیت در آلیاژ حافظه‌دار می‌توان کنترل بیشتری روی تنظیم سفتی سازه‌ها داشت [14].

کین تاک لاوو و همکاران به بررسی آزمایشگاهی روی چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه - اپوکسی که با سیم‌های حافظه‌دار تقویت‌شده بودند پرداختند و نتایج آزمایش‌ها را باحالتی که در آن سیم‌های حافظه‌دار موجود

برای تقویت کردن چندلایه در برابر ضربه استفاده شده است. درصدهای فلزات استفاده شده در ساخت این آلیاژ با توجه به استاندارد ASTM F2063 مورد پذیرش می‌باشند.

از آنجایی که در برگه مشخصات این سیم حافظه دار مشخصات مکانیکی محصول ذکر نشده بود، برای مشخص کردن مقدار کرنش پارگی سیم، روی این سیم توسط آزمایشگاه دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی آزمایش کشش سیم انجام شد. نتیجه آزمایش نشان داد که میزان کرنش پارگی این سیم به‌طور میانگین 3.4 درصد می‌باشد.

با توجه به این که در این پژوهش میزان دمای شروع و پایان مارتنزیت و آستنیت از پارامترهای بسیار مهم می‌باشد، لذا معلوم بودن این پارامترها نیز ضروری می‌نماید.

به منظور به دست آوردن این دماها برای سیم حافظه دار، آزمایش DSC توسط شرکت رازی بر روی آن انجام گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که دماهای پایان و شروع آستنیت و شروع و پایان مارتنزیت به ترتیب مقادیر  $0.5^{\circ}\text{C}$ ،  $5.6^{\circ}\text{C}$ ،  $66.4^{\circ}\text{C}$ ،  $75.9^{\circ}\text{C}$  می‌باشد.

استحکام استاتیکی نهایی و چگالی این سیم نیز با استعلام از سازنده آن مقادیر جدول 1 را مشخص نمود.

جدول 1 خواص مکانیکی سیم نیتینول

Table 1 Nitinol wire mechanical characteristics

مقدار	خاصیت
$>100\text{ MPa}$	تنش نهایی تحت بارگذاری 3mm/min
6.5 gr/cc	چگالی

در این پژوهش از آلومینیوم گرید 2024 با عملیات حرارتی T3 به ضخامت 0.5 mm استفاده شد. ابتدا آلومینیوم به قطعات  $4\text{cm} \times 24\text{cm}$  بریده شد و برای ساخت نمونه‌ها این قطعات مورد استفاده قرار گرفتند.

### 3-طراحی آزمایش‌ها

در این مطالعه از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها، تحلیل نتایج و بهینه‌سازی آن‌ها استفاده شد. به‌طور ایده‌آل در این روش، انجام یک دوره جلسات طوفان ذهنی، بررسی تحقیقات گذشته و آزمایش‌های ابتدایی برای تعیین نوع و سطوح فاکتورهای مناسب جهت طراحی آزمایش‌ها نیاز است. چنانچه در بررسی منابع مورد استفاده در تحقیق نیز بیان شد تاکنون تحقیقی مبنی بر بررسی مقاومت به ضربه شاری در چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه دار انجام نگرفته است. با توجه به بررسی‌هایی که بر روی منابع گذشته انجام شد 3 پارامتر زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش سیم حافظه دار و محل قرارگیری سیم نسبت به ضربه‌زننده به‌عنوان کاندیداهای پارامترهای موثر معرفی شدند. بنابراین نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق چندلایه‌های تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار بودند که در آنها زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه دار و محل قرارگیری سیم‌های حافظه دار نسبت به ضربه‌زننده متغیر است.

در این پژوهش فاکتورهای زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم حافظه دار در 4 سطح و محل قرارگیری سیم حافظه دار در 2 سطح مورد بررسی قرار گرفت. زوایای 0 درجه، 30 درجه، 45 درجه و 60 درجه سطوح زاویه الیاف را و مقدارهای 0 درصد، 1 درصد، 2 درصد و 3 درصد سطوح مورد بررسی برای میزان پیش‌کرنش سیم حافظه دار را تشکیل می‌دادند. فاصله قرارگیری سیم‌های حافظه دار از ضربه زننده نیز در 2 سطح یعنی بین لایه‌های 5 و 6 چندلایه و بین لایه‌های 14 و 15 (با فرض اینکه لایه

آنها مفید به فایده می‌باشد، لذا در این پژوهش به بررسی میزان جذب انرژی ضربه شاری چندلایه گلره تقویت شده با 2 رشته سیم حافظه دار و میزان تاثیر تغییرات پارامترهای میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌های حافظه دار نسبت به ضربه زننده در جذب انرژی ضربه سرعت پایین شاری پرداخته شده است.

### 2-مواد و روش‌ها

مواد سازنده نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق رزین اپوکسی، الیاف شیشه، ورق آلومینیوم و سیم آلیاژ حافظه دار می‌باشد.

در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه دار از رزین اپوکسی کر<sup>1</sup> 828 ساخت شرکت کوموهو<sup>2</sup> کره جنوبی به‌عنوان فاز زمینه استفاده شد. این رزین دارای ساختاری بر پایه ترکیب پلیمری بیسفنول ای<sup>3</sup> و اپی کلروهیدرین<sup>4</sup> می‌باشد.

رزین اپوکسی مذکور به‌صورت خام و بدون رقیق‌کننده از شرکت شیمی افسون تهیه گردید. از هاردنر تری‌اتیلن-اتترامین<sup>5</sup> به‌عنوان جز سخت‌کننده رزین اپوکسی استفاده شد. این هاردنر با نسبت 12 درصد جرمی با رزین پایه ترکیب شد.

رزین اپوکسی کر 828 دارای ویسکوزیته متوسط می‌باشد. برخی از خواص این رزین که از عوامل مهم استفاده از آن است، شامل موارد ذیل می‌باشد.

- خواص مکانیکی خوب و مقاومت در برابر خوردگی بالا
- مناسب برای پوشش‌دهی سطوح مختلف
- واکنش‌پذیری بالا با هاردنرهای آمینی
- چسبندگی مناسب با الیاف
- امکان استفاده در ساخت سازه‌های بزرگ

اپوکسی رزین کر 828 که در بازارهای بین‌المللی با نام اپون<sup>6</sup> 828 شناخته می‌شود، متداول‌ترین نوع رزین استفاده شده به‌عنوان فاز زمینه در کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی می‌باشد.

برای مشخص شدن کامل اجزای تشکیل‌دهنده چندلایه پلیمر-الیاف استفاده شده در این مطالعه، پس از مشخص شدن جنس فاز زمینه، نوع الیاف شیشه نیز مشخص گردید، بدین‌صورت که پارچه شیشه‌ای بافته شده 400 گرمی به‌عنوان الیاف تقویت‌کننده فاز زمینه کامپوزیت انتخاب شد. این پارچه الیاف شیشه‌ای محصول شرکت دونگیو فایبرگلاس<sup>7</sup> چین بود و از شرکت ایران کامپوزیت خریداری شد. پارچه مورد استفاده به عرض یک متر و از نوع E-GLASS بود. طبق برگه مشخصات فنی این محصول استحکام نهایی و تسلیم این الیاف 3200 N/MM می‌باشد و نوع آن حصیری ساده بافت است. طراحی انعطاف‌پذیر و کرنش شکست بالا، قابلیت خیس شونده‌ی بالا، ایجاد چسبندگی خوب با ماتریس، قیمت پایین و امکان سفارش مقادیر جرمی مختلف، دلیل انتخاب این نوع از الیاف شیشه بود.

در این تحقیق از سیم حافظه دار به قطر 0.3 mm و تولیدی کارخانه فرانک جونگ<sup>8</sup> چین با درصد 55.07 درصد نیکل و 43.86 درصد تیتانیوم

<sup>1</sup> KER

<sup>2</sup> KUMUHO

<sup>3</sup> Bisphenol A

<sup>4</sup> Epichlorohydrin

<sup>5</sup> Triethylenetetramin

<sup>6</sup> EPON

<sup>7</sup> Dongyu Fiberglass

<sup>8</sup> Frank Jung

به منظور اتصال بهتر لایه‌های آلومینیومی بریده شده به ابعاد 24mm×4mm به رزین اپوکسی، روی قطعات آلومینیومی، عملیات سطحی ذیل انجام شد.

- چربی زدایی با استون
- سنباده زنی در جهت الیاف
- چربی زدایی با استون
- آلکالین شویی
- اچ کردن با محلول فریک سولفات و اسید سولفوریک
- آنودایز

الیاف شیشه نیز در ابعاد مشابه آلومینیوم‌ها در زوایای مورد بررسی بریده شدند. از آنجایی که برای ساخت گلره‌ها اعمال فشار برای اتصال مناسب بین رزین اپوکسی و فلز آلومینیوم غیر قابل اغماض است، لذا قالب ساخت و اعمال مطابق شکل شماره 1 طراحی و ساخته شد. این قالب دارای 2 فک می‌باشد. فک زیرین از صفحه فولادی به ضخامت 3 cm ساخته شده است که در داخل آن شیار به عمق 1 cm و با ابعاد داخلی 3.5 cm×23 cm تراشیده شده و با رزین سیلیکون رابر پر شده است. فک بالایی قالب نیز از 1 صفحه فولادی ساخته شده است و با استفاده از 4 پیچ شماره 16 به راحتی به فک پایینی بسته شده و باعث اعمال فشار مورد نظر می‌شود.

برای اعمال پیش کرنش‌های مورد نظر به سیم‌های حافظه‌دار نیز قالبی مستطیل شکل مطابق شکل شماره 2 طراحی و ساخته شد. این قالب از 1 قاب مستطیل شکل تشکیل شده است که در روی عرض‌های آن 4 سوراخ تعبیه گشته است. 4 عدد 3 نظام در داخل این سوراخ‌ها قرار گرفته و با پیچاندن پیچ تنظیم آن‌ها مقدار پیش کرنش مورد نظر به سیم‌ها اعمال خواهد شد. برای رساندن سیم‌ها به پیش کرنش دلخواه، ابتدا آنها توسط اسپری سرما به فاز مارتنزیت برده شده و سپس با پیچاندن پیچ تنظیم پیش کرنش مورد نظر به سیم‌های حافظه‌دار اعمال شد. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا 2 قطعه آلومینیوم بر روی قالب پرس مطابق شکل شماره 3 قرار داده شد، سپس در اطراف آن‌ها تعدادی سوزن به داخل سیلیکون رابر فرو برده شد. این سوزن‌ها به منظور جلوگیری از لغزش لایه‌ها در حین آغشته سازی به رزین تعبیه شده است. در ادامه لایه‌ها از طریق روش لایه گذاری دستی روی هم قرار گرفتند.

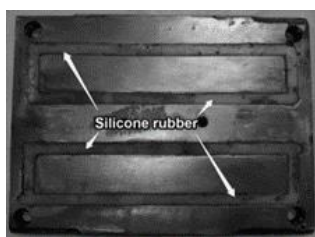


Fig. 1 Pressing die for constructing fiber metal laminates

شکل 1 قالب ساخت و پرس چندلایه فلز-الیاف

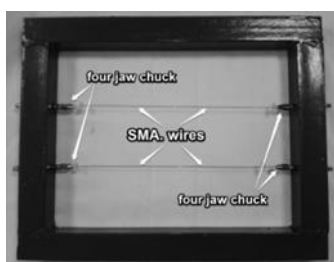


Fig. 2 Frame for wire prestraining

شکل 2 قاب پیش‌کرنش‌دهنده سیم حافظه‌دار

در تماس با چکش، لایه شماره 1 در نظر گرفته شود) طراحی شدند. در این مقاله برای رعایت ایجاز، به جای به کار بردن عبارات محل سیم در بین لایه‌های 5-6 و 14-15، از عبارات‌های نزدیک نسبت به ضربه زننده و دور نسبت به ضربه زننده استفاده شده است.

بر اساس چگالی الیاف و رزین مورد استفاده و با توجه به اینکه نسبت حجمی استاندارد برای الیاف در ساخت گلره‌ها 60 درصد می‌باشد و اینکه در این پژوهش گلره مورد نظر دارای 3 لایه آلومینیومی می‌باشد، تعداد لایه‌های الیاف پلیمر مورد نیاز برای دستیابی به نسبت حجمی مذکور، 16 لایه محاسبه شد. بنابراین در کل در این پژوهش یک 19 لایه فلز الیاف با لایه چینی [AL/GI, GI, GI, GI, GI, GI, GI, GI, GI/AL/ GI, GI, GI, GI, GI, GI, GI /AL] که با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار تقویت شده بود مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین چنانچه گفته شد 2 سطح نزدیک و دور که برای محل قرارگیری سیم حافظه‌دار تعریف شد، به ترتیب در بین لایه‌های 4 و 5 پلیمر-الیاف و 9 و 10 پلیمر-الیاف می‌باشند.

آزمایش‌های انجام گرفته شده در این تحقیق با استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی و بر اساس آرایه متعامد L16 که در جدول شماره 2 مشاهده می‌شود، انجام گرفت.

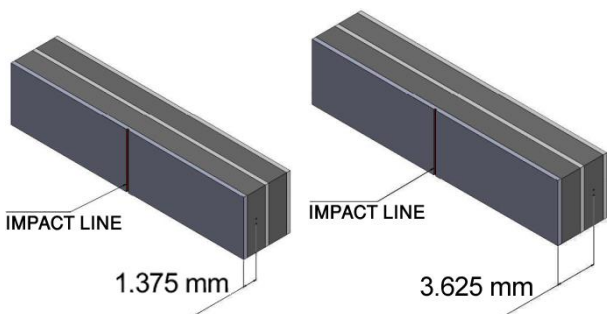
جدول 2 جدول طراحی آزمایش تاگوچی

Table 2 Taguchi design of experiment

محل سیم	سطح زاویه الیاف	سطح پیش کرنش	شماره آزمایش
نزدیک	0	0%	1
نزدیک	30	0%	2
دور	45	0%	3
دور	60	0%	4
نزدیک	0	1%	5
نزدیک	30	1%	6
دور	45	1%	7
دور	60	1%	8
دور	0	2%	9
دور	30	2%	10
نزدیک	45	2%	11
نزدیک	60	2%	12
دور	0	3%	13
دور	30	3%	14
نزدیک	45	3%	15
نزدیک	60	3%	16

### 1-3- استاندارد ساخت

طبق بررسی‌های صورت گرفته، در تمامی استانداردهای آمریکایی، وجود شکاف یا ناچ در نمونه‌های تست غیرقابل اغماض بوده است و از بین استانداردهای ایزو نیز تنها ISO197 نمونه‌هایی را در نظر می‌گرفت که در آن‌ها ناچ وجود نداشت. به جهت آنکه هدف این پژوهش بررسی اثر پیش‌کرنش آلیاژ حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری آلیاژ در چندلایه بر روی جذب انرژی ضربه شاری می‌باشد و وجود ناچ باعث به هم خوردن پارامترهای بررسی می‌شود، لذا استاندارد ISO179-a، که در آن ناچ در نظر گرفته نشده بود، برای ساخت نمونه‌ها انتخاب شد. بر طبق این استاندارد قطعات در ابعاد 5 mm×15 mm×65 mm و بدون ناچ ساخته شدند.



**Fig 6-A.** The distance between the SMA wires and the impact plate in the string-included specimen near to the impactor

شکل 6a نمونه دارای سیم حافظه‌دار که سیم‌های آن در فاصله نزدیک به ضربه‌زننده قرار دارد.

**Fig 6-B.** The distance between SMA wires and the impact plate in the string-included specimen far from the impactor

شکل 6b نمونه دارای سیم حافظه‌دار که سیم‌های آن در فاصله دور از ضربه‌زننده قرار دارد.

به منظور رساندن سیم‌های حافظه‌دار به دمای آستنیت و ایجاد تنش بازبایی در چندلایه، نمونه‌های استاندارد به مدت 150 دقیقه در دمای 75 درجه سلسیوس قرار داده شدند. با انجام این کار علاوه بر پس پخت شدن رزین اپوکسی با تغییر فاز سیم‌های حافظه‌دار کل گلره تحت تنش فشاری قرار گرفت.

برای انجام تست از دستگاه تست ضربه شاریبی 200 J که ساخت شرکت سنتام بود استفاده شد. ساپورت‌های این دستگاه دارای فاصله 40 mm بوده و بیشینه انرژی اعمالی دستگاه 200 J می‌باشد.

#### 4-نتایج و بحث

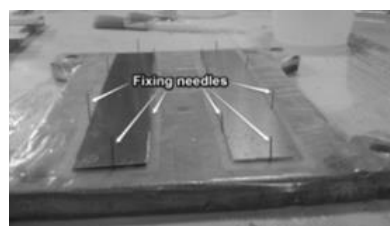
چنانچه گفته شد نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش 16 نمونه و 3 تکرار را شامل می‌شدند. میانگین جذب انرژی تکرارهای هر نمونه به عنوان متغیر خروجی هر نمونه در نظر گرفته شد. نتایج نمودار شکل 7 نشان‌دهنده میانگین میزان جذب انرژی چندلایه در برابر ضربه شاریبی 200 J می‌باشد.

برای سهولت در توضیح نمودار شکل شماره 7 ستون‌های آن به 4 دسته 4 تایی تقسیم بندی شدند به طوری که در نمونه‌های هر دسته میزان پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار بهم برابر باشند. آنگاه دسته‌های اول و دوم، نمونه‌هایی را شامل می‌شوند که در آن‌ها میزان پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب 0 درصد و 1 درصد بوده و در هر دسته، زوایای الیاف تار نمونه‌ها به ترتیب مقادیر 0، 30، 45 و 60 درجه را شامل می‌شوند. محل قرارگیری سیم‌ها نیز در نمونه‌های 2 دسته اول به ترتیب طبق الگوی (نزدیک، نزدیک، دور، دور) قرار دارند. دسته‌های 3 و 4 نیز روندی مشابه دارند. با این تفاوت که در آنها میزان پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب مقادیر 2 درصد و 3 درصد را شامل می‌شوند و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب از الگوی (دور، دور، نزدیک، نزدیک) پیروی می‌کند.

چنانچه در هیستوگرام شکل 7 مشاهده می‌شود، در آن دسته از نمونه‌هایی که در آن‌ها سیم‌های حافظه‌دار دارای پیش کرنش‌های برابر می‌باشد (دسته‌های 4تایی 4 تا 1، 5 تا 8، 9 تا 12 و 13 تا 16 که با طرح‌های متفاوت در نمودار نشان داده شده است)، مقادیر میانگین جذب انرژی نشان‌دهنده این است که نمونه‌های دارای الیاف با زاویه  $\pm 45^\circ$  بیشترین میزان جذب انرژی ضربه را دارند (نمونه‌های شماره 3، 7 و 15). برای بررسی دلیل این مشاهده باید در نظر گرفته شود که اعمال ضربه باعث ایجاد خمش

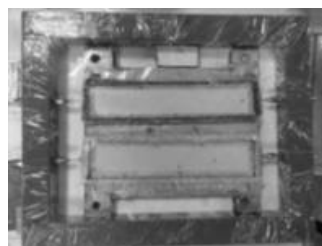
طبق طرح آزمایش مطرح شده در جدول شماره 2 پس از اینکه مراحل لایه‌گذاری به لایه قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار رسید، قالب پیش کرنش‌دهنده سیم‌های حافظه‌دار (که سیم‌ها از قبل در آن قالب جا زده شده و به میزان پیش‌کرنش مورد نظر رسیده بود) بر روی قالب پرس قرار گرفت و سپس ادامه روند لایه‌گذاری انجام شد (شکل شماره 4).

در آخر فک بالایی قالب بسته شده و چندلایه به مدت 1 روز تحت پرس در دمای محیط پخته شدند. پس از 1 روز چندلایه از داخل قالب پرس بیرون آورده شد. با گذشت 1 هفته از اتمام مراحل لایه‌گذاری چندلایه، پخت رزین کامل شد. برای تکمیل مراحل پایانی ساخت نمونه‌های ضربه شاریبی، حاشیه‌های اضافی چندلایه با استفاده از اره گردبر بریده شد و نمونه‌های با ابعاد استاندارد ساخته شدند (شکل‌های شماره 5-الف و 5-ب). شکل‌های شماره 6-الف و 6-ب نشان دهنده فاصله محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار نسبت به صفحه مجاور ضربه‌زننده می‌باشد.



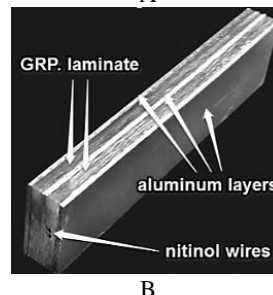
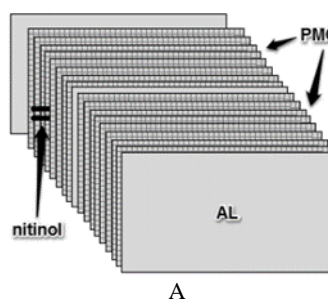
**Fig. 3** Aluminum layers and fixing needles

شکل 3 لایه آلومینیومی و سوزن‌های تعبیه شده در اطراف آن



**Fig 4.** Wovens fibers Layup and imbedding prestrained SMA. wires

شکل 4 لایه‌گذاری الیاف و سیم حافظه‌دار پیش‌کرنش شده در روی قالب پرس



**Fig 5 A.** Specimen layers extended model **B.** Final specimen

شکل 5 الف- شمای گسترده لایه‌ها در نمونه‌های چندلایه فلز-الیاف ب- نمونه نهایی

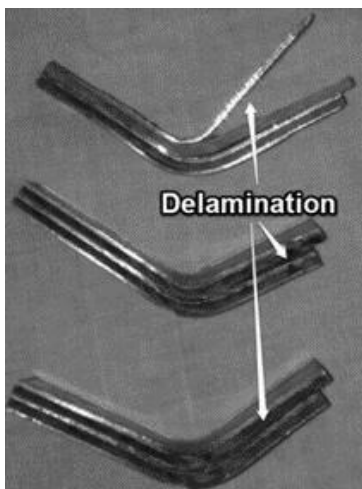


Fig. 8 Layers delamination style in treatments no. 3 and 7

شکل 8 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شماره 3 و 7

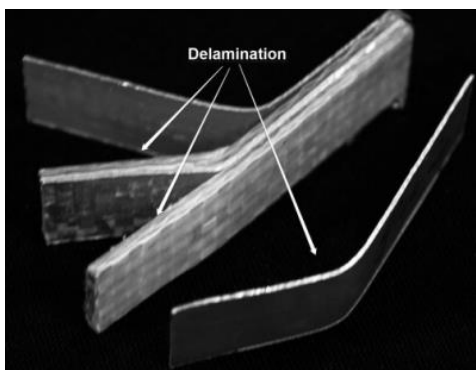


Fig. 9 Layers delamination style in treatments no. 1 and 5

شکل 9 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شماره 1 و 5

بررسی بیشتر روی نمونه‌ها نشان‌دهنده تغییرات ناچیز در مساحت جدایش بین نمونه‌های شماره 2 و 4 و نمونه‌های شماره 6 و 8 می‌باشد. این دسته از نمونه‌ها با زوایای الیاف تار 30 و 60 ساخته شده‌اند و به دلیل اینکه الیاف استفاده شده دارای تار و پود عمود بر هم می‌باشند، این نمونه‌ها از نظر زاویه الیاف باهم تفاوت ندارند، چرا که پودهای نمونه دارای الیاف تار 30 درجه در نقش تارهای نمونه دارای پودهای 60 درجه هستند و برعکس. لذا در هر دسته نمونه‌های دارای الیاف تار با زوایای 30 و 60 درجه فقط از نظر محل قرارگیری سیم‌ها باهم تفاوت دارند.

چنانچه در شکل شماره 11 مشاهده شد که در نمونه‌های با زاویه 30 درجه که در آن‌ها سیم‌های حافظه‌دار در نزدیک‌ترین فاصله به ضربه زنده قرار دارد، جدایش لایه‌ها به طوری است که تنها بخشی از لایه آلومینیومی وسطی به کامپوزیت بخش پشت متصل می‌ماند و بقیه لایه‌ها به‌طور کامل از هم جدا شده‌اند، دلیل این اتفاق می‌تواند به خاطر گسیختگی ایجاد شده به‌واسطه تعبیه سیم حافظه‌دار در بخش کامپوزیت جلویی چندلایه باشد. در نمونه‌های مشابه که در آن‌ها سیم حافظه‌دار در بخش پشتی کامپوزیت قرار دارد نیز شرایط تخریب به شکل مشابه می‌باشد، با این تفاوت که تمام لایه‌های آن به‌طور کامل از هم جدا شدند.

در چندلایه می‌شود و پیرو این تنش خمشی، تنش برشی نیز درون چندلایه ایجاد خواهد شد.

با توجه به اینکه مقدار تنش برشی در روی خط 45 درجه بیشینه است، چندلایه‌ای که در این راستا تقویت شده باشد می‌تواند مقاومت بالایی از خود نشان دهد. به همین دلیل نمونه‌هایی که دارای الیاف تار 45 درجه می‌باشد، انرژی ضربه را بیشتر تحمل می‌کنند. با این وجود نمونه شماره 11 که در دسته نمونه‌های دارای پیش‌گرنش 2 درصد قرار دارد میزان جذب انرژی کمتری را در این دسته از خود نشان می‌دهد. داریوشی و همکاران [10] نیز در آزمایش‌ها خود دریافتند که وجود الیاف 45 درجه در بخش پشتی چندلایه باعث افزایش جذب انرژی ضربه شاری می‌شوند. همانطور که در شکل شماره 8 نیز مشاهده می‌شود، در دسته‌های شماره 1 و 2 که شامل نمونه‌های 1 تا 8 هستند، چندلایه‌های شماره 3 و 7 کمترین جدایش بین لایه‌ها کامپوزیت و آلومینیوم را دارا می‌باشند، این نمونه‌ها دارای زاویه الیاف تار 45 درجه هستند. نمودار شکل 7 نشان‌دهنده کمینه بودن میانگین جذب انرژی در نمونه‌های شماره 1 و 5 (اولین نمونه از دسته‌های اول و دوم) می‌باشد. این نمونه‌ها دارای الیاف تار با زاویه 0 درجه هستند. مشاهدات نشان داد که وجود الیاف با زاویه تار 0 درجه باعث جدایش لایه‌های پشتی چندلایه می‌شود. این مسئله به وضوح در نمونه نشان داده شده در شکل شماره 9 که دارای زاویه الیاف تار 0 درجه می‌باشد مشاهده می‌شود. از آنجایی که در نمونه‌های با زاویه تار 0 درجه، پودها دارای زاویه 90 درجه می‌باشند، وجود این پودها باعث جدایش سریع لایه‌های پشتی خود خواهد شد چراکه این الیاف بار ضربه را تحمل نکرده و انرژی ضربه را بیشتر انتقال می‌دهند و این انرژی صرف غلبه بر چسبندگی بین لایه‌ها می‌شود. این در حالی است که در حرکت رفت و برگشتی موج ضربه در داخل این دسته از نمونه‌ها، موج ضربه در لایه وسطی تشدید شده و جدایش قسمتی از آلومینیوم وسطی از کامپوزیت بخش پشتی چندلایه کاملاً مشهود می‌باشد.

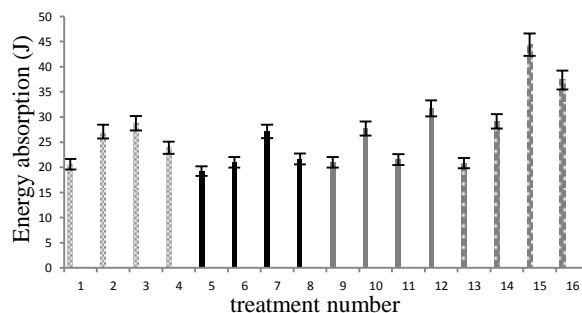


Fig. 7 Diagram showing the means of impact energy absorption of the treatments

شکل 7 نمودار میانگین جذب انرژی نمونه‌ها بر حسب شماره نمونه

از روی نمودار شکل شماره 7 مشخص است که استفاده از الیاف 2 جهت با زاویه تار 0 و پود 90 درجه باعث کمترین میزان جذب انرژی در بین چندلایه‌های تمام دسته‌ها می‌شود. چراکه الیاف 90 درجه موجود در ساختار آنها باری را تحمل نمی‌کنند. تحمل نکردن بار ضربه توسط این الیاف باعث شکستن الیاف دارای زاویه 0 درجه شده و بنابراین در این دسته از نمونه‌ها شکست الیاف، مود غالب تخریب می‌باشد (شکل شماره 10).

هرچند که روند کلی نتایج مربوط مقدار جذب انرژی با شیب کم صعودی است ولی در نمونه‌های دارای الیاف  $30^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  (نمونه‌های شماره 2 و 4 و 6 و 8 و 10 و 12) تغییرات بسیار اندک می‌باشد.

مقادیر جذب انرژی این دسته از گلرها از میزان جذب انرژی نمونه‌های دارای الیاف با زاویه تار 45 درجه کمتر است ولیکن این مقادیر از گلرهای دارای زاویه الیاف تار 90 درجه بیشتر می‌باشد. دلیل این مشاهده این است که در نمونه‌های دارای زاویه الیاف تار یا پود 30 درجه، طول تصویر کل تارها و پودها بر خط 45 درجه بیشتر از نمونه‌هایی است که با الیاف تار 0 درجه ساخته شده‌اند، همچنین در این دسته از نمونه‌ها مجموع طول تصویر الیاف تار و پود بر زاویه 0 درجه (الیاف در این راستا بار ضربه را تحمل می‌کنند) بیشتر از الیاف 0 و 90 درجه می‌باشد. بنابراین این دسته از الیاف هم در برابر تنش برشی مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند هم در برابر خود ضربه‌زننده مقاومت می‌کنند.

جدایش لایه‌ها در دسته‌های سوم و چهارم نمودار شکل 7 از الگوی متفاوت پیروی می‌کند. چنانچه گفته شد در این 2 دسته از نمونه‌ها میزان پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب 2 درصد و 3 درصد می‌باشد و در هر دسته، زوایای الیاف تار نمونه‌ها به ترتیب مقادیر 0، 30، 45 و 60 درجه را شامل می‌شوند. تفاوت در محل قرارگیری سیم‌ها نیز در هر کدام از این 2 دسته به ترتیب بر طبق الگوی (دور، دور، نزدیک، نزدیک) می‌باشد. مشاهده می‌شود که نمونه‌های شماره 9 و 13 که دارای الیاف زاویه تار 0 درجه هستند، کمترین میزان جذب انرژی ضربه را در دسته مربوط به خود دارند. همچنین این چندلایه‌ها بیشترین میزان تخریب را در دسته خود نشان دادند. دلیل این مشاهده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در این نمونه‌ها پودهای دارای زاویه 90 درجه ضربه را تحمل نکرده و در آن‌ها بخش زیادی از انرژی ضربه صرف جدایش لایه‌ها می‌شود. در این دسته از نمونه‌ها برعکس نمونه‌های دارای الیاف تار با زاویه 0 درجه 2 دسته قبلی، آلومینیوم بخش جلویی به‌طور کامل جدا شده و نیمی از آلومینیوم بخش وسط نیز جدا شده است. جدا شدن آلومینیوم جلویی نشان از بازگرداندن امواج ضربه توسط این نمونه‌ها است (شکل شماره 12).

در دسته شماره 3، با وجود اینکه الیاف نمونه‌های شماره 10 و 12 زاویه برابر 30 درجه دارند و میزان پیش کرنش آن‌ها نیز برابر است ولی به دلیل تغییر در محل قرارگیری سیم حافظه‌دار مود تخریب لایه‌ها در آن‌ها تفاوت زیادی دارد (شکل‌های 12 و 13). نمونه‌ای که در آن‌ها سیم حافظه‌دار در سطح اول (نزدیک به ضربه‌زننده) قرار دارد، مساحت جدایش کمتری را از خود نشان داده است. در تمام تکرارهای این نمونه بازگشت موج ضربه به آلومینیوم لایه جلوی سیم حافظه‌دار مشهود است و مشاهده می‌شود قسمتی از لایه آلومینیومی میانی از کامپوزیت بخش پشتی نیز جدا شده است (شکل شماره 13).

این مشاهده را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با توجه به اینکه با افزایش در پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار سفتی قطعه افزایش می‌یابد، بنابراین سرعت امواج نیز در داخل ماده افزایش پیدا خواهد کرد، لذا تأثیر وجود سیم حافظه‌دار بر روی جذب انرژی چندلایه افزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که سیم حافظه‌دار در نزدیکی ضربه‌زننده قرار می‌گیرد، پالس‌های اولیه انرژی ضربه (که پرا انرژی‌ترین پالس‌های ضربه هستند) را زودتر از لایه‌های پشتی حس کرده و در اثر رفت‌وآمد موج ضربه، حلقه هیستریزس موجود در آلیاژ حافظه‌دار فعال شده و انرژی ضربه را هدر می‌دهند، بنابراین امواجی با دامنه کمتر از ضربه به لایه‌های بخش پشتی خواهد رسید.

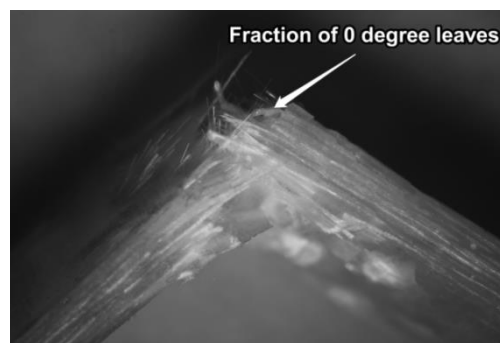


Fig. 10 90 degree fibers fractioning in treatments no. 1 and 5

شکل 10 شکستن الیاف 90 درجه در نمونه‌های شماره 1 و 5

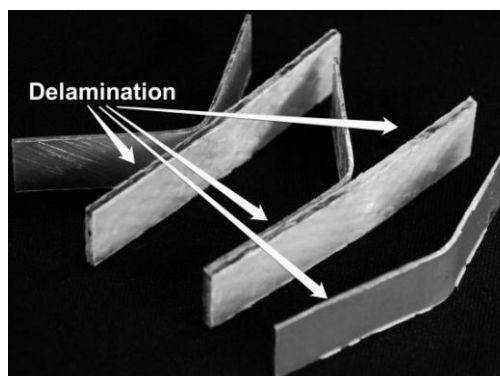


Fig. 11 Layers delamination style in treatments no. 2, 4, 6 and 8

شکل 11 نحوه تخریب و جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شماره 2، 4، 6 و 8

از روی نمودار شکل 7 مشاهده می‌شود که میانگین جذب انرژی در نمونه‌هایی که دارای الیاف با زاویه‌های تار  $30^{\circ}$  و  $60^{\circ}$  هستند نیز نزدیک به هم هستند و تفاوت اندک میزان جذب انرژی در این چندلایه‌ها به خاطر تغییر در محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در این چندلایه‌ها می‌باشد. با اختلاف اندکی چندلایه‌های با الیاف 30 درجه‌ای که در آن‌ها سیم‌ها در نزدیکی ضربه‌زننده قرار دارند مقدار جذب انرژی بالاتری را نسبت به آن‌ها که سیم‌های تعبیه‌شده در آن‌ها در فاصله دور از ضربه‌زننده هستند، از خود نشان می‌دهند. این تفاوت در نمونه‌های 30 درجه و 60 درجه دسته شماره 4 مشهودتر است. دلیل این مشاهده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که وجود سیم در فاصله‌ای نزدیک به ضربه‌زننده می‌تواند باعث فعال شدن حلقه هیستریزس آن شود و انرژی اولیه را جذب کند بنابراین سرعت ضربه‌زننده کاهش یافته و ادامه روند ضربه با نرخ کرنش پایین‌تر انجام خواهد گرفت. همچنین جذب اولیه انرژی ضربه‌زننده توسط سیم حافظه‌دار می‌تواند باعث شود که پالس‌های بعدی انرژی ضربه‌زننده که از انرژی کمتری برخوردار هستند برای غلبه بر چسبندگی بین لایه‌ها هدر شود و برخلاف چندلایه‌هایی که سیم‌های آن‌ها در فاصله دوری از ضربه‌زننده قرار دارد و پس از دریافت اولین پالس‌های ضربه لایه‌های آنها از هم جدا شدند و افت مقاومت در برابر ضربه پیدا کردند، انرژی بیشتری را از ضربه‌زننده جذب نمایند. سان و همکاران [11] نیز در پژوهش خود دریافتند که در چندلایه‌هایی که میانگین فاصله‌های سیم‌های حافظه‌دار از ضربه‌زننده کمینه باشد میزان جذب انرژی ضربه سرعت‌پایین بیشینه خواهد بود. با توجه به نمودار شکل 7 مشاهده می‌شود که با افزایش پیش‌کرنش سیم‌ها از مقدار 0 درصد تا مقدار 2 درصد،



تعدادی موج در حرکت بوده‌اند که دامنه آنها کم بوده است، ولی این امواج باعث تشدید همدیگر شده‌اند لذا چنانچه در شکل 15 نیز مشاهده می‌شود حرکت تک تک این امواج باعث جدایش لایه آلومینیومی از لایه کامپوزیتی نشده است ولی این امواج باعث تقویت یکدیگر در 1 نقطه شده‌اند بنابراین در این نقطه لایه آلومینیوم تنش بسیار زیادی را تحمل کرده و در آخر از هم گسیخته شده است.

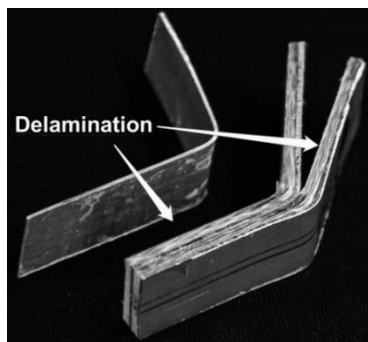


Fig. 12 Layers delamination style in treatments no. 9 and 13

شکل 12 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شماره 9 و 13

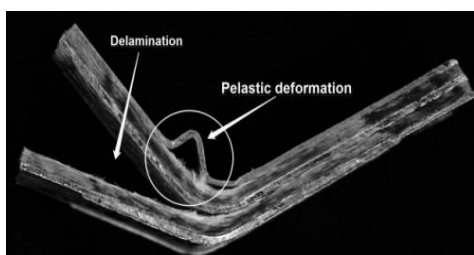


Fig. 13 Layers delamination style in treatment no. 12

شکل 13 جدایش لایه‌ها در نمونه شماره 12

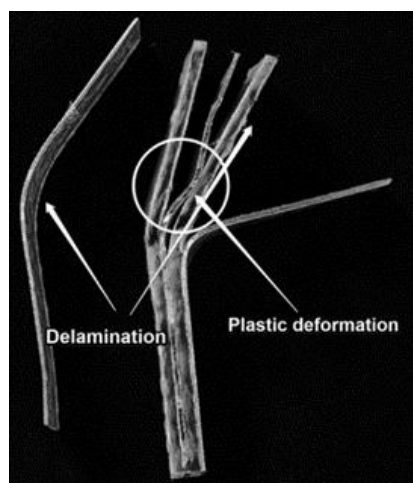


Fig. 14 Layers delamination style in treatment no. 10

شکل 14 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه شماره 10

در اینجا نیز مانند نتیجه‌ای که در بررسی تیمار قبلی گرفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار به مقدار 3 درصد، یا دامنه امواج حاصل از ضربه بیشتر شده است یا سرعت حرکت امواج تغییر کرده است. به طوری که امواج در حال حرکت در آلومینیوم یا کامپوزیت یا هر

این مشاهده را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با توجه به اینکه با افزایش در پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار سفتی قطعه افزایش می‌یابد، بنابراین سرعت امواج نیز در داخل ماده افزایش پیدا خواهد کرد، لذا تأثیر وجود سیم حافظه‌دار بر روی جذب انرژی چندلایه افزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که سیم حافظه‌دار در نزدیکی ضربه زنده قرار می‌گیرد، پالس‌های اولیه انرژی ضربه (که پرنرژی‌ترین پالس‌های ضربه هستند) را زودتر از لایه‌های پشتی حس کرده و در اثر رفت‌وآمد موج ضربه، حلقه هیستریزس موجود در آلیاژ حافظه‌دار فعال شده و انرژی ضربه را هدر می‌دهند، بنابراین امواجی با دامنه کمتر از ضربه به لایه‌های بخش پشتی خواهد رسید. با افزایش پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار از 1 درصد به 2 درصد در تمامی نمونه‌های دارای زاویه الیاف 30 درجه و 60 درجه موج ضربه قابل رؤیت است، به نظر می‌رسد که با افزایش میزان پیش‌کرنش به مقدار 2 درصد فرکانس امواجی که در سیم حافظه‌دار در حال حرکت هستند با فرکانس امواجی که در آلومینیوم و کامپوزیت در حال آمد و شد هستند تداخل می‌کند و این تداخل باعث تشدید موج ضربه شده که اثر آن به شکل اعوجاج بر روی لایه آلومینیوم چندلایه مشاهده می‌شود.

در نمونه شماره 11 که در آن زاویه الیاف 45 درجه می‌باشد و سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 2 درصد در سطح نزدیک به ضربه زنده قرار دارد نیز مشاهده می‌شود که جدایش لایه‌ها به‌طور ناقص اتفاق می‌افتد و امواج ضربه به‌صورت نامتقارن روی آلومینیوم لایه جلویی دیده می‌شود بررسی آلومینیوم لایه پشتی نشان از فشردگی عرضی این لایه دارد و لایه پشتی تحت تغییر شکل پلاستیک عرضی قرار گرفته و مقداری از کامپوزیت لایه پشتی جدا شده است (شکل شماره 15)

نمونه‌های شماره 14 و 16 که دارای زوایای الیاف برابر 30 درجه و 60 درجه هستند و پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار تعبیه شده در آن‌ها 3 درصد می‌باشد رفتار مشابه رفتار نمونه‌های 10 و 12 دسته قبل، ولی با شدتی بیشتر از خود نشان دادند. در تکرارهای نمونه شماره 14 که در آن‌ها سیم‌های حافظه‌دار در دورترین فاصله از ضربه زنده قرار داشت، لایه پشتی به‌طور کامل جدا شد. بازگشت موج ضربه در روی آلومینیوم صفحه میانی این نمونه به‌خوبی مشهود می‌باشد (شکل شماره 16). در مقایسه شکل موج ایجاد شده در این نمونه با نمونه شماره 10 مشاهده می‌شود که موج ضربه شکلی واضح‌تر دارد بنابراین در این نمونه افزایش پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار یا باعث افزایش دامنه موج بازگشتی شده است یا باعث تغییر در سرعت حرکت امواج شده است به طوری که امواج در حال حرکت در آلومینیوم و کامپوزیت و سیم حافظه‌دار باهم تداخل کرده و شکل موجی واضح روی صفحه میانی ایجاد می‌کند.

در لایه‌های تکرارهای نمونه شماره 16 که دارای زاویه الیاف 30 درجه بوده و سیم‌های حافظه‌دار آن با مقدار پیش‌کرنش 3 درصد و در سطح نزدیک به ضربه زنده قرار دارد، مشاهده شد که سطح جدایش لایه‌ها کمترین مقدار را دارد. زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم تعبیه شده در داخل این نمونه دقیقاً مشابه نمونه شماره 14 می‌باشد. تغییر شکل ایجاد شده در این نمونه نیز مشابه شکل تخریب ایجاد شده در نمونه شماره 12 است، با این تفاوت که قدرت موج بازگشتی موجب پارگی آلومینیوم جلویی شده است.

چنانچه در شکل شماره 17 مشاهده می‌شود، جدایش لایه‌ها در این نمونه فقط در محل تشدید موج پدید آمده است. از اینکه جدایش در لایه اول به طور کامل اتفاق نیفتاده است میتوان اینطور نتیجه گرفت که در این نمونه

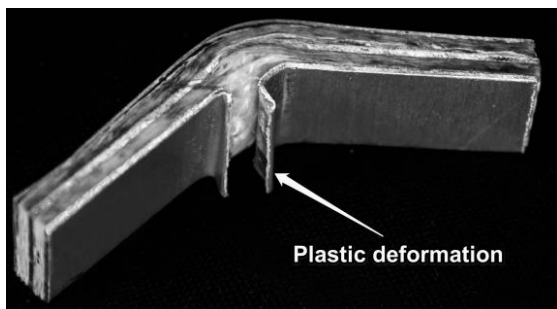


Fig. 17 Layers delamination style in treatment no. 16

شکل 17 جدایش لایه‌ها در تیمار شماره 16

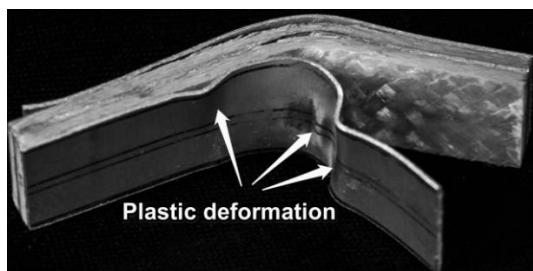


Fig. 18 Layers delamination style in treatment no. 15

شکل 18 نحوه جدایش لایه‌ها در تکرارهای تیمار 15

4-1- میزان تأثیر پارامترهای مؤثر در تغییرات میانگین میزان جذب انرژی برای بررسی میزان تأثیر پارامترهای مؤثر در جذب انرژی چندلایه با استفاده از روش تحلیل تاگوچی که به وسیله نرم افزار مینی‌ت‌ب انجام گرفت، نمودار سیگنال به نویز برای پارامترهای مورد بررسی استخراج شد. برای استخراج این نمودارها، مشخصه کیفیت "هرچه بیشتر، بهتر" در نظر گرفته شد. 3 نمودار نشان داده شده در شکل 19، نمودارهای سیگنال به نویز هستند که 3 پارامتر مقدار پیش‌کرنش، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌حافظه‌دار در چندلایه را به مقدار جذب انرژی گلره تقویت شده با 2 رشته سیم‌حافظه‌دار مرتبط می‌کند. چنانچه از نمودارهای شکل 19 پیداست تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش و زاویه الیاف نسبت به محل قرارگیری سیم‌حافظه‌دار تأثیر بیشتری در تغییرات میزان جذب انرژی ضربه شاری چندلایه دارد. با توجه به اینکه هرچه میزان سیگنال به نویز بیشتر باشد، آنگاه نتیجه موردنظر مطلوب‌تر است، نمودارهای سیگنال به نویز شکل 19 نشان می‌دهند که نمونه بهینه برای جذب بیشتر انرژی ضربه شاری، چندلایه‌ای است که در آن زاویه الیاف  $\pm 45^\circ$  درجه و میزان پیش‌کرنش تقویت‌کننده حافظه‌دار 3 درصد باشد و سیم‌های حافظه‌دار در بین لایه‌های 5 و 6 قرار گیرند. خوشبختانه از بین 32 حالت ممکن برای ساخت کلیه نمونه‌ها، نمونه بهینه مذکور در بین نمونه‌های طراحی شده توسط روش تاگوچی قرار دارد و مشاهده می‌شود که این نمونه با میانگین جذب انرژی  $J 44.367$  بیشترین جذب انرژی را از بین 16 نمونه آزمایش شده از خود نشان داده است. مقدار جذب انرژی نمونه‌ای با این مشخصات با استفاده از آنالیزهای آماری تاگوچی قابل پیش‌بینی است. با استفاده از پیش‌بینی تاگوچی مقدار جذب انرژی میانگین برای نمونه که بهینه‌ترین حالت از بین حالت‌های ممکن با استفاده از سطوح مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد،  $J 38.8667$  پیش‌بینی شد. اگرچه مقدار پیش‌بینی شده

2 با امواج متحرک در سیم حافظه‌دار تداخل کرده و باعث تشدید موج ضربه شده است که این موج تشدید شده باعث گسیختگی آلومینیوم شده است. تیمار شماره 15 که دارای زاویه الیاف 45 درجه بوده و در آن سیم‌های حافظه‌دار 3 درصد پیش‌کرنش شده در سطح نزدیک نسبت به ضربه زنده تعبیه شده است، در شکل شماره 18 مشاهده می‌شود. این تیمار بیشترین جذب انرژی ضربه را از خود نشان داد. در این نمونه 3 اعوجاج مبهم از امواج ضربه مشاهده شد و در هر 2 طرف خط ضربه بر روی تکرارهای این تیمار اثر موج دیده می‌شود به طوری که در 1 طرف از خط اعمال ضربه 2 قله موج نزدیک به هم وجود دارد و در طرف دیگر 1 قله موج قابل رویت است. در این دسته از نمونه‌ها نیز قسمتی از لایه آلومینیوم میانی از کامپوزیت بخش پشتی جدا شده است. در امتداد خط ضربه سطح اندکی از لایه آلومینیوم میانی و آلومینیوم پشتی نیز از کامپوزیت بخش جلویی جدا شده است.

با توجه به نتایج حاصل از جذب انرژی ضربه شاری بر روی نمونه‌های دارای سیم حافظه‌دار، با افزایش میزان پیش‌کرنش سیم‌ها، روندی صعودی در میزان جذب انرژی ضربه شاری در تیمارهای دارای زاویه الیاف  $\pm 45^\circ$  درجه مشاهده می‌شود. این مشاهده ناشی از افزایش مقاومت سیم حافظه‌دار بر اثر افزایش میزان پیش‌کرنش آن است. همچنین مقدار بیشینه جذب انرژی از بین میانگین‌های تمام تیمارهای آزموده شده در تیمار شماره 15 با میزان پیش‌کرنش 3 درصد و زاویه الیاف  $\pm 45^\circ$  اتفاق افتاد. رضانی پارسا و همکاران [17] نیز در بررسی‌های خود مشاهده کردند که با افزایش میزان پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار در چندلایه‌های گلره مقدار جذب انرژی ضربه افزایش می‌یابد.

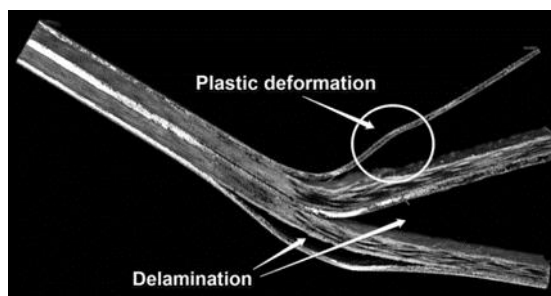


Fig. 15 Layers delamination style in treatment no.11

شکل 15 جدایش لایه‌ها در نمونه شماره 11

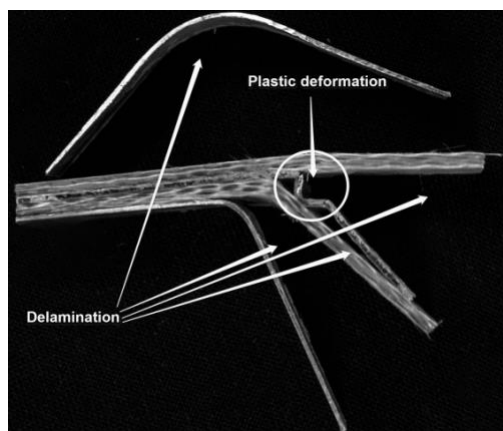


Fig. 16 Layers delamination style in treatment no.14

شکل 16 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه شماره 14

<sup>1</sup> Larger is better

92.91 معنی‌دار هستند. درحالی‌که تفاوت‌ها در جذب انرژی ضربه شاری برای پارامترهای زاویه قرارگیری الیاف در گلره و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب دارای سطوح اطمینان 90.6 درصد و 71 درصد می‌باشند. بنابراین به‌منظور استفاده از نتایج این تحقیق در صنعت، لازم است طراح این نکته را مورد توجه قرار دهد که میزان پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار و زاویه الیافی که چندلایه از آن ساخته می‌شود جزو پارامترهای مؤثر در جذب انرژی ضربه شاری می‌باشند. درحالی‌که اطمینان کمتری برای تأثیر محل قرارگیری سیم حافظه‌دار در چندلایه به منظور جذب انرژی ضربه شاری، وجود دارد. این پژوهش به بررسی اثر تغییرات در پارامترهای زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار که پارامترهای مؤثر در مقاومت به ضربه گلره تقویت شده با 2 رشته سیم حافظه‌دار می‌باشند، بر میزان جذب انرژی چندلایه در برابر ضربه شاری 200 J پرداخته است. از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌های این پژوهش استفاده گردید و نمونه‌های مورد بررسی بر اساس آرایه متعامد L16 ساخته شدند. در استفاده از این آرایه پارامترهای زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار در 4 سطح و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در 2 سطح تغییر می‌کردند. گلره‌های مورد بررسی از 19 لایه که حاوی 3 لایه آلومینیومی بودند، ساخته شدند.

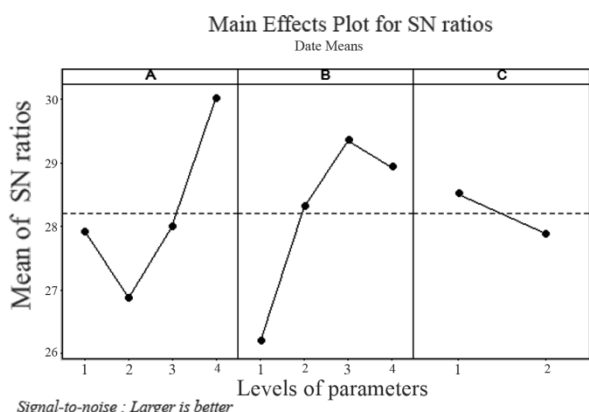


Fig. 19 Diagrams showing fiber metal laminates signal to noise ratio of investigated parameters in different levels

شکل 19 نمودارهای سیگنال به نویز برای سطوح پارامترهای درصد پیش‌کرنش، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در چندلایه

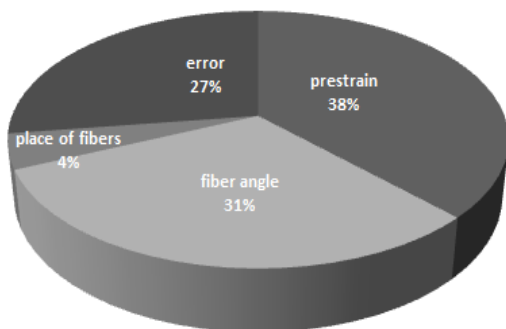


Fig. 20 The diagram of the efficacy percentage of experimented parameters and the error percentage on energy-absorption level of the laminate

شکل 20 نمودار درصد تاثیرگذاری پارامترهای آزمایش شده و خطا بر روی میزان

از مقدار آزمایش شده کمتر است، ولی مقدار آن همچنان از مقدار جذب انرژی سایر نمونه‌های آزمایش شده بزرگ‌تر است. اختلاف بین بزرگ‌ترین عدد سیگنال به نویز و کوچک‌ترین عدد حاصله، با پارامتر دلنا مشخص می‌شود. دلناهای مربوط به پارامترهای میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه قرارگیری الیاف در چندلایه و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در چندلایه به ترتیب مقادیر 10.68، 10.04 و 2.85 می‌باشند.

با تقسیم کردن دلنای مربوط به هر پارامتر به مجموع دلناها و مرتب‌سازی نتایج از بزرگ به کوچک ترتیب میزان مؤثر بودن تک‌تک پارامترها بر روی متغیر خروجی استخراج می‌شود. با این تفسیر تاثیرگذارترین پارامترها به ترتیب، میزان پیش‌کرنش سیم‌ها، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌ها درون چندلایه می‌باشند. برای پی بردن به درصد تاثیرگذاری پارامترها، روی داده‌های خروجی آنالیز واریانس با استفاده از مدل عمومی خطی<sup>1</sup> انجام گرفت. یکی از خروجی‌های این آنالیز مقادیر مجموع مربعات تعدیل یافته<sup>2</sup> واریانس می‌باشد. مجموع مربعات تعدیل یافته خطا نیز توسط نرم افزار مینی‌تب قابل استخراج می‌باشد. مقادیر مجموع مربعات برای پارامترهای میزان پیش‌کرنش، مقدار زاویه الیاف تار، محل قرارگیری سیم حافظه‌دار و خطا به ترتیب مقادیر 249.44، 229.55، 32.59 و 202.64 می‌باشد.

با تقسیم کردن مجموع مربعات اصلاح شده هر پارامتر به مجموع مربعات اصلاح شده کل (که از جمع کردن مجموع مربعات پارامترها و خطا به دست می‌آید) درصد تاثیر گذاری هر پارامتر حساب می‌شود. به این ترتیب درصد تاثیرگذاری پارامترهای پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم حافظه‌دار به ترتیب 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد می‌باشند. مقدار 28.37 درصد از تاثیر گذاری نیز برای خطا محاسبه گردید که ناشی از عوامل تاثیرگذاری می‌باشد که در این پژوهش بررسی نشده‌اند. لازم به ذکر است منظور از خطا صرفاً وجود اغتشاش در انجام آزمایش‌ها نبوده و قسمت اعظم خطا را پارامترهایی شامل می‌شود (پارامترهای دمای آزمایش، خطای دستگاه آزمایش، میزان بیشینه انرژی دستگاه آزمایش، درصد حجمی حباب‌های ایجاد شده در داخل چندلایه (در طی مراحل ساخت)، دمای پلیمریزاسیون رزین اپوکسی، تعداد تکرارهای آزمایش و...) که جز پارامترهای بررسی تحقیق نیستند (نمودار شکل 20).

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحلیل بر اساس آزمایش‌های انجام شده با 3 تکرار می‌توان گفت که میزان پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار با بیش از 39 درصد از تأثیرگذاری، بیشترین تأثیر را در جذب انرژی چندلایه گلره تقویت‌شده با 2 رشته سیم حافظه‌دار دارد و پس از این پارامتر، به ترتیب فاکتورهای زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار مؤثرترین فاکتورها در جذب انرژی ضربه شاری توسط گلره‌های تقویت شده با 2 رشته سیم حافظه‌دار می‌باشند. آنالیز تاگوچی نرم‌افزار مینی‌تب نیز با رتبه‌بندی فاکتورهای مؤثر همین نتیجه را نشان داد. پس از رتبه‌بندی تأثیر فاکتورها به‌منظور اطمینان از معنی‌دار بودن تفاوت‌های پاسخ‌های مرتبط با سطوح مختلف فاکتورها، از آنالیز واریانس با روش خطی عمومی استفاده شد.

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که تغییرات جذب انرژی ضربه در نمونه‌های با سطوح مختلف پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار در سطح اطمینان

<sup>1</sup> General linear model  
<sup>2</sup> Adjust SS.

## جذب انرژی چندلایه

برای بررسی میزان جذب انرژی ضربه شاری چندلایه نیز توسط تحلیل تاگوچی که بر روی داده‌های استخراجی انجام گرفت، مشخص شد که تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری این سیم‌ها در چندلایه به ترتیب به میزان 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد بر روی میزان جذب انرژی چندلایه تاثیرگذار می‌باشد. برای اطمینان از معنادار بودن تغییرات میزان جذب انرژی چندلایه با تغییرات تک تک پارامترها، روی داده‌های استخراجی، آنالیز واریانس انجام شد و مشخص شد که تغییرات میزان جذب انرژی برای پارامترهای مذکور دارای سطوح اطمینان به ترتیب 92.1 درصد، 90.6 درصد و 71 درصد می‌باشد.

## 5- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی اثر تغییرات پارامترهای زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار که پارامترهای موثر در مقاومت به ضربه گلره تقویت شده با دو رشته سیم‌حافظه‌دار می‌باشند، بر میزان جذب انرژی چندلایه و مساحت جدایش لایه‌های گلره در برابر ضربه شاری 200 ژول پرداخته است. از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌های این پژوهش استفاده گردید و نمونه‌های مورد بررسی بر اساس آرایه متعام L16 ساخته شدند. در استفاده از این آرایه پارامترهای زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار در 4 سطح و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در 2 سطح تغییر می‌کردند. گلره‌های مورد بررسی از 19 لایه که حاوی 3 لایه آلومینیومی بودند، ساخته شدند.

برای بررسی میزان جذب انرژی ضربه شاری چندلایه بر روی داده‌های استخراجی تحلیل تاگوچی انجام گرفت. مشخص شد که تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در چندلایه به ترتیب به میزان 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد بر روی میزان جذب انرژی چندلایه تاثیرگذار می‌باشند. برای مشخص شدن معنادار بودن تغییرات میزان جذب انرژی چندلایه با تغییرات تک تک پارامترهای مذکور، روی داده‌های استخراجی، آنالیز واریانس انجام شد و مشخص گردید که تغییرات میزان جذب انرژی برای پارامترهای مذکور دارای سطوح اطمینان به ترتیب 92.1 درصد، 90.6 درصد و 71 درصد می‌باشد.

همچنین نتیجه تست‌های تجربی این پژوهش نشان داد که به منظور استفاده از چندلایه گلره تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار بهترین حالت، در چندلایه‌ای اتفاق می‌افتد که در آن فاصله آلیاژ حافظه‌دار از ضربه‌زننده کمینه بوده و رشته‌های حافظه‌دار دارای بیشینه مقدار پیش‌کرنش خود باشند. همچنین زاویه الیاف آن 45 درجه نسبت به ضربه‌زننده باشد. از سوی دیگر وجود الیاف صفر درجه باعث ضعیف‌تر شدن چندلایه در برابر ضربه خواهد شد.

لازم به ذکر است که با افزایش میزان پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار میزان جذب انرژی چندلایه افزایش خواهد یافت. همچنین هرچند تغییر در محل قرارگیری سیم حافظه‌دار در چندلایه تاثیر زیادی بر روی میزان جذب انرژی چندلایه ندارد اما قراردادن سیم حافظه‌دار در نزدیکی ضربه‌زننده می‌تواند منجر به افزایش میزان جذب انرژی چندلایه شود.

## 6- منابع

- [1] AU, Al., "Prediction of Low-Velocity Impact Damage in Thin Circular Laminates" AIAA journal, Vol. 23, pp. 442-449, 1985.
- [2] Cantwell, W. and Morton, J., "The Impact Resistance of Composite Materials—A Review" Composites, Vol. 22, pp. 347-362, 1991.
- [3] Richardson, M. and Wisheart, M., "Review of Low-Velocity Impact Properties of Composite Materials" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 27, pp. 1123-1131, 1996.
- [4] Sadighi, M. Alderliesten, R. and Benedictus, R., "Impact Resistance of Fiber-Metal Laminates: A Review" International Journal of Impact Engineering, Vol. 49, pp. 77-90, 2012.
- [5] Ashenai, G. F. Malekzade, F. K. and Paknejad, R., "Response of Cantilever Fiber Metal Laminates (FML) Plates Using an Analytical-Numerical Method" Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, pp. 57-67, 2013.
- [6] Jaroslaw, B. Barbara, S. and Patryk, J., "The Comparison of Low Velocity Impact Resistance of Aluminum/Carbon and Glass Fiber Metal Laminates" Polymer Composites, Vol. 37, pp. 1056-1063, 2016.
- [7] Zhu, S. and Chai, G. B., "Low-Velocity Impact Response of Fibre-Metal Laminates—Experimental and Finite Element Analysis" Composites Science and Technology, Vol. 72, pp. 1793-1802, 2012.
- [8] Abdullah, M. and Cantwell, W., "The Impact Resistance of Polypropylene-based Fibre-Metal Laminates" Composites Science and Technology, Vol. 66, pp. 1682-1693, 2006.
- [9] Boroujerdy, M. S. Dariushi, S. and Sadighi, M., "Fiber Metal Laminates Under Low Velocity Impact: An Experimental/Analytical Approach" Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 24, pp. 69-78, 2011. (In Persian)
- [10] Sadighi, M. and Dariushi, S., "An Experimental Study on Impact Behavior of Fiber/Metal Laminates" Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 21, pp. 315-327, 2008. (In Persian)
- [11] Sun, M. Wang, Z. Yang, B. and Sun, X., "Experimental Investigation of GF/epoxy Laminates with Different SMAs Positions Subjected to Low-Velocity Impact" Composite Structures, Vol. 171, pp. 170-184, 2017.
- [12] Hu, D. Zhang, L. Wang, R. and Zhang, X., "Investigation on Low Velocity Impact Resistance of SMA Composite Material" In SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, pp. 97990Z-97990Z. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [13] Shen, C. Wu, Z. Gao, Z. Ma, X. Qiu, Sh. Liu, Y. and Sun, T., "Impact Protection Behavior of NiTi Shape Memory Alloy Wires" Materials Science and Engineering: A, Vol. 700, pp. 132-139, 2017.
- [14] Zhang, R.-x. Ni, Q. Masuda, A. Yamamura, T. and Iwamoto, M., "Vibration Characteristics of Laminated Composite Plates with Embedded Shape Memory Alloys" Composite Structures, Vol. 74, pp. 389-398, 2006.
- [15] Lau, K. T. Ling, H.Y. Zhou, L. M., "Low velocity Impact on Shape Memory Alloy Stitched Composite Plates" Smart Materials and Structures, Vol. 13, pp. 364-370, 2004.
- [16] Pappadà, S. Remetta, R. Toia, L. Coda, L. Fumagali, L. and Maffezzoli, A., "Embedding of Superelastic SMA Wires into Composite Structures: Evaluation of Impact Properties" Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 18, pp. 522-530, 2009.
- [17] Parsa, A. R. and Eslami-Farsani R., "Influence of Pre Strain Shape Memory Alloy Wire on Impact Properties of Smart Fibers Metal Composite" Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, pp. 322-330, 2017. (In Persian)
- [18] Ghasemi, Faramarz Ashenai, Lotfali Mozafari Vanani, and Ali Pourkamali Anaraki. "A Study on the Charpy Impact Response of the Cracked Aluminum Plates Repaired with FML Composite Patches." Journal of Failure Analysis and Prevention 16.4 (2016): 594-600.
- [19] Khalili, S. M. R. Mittal, R. K. Gharibi Kalibar. S., "A study of the mechanical properties of steel/aluminium/GRP laminates." Materials Science and Engineering: A 412.1 (2005): 137-140.



## بررسی تجربی و عددی سازه‌های ساندویچی با اتصال دو طرفه تحت بارگذاری استاتیکی

شیدخت رشیدداداش<sup>1</sup>، مجتبی صدیقی<sup>2</sup>، سهیل داریوشی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14977-13115، [s.dariushi@ippi.ac.ir](mailto:s.dariushi@ippi.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>دریافت: 96/7/24 پذیرش: 96/10/4</p> <p style="text-align: center;"><b>کلیدواژگان:</b> سازه ساندویچی اتصالات لانه زنبوری آزمون استاتیکی</p>	<p>سازه‌های ساندویچی به طور گسترده در صنایع مختلفی از جمله صنایع هوا فضا، کشتی سازی، ساخت ناوگان ریلی و غیره کاربرد دارند. این سازه‌ها عموماً در ابعاد محدود ساخته شده و با استفاده از اتصالات فلزی، چسب و یا پیچ به یکدیگر متصل می‌گردند. در مقاله حاضر، دو نوع اتصال فلزی با جنس یکسان و هندسه متفاوت بین سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیت اپوکسی- شیشه و هسته لانه زنبوری آلومینیومی در نظر گرفته شده است که این اتصالات با استفاده از رزین اپوکسی به سازه ساندویچی متصل گردیده‌اند. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمون‌های خمش سه نقطه بر روی تیر و خمش ورق بر روی نمونه‌ها انجام شدند. بعلاوه به منظور شبیه سازی رفتار سازه‌های ساندویچی دارای اتصال، مدل‌سازی نمونه‌ها با استفاده از یک نرم افزار بر پایه روش المان محدود صورت پذیرفت. با تکیه بر مقایسه نتایج عددی و تجربی، صحت گذاری نتایج شبیه سازی نرم افزاری انجام گرفت و تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از کار عددی با نتایج تجربی مشاهده گردید. سپس برای هر دو اتصال، تاثیر افزایش طول و ضخامت بر حداکثر نیرو و جذب انرژی از طریق تحلیل پارامتری با استفاده از مدل المان محدود بدست آمده، مورد بررسی قرار گرفت.</p>

## Experimental and numerical investigation of sandwich panels with bilateral connection under static loading

Shidokht Rashiddadash<sup>1</sup>, Mojtaba Sadighi<sup>1</sup>, Soheil Dariushi<sup>2\*</sup>

1- Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran.

2- Composite group, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14977-13115, Tehran, Iran, [s.dariushi@ippi.ac.ir](mailto:s.dariushi@ippi.ac.ir)

### Keywords

Sandwich panel  
Connection  
Honeycomb  
Static tests

### Abstract

Sandwich structures are used in applications that required a combination of high rigidity and low weight same as aerospace, marine and automotive. Large and/or complicated sandwich structures are often manufactured by connecting pre-fabricated sandwich panels by means of connections, adhesive or bolts. In present study, two types of metallic connections were used to join two sandwich panels with glass-epoxy face-sheets and aluminum honeycomb core. Connections have the same material and different geometries and were bonded to the sandwich structures using the same epoxy as used to manufacture the face-sheets. Two groups of specimens were made and tested under bending loading. Also, a finite element simulation using LS-DYNA were performed to predict the behavior of sandwich structures. A good compliance between numerical and experimental results was observed. The effects of increasing the length and the thickness of the connections on the maximum force and energy absorption were investigated to examine the influences of involved parameters on bending response of a sandwich plates.

### 1-مقدمه

در بین هسته‌های مختلف، هسته‌های لانه زنبوری به علت داشتن ظرفیت جذب انرژی بالا از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشند. همچنین در این هسته‌ها، با تغییر پارامترهای هندسی از قبیل ضخامت، ارتفاع، اندازه سلول و زاویه داخلی می‌توان خواص مختلفی بدست آورد [5]. سازه‌های ساندویچی بزرگ و یا پیچیده غالباً با ساخت سازه‌های ساندویچی از قبل ساخته‌شده و سپس اتصال آن‌ها به هم تولید می‌شوند. برای مثال، در کشتی‌های ساخته‌شده با اجزاء ساندویچی، دیوارها به تنه کشتی با این روش متصل می‌گردند. [6]

یک سازه ساندویچی متشکل است از دو رویه نازک، مستحکم و سفت که توسط یک هسته ضخیم و کم وزن از هم جدا شده‌اند. رویه‌ها با چسب به هسته چسبانده می‌شوند تا امکان انتقال بار بین اجزاء حاصل گردد. [1-3] در سال‌های اخیر استفاده از سازه‌های ساندویچی در صنایع مختلف به علت داشتن استحکام و سفتی نسبت به وزن کم، مقاومت خمشی بالا و بسیاری خواص دیگر مانند مقاومت به خوردگی و مقاومت به ضربه بالا افزایش یافته است. [4]

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Rashiddadash, S. sadighi, M. and Dariushi, S., "Experimental and numerical investigation of sandwich panels with bilateral connection under static loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 415-426, 2018.

تحلیلی استفاده شد و انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و عددی مشاهده گردید. سپس یک اینسرت دایره‌ای در یک پنل ساندویچی عرشه کشتی در نظر گرفته شد و مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. نیکلاس<sup>8</sup> روش پیدا کردن هندسه بهینه یک اتصال پنل به پنل در چیدمان طولی که با استفاده از نرم افزار انسیس انجام شد را ارائه داد [11]. پارامترهایی که مقادیر تا حد امکان پایین ضرایب تمرکز تنش هندسی در جرم و تغییرشکل‌های قابل قبول سازه را تضمین می‌کردند، پیدا شدند. با تحلیل نتایج بدست آمده، هندسه بهینه اتصال موردنظر ارائه شد.

همبزه، پین<sup>9</sup> رفتار شکست انواع مختلف اینسرت‌های گلدانی یا محفظه‌ای<sup>10</sup> و اتصالات گوشه را در سازه ساندویچی‌های با هسته لانه زنبوری نومکس مورد بررسی قرار دادند [12]. آزمون‌های بیرون کشیدن<sup>11</sup> روی اینسرت‌ها نشان داد که در ابتدا شکست برشی هسته اتفاق افتاد و پس از آن سلول‌های گلدانی تحت پارگی کششی دچار شکست شدند. تحت بارگذاری برش بیرون<sup>12</sup>، سلول‌های گلدانی و رویه بالایی در برش دچار شکست شدند و در این آزمون موقعیت اینسرت داخل ناحیه گلدانی تاثیر چشمگیری روی نتایج داشت ولی نوع اینسرت هیچ تاثیری نداشت. در هر دو آزمایش تنش-های شکست تحت تاثیر نوع بارگذاری بودند. رفتار شکست اتصالات گوشه تحت بارهای خمشی یا برشی در ابتدا با جدایش سطوح اتصال مربوطه بدست آمد. تحلیل المان محدود هم با نرم افزار ال اس داینا انجام شد و نتایج دو روش فوق انطباق خوبی با هم داشتند. سانگ و همکاران<sup>13</sup> یک مطالعه تجربی روی بارهای شکست برشی و کشش بیرون اتصالات ساندویچی‌های کامپوزیتی انجام دادند [13]. جهت ساخت نمونه‌ها از هسته لانه زنبوری نومکس و کامپوزیت کربن-اپوکسی استفاده شد. 80 نمونه که 16 نوع آن‌ها بسته به ارتفاع هسته، دانسیته هسته، ضخامت رویه، لقی اینسرت و جهت بارگذاری متفاوت بودند، مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که برای بارگذاری کشش بیرون گرچه بار شکست اتصال تحت تاثیر دانسیته و ارتفاع هسته است ولی آن‌ها شدیداً از ضخامت رویه‌ها تاثیر می‌پذیرند. اتصال‌هایی که در آن لقی قرار داده شده بود و آن لقی با مواد معدنی پر شده بود، بار شکست بیشتری را نسبت به حالتی که اینسرت بدون لقی نصب شده بود، نشان داد. در بارگذاری برشی، بارهای شکست اتصالات تحت تاثیر ضخامت رویه بود و خواص هسته نظیر ارتفاع و جهت هسته تاثیر ناچیزی روی بار شکست داشت. دملیو و همکاران<sup>14</sup> یک پروژه تجربی جهت تعیین رفتار استاتیکی و خستگی نمونه‌های ساخته شده از ورق‌های فولادی و سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی که با اتصالات مکانیکی یا کور به هم متصل شده بودند انجام دادند [14]. از داده‌های حاصل از آزمون استاتیکی و خستگی می‌توان ملاحظاتی جهت استفاده از سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی متصل شده با اتصال‌دهنده‌ها بدست آورد. عملیات مته‌زنی (که معمولاً بحرانی می‌باشد و نیازمند ابزار خاص و راه‌حل‌های فنی اصلاح شده است) احتمالاً به علت اثر محکم‌کنندگی چسب بین هسته و پوسته، کمتر از حد انتظار بحرانی بود. در آزمون‌های استاتیکی، اتصالات در بارگذاری برشی بهتر عمل کردند. پیرسازی پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی فقط تنزل جزئی ویژگی‌های مکانیکی اتصال را سبب شد. هم الیاف رویه‌ها و هم ضخامت هسته سازه ساندویچی روی

این اتصالات عموماً فلزی بوده و با استفاده از چسب و یا پیچ و یا هر دو به سازه ساندویچی متصل می‌شوند. برخی از مشکلات چسباندن قطعات فلزی و کامپوزیت‌ها به یکدیگر مربوط به اختلاف زیاد بین خواص مکانیکی این دو و ناهمسانگردی زیاد کامپوزیت‌ها می‌باشد. عدم تطابق سفتی<sup>1</sup> عموماً منجر به تمرکز تنش زیاد و اتصال ضعیف می‌شود. [7] در بخش زیر به برخی از کارهای انجام شده در این حوزه اشاره شده است:

تفتگارد، لیستروپ<sup>2</sup> چندین اتصال T-شکل بین سازه‌های ساندویچی که در کاربردهای نیروی دریایی استفاده می‌شوند را مورد بررسی قرار دادند [8]. در طرح موجود سازه‌ها توسط فیلر و لمینیت‌های خارجی که دارای ضخامت مشابه با لمینیت‌های رویه‌ها هستند، به هم متصل شده‌اند. همچنین، یک مدل‌سازی المان محدود و مقایسه تنش‌ها در شکل‌های مختلف اتصال T انجام شد.

سانو، گرنستد<sup>3</sup> دو نوع اتصال چسبی-پیچی و اتصال سوراخ‌دار همراه با تزریق<sup>4</sup> بین مقطعی از فولاد ضدزنگ از یک طرف و از طرف دیگر سازه ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته از جنس فوم را مورد بررسی قرار دادند [6]. نمونه‌های تیر شامل اتصال ساخته شد و تحت بارهای خمشی و برشی، مورد آزمایش قرار گرفتند. دو نوع تیر مرجع ساخته شد و مورد آزمون قرار گرفت: تیر ساندویچی کامپوزیتی و تیر مرجع فولادی. نتایج آزمون‌ها نشان داد هر دو نوع اتصال استحکام خوبی دارند و در هیچ کدام شکست اتصال اتفاق نیفتاد. خرابی همیشه دورتر از اتصال و در بخش کامپوزیتی تیر ساندویچی و عموماً در رویه تحت بار فشاری اتفاق می‌افتد.

بنیواوینچاکول و همکاران<sup>5</sup> تحلیل عددی و تجربی بر روی اینسرت‌های مورد استفاده در سازه‌های ساندویچی را انجام دادند [9]. در مورد سازه ساندویچی چرخ‌های هواپیما، نقطه اتصال با استفاده از یک تقویت موضعی که اینسرت نامیده می‌شود، ساخته می‌شود. این اینسرت با رزین ریخته شده در هسته نومکس ساخته می‌شود. آزمون‌های کشش به بیرون<sup>6</sup> به طور متناوب بر روی اینسرت انجام گرفته و جابجایی سه بعدی با روش‌های نوری اندازه‌گیری شده است. مدهای خرابی بالقوه (لایه‌لایه‌شدگی، شکست موضعی الیاف، جدایش هسته و پوسته، له‌شدگی هسته و کمناش برشی هسته) زیاد بودند. آزمایشات نشان داد برای بارهای کمتر اثرات غیرخطی و هیستریزس عمدتاً به علت کمناش برشی هسته است. سپس قانون خرابی مدول برشی روی یک مدل المان محدود غیر خطی انجام شد.

بوژه ولنایا و همکاران<sup>7</sup> اثرات خمشی موضعی را در مجاورت اینسرت‌های داخل ساندویچ پنل مورد بررسی قرار دادند [10]. این اثرات خمشی موضعی به علت افزایش تنش‌های خمشی در رویه‌های سازه ساندویچی و تنش‌های نرمال و برشی در هسته بوجود می‌آیند. یک مدل تحلیلی قبلاً توسعه یافته (مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین المللی سازه‌های ساندویچی 551 (2002) (ICSS-6)) برای حالت یک سازه ساندویچی با اینسرت‌های دایره‌ای با خواص الاستیک متفاوت با هسته اصلاح شد. تنش‌های موضعی ایجادشده در رویه‌ها و هسته به علت وجود اینسرت از طریق روابط تحلیلی ساده بیان می‌شوند. از روش المان محدود جهت اثبات کارآمد بودن مدل

<sup>8</sup> K Niklas

<sup>9</sup> S Heims, M Pein

<sup>10</sup> potted

<sup>11</sup> Pull out

<sup>12</sup> Shear out

<sup>13</sup> K-I Song, J-Y Choi, J-H Kweon, J-H Choi, K-S Kim

<sup>14</sup> G Demelio, K Genovese, C Pappalettere

<sup>1</sup> Stiffness mismatch

<sup>2</sup> H. Toftegaard, A. Lystrup

<sup>3</sup> J. Cao, J.L. Grenestedt

<sup>4</sup> co-infused perforated

<sup>5</sup> P. Bunyawanchakul, B. Castanie, J.-J. Barrau

<sup>6</sup> Pull out

<sup>7</sup> E Bozhvolnaya, A Lyckegaard, O.T Thomsen, V Skvortsov

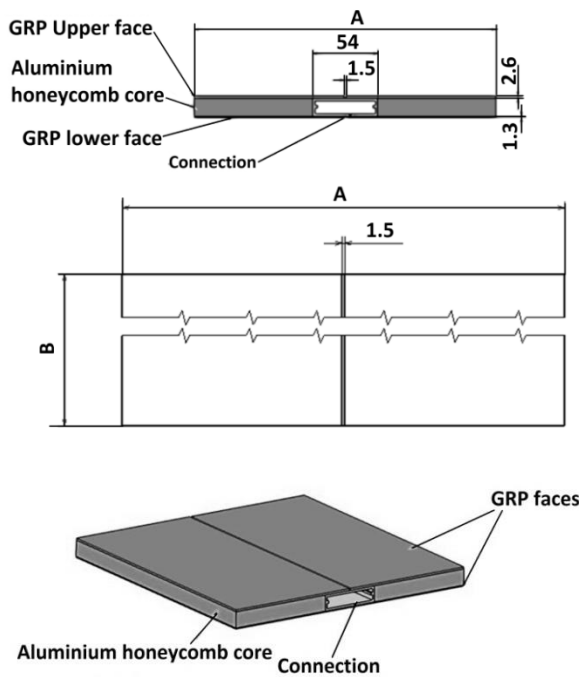


Fig. 2 Schematic Figure of connection type 2

شکل 2 شکل شماتیک نمونه با اتصال نوع دوم

## 2-2- ساخت نمونه‌ها

مواد مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها الیاف شیشه تک جهته (E-Glass, Axson, Epolam 2002 resin with Epolam 2002 hardener) و رزین اپوکسی (350 g/m<sup>2</sup>) (40 kg/m<sup>3</sup>) می‌باشد. در ابتدا رویه‌های ساندویچ‌پنل با روش تزریق در خلاء (VIP) ساخته شده و به ابعاد مناسب بریده شدند. سپس لانه زنبوری آلومینیومی به ابعاد مناسب برش داده شد و آلودگی‌های آن با استفاده از محلول هیدروکسید سدیم زدوده شد. به این ترتیب که 30 گرم هیدروکسید سدیم در 1 لیتر آب حل کرده و لانه زنبوری به مدت 5 دقیقه در این محلول قرار داده شد. به این عمل اصلاح سطح<sup>2</sup> گفته می‌شود. پس از اصلاح سطح لانه زنبوری‌ها ظرف مدت 24 ساعت باید عمل اتصال به رویه‌ها انجام شود تا اثر اصلاح سطح از بین نرود. اتصال رویه‌ها به هسته در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله اول رزین با استفاده از قلم‌مو، به رویه زیرین اعمال شد و لانه زنبوری در محل مناسب روی رویه زیرین قرار گرفت. یک وزنه 5 کیلوگرمی به شکل صفحه فلزی صاف به منظور ایجاد فشار بر روی سطح هسته قرار داده شد. پس از گذشت 12 ساعت و پخت رزین موجود بین رویه و هسته، رزین بر رویه بعدی اعمال شد و لانه زنبوری و بر روی آن قرار گرفت و دوباره وزنه روی کل مجموعه به مدت 12 ساعت قرار داده شد. سپس با داشتن هر یک از سازه‌های ساندویچی عملیات اتصال آن‌ها به هم با استفاده از پروفیل اتصال آلومینیومی انجام شد. برای این منظور ابتدا پروفیل آلومینیومی به روش گفته شده اصلاح سطح گردید و سپس رزین اپوکسی بر روی آن اعمال شد و دو سازه ساندویچی در محل‌های مناسب روی پروفیل قرار گرفت و بر روی مجموعه به مدت 24 ساعت وزنه 5 کیلوگرمی قرار داده شد. نمونه‌های نهایی در شکل 3 نشان داده شده است. در کل 12 نمونه ساخته شدند، 3 تیر با اتصال نوع اول، 3 تیر با اتصال نوع دوم، 3 ورق با اتصال نوع اول و 3 ورق با اتصال نوع دوم.

<sup>2</sup> Etching

استحکام خستگی اتصالات آزمون شده تاثیر داشت. دودکینز و همکاران<sup>1</sup> طراحی اتصالات در سازه‌های FRP کشتی را مورد بررسی قرار دادند و طرح‌های اتصالات پهنه‌شده که دارای استحکام بالاتر و با وزن کاهش یافته می‌باشند، را ارائه دادند [15].

در این پروژه دو نوع اتصال فلزی با هندسه‌های متفاوت جهت اتصال سازه‌های ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمون خمش بر روی نمونه‌های اتصال انجام شد و اتصال دارای استحکام بالاتر تعیین گردید. بعلاوه به منظور شبیه سازی رفتار سازه‌های ساندویچی دارای اتصال، مدلسازی نمونه‌ها با استفاده از یک نرم افزار بر پایه روش المان محدود صورت پذیرفت. با تکیه بر مقایسه نتایج عددی و تجربی، صحنه گذاری نتایج شبیه سازی نرم افزاری انجام گرفت و سپس برای هر دو اتصال، تاثیر افزایش طول و ضخامت بر حداکثر نیرو و جذب انرژی از طریق تحلیل پارامتری با استفاده از مدل المان محدود بدست آمده، مورد بررسی قرار گرفت.

## 2-تحلیل تجربی

### 1-2- شکل شماتیک اتصالات

در این پروژه دو نوع اتصال بین سازه‌های ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل شماتیک دو نوع اتصال در شکل 1 و شکل 2 نشان داده شده است. مشخصات هر یک از اجزاء سازه ساندویچی در جدول 1 قید گردیده است.

جدول 1 مشخصات هر یک از اجزاء سازه ساندویچی

Table 1 characteristic of each of the sandwich components

اجزاء	جنس
اتصالات	Al 6063 T5
رویه فوقانی	کامپوزیت رزین اپوکسی و الیاف شیشه UD 350 gr/m <sup>2</sup> با چیدمان [0/90/0/90/0/90/0] با ضخامت 2.6 mm
رویه تحتانی	کامپوزیت رزین اپوکسی و الیاف شیشه UD 350 gr/m <sup>2</sup> با چیدمان [0/90/0] با ضخامت 1.3 mm
هسته	لانه زنبوری آلومینیومی با ضخامت دیواره 0.05 mm و اندازه سلول 6 mm و ارتفاع 15 mm

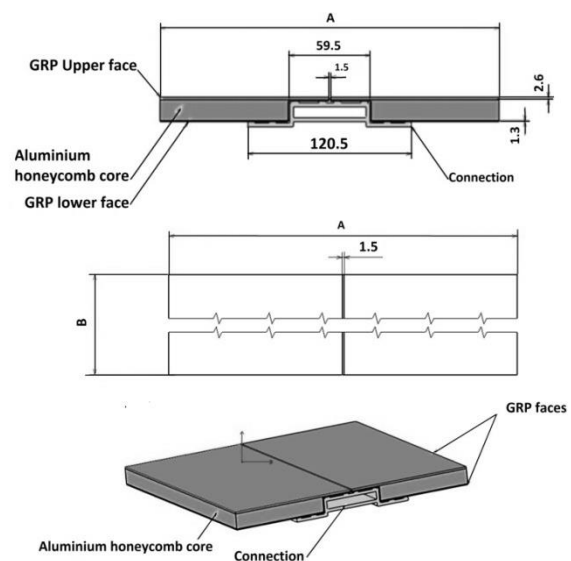
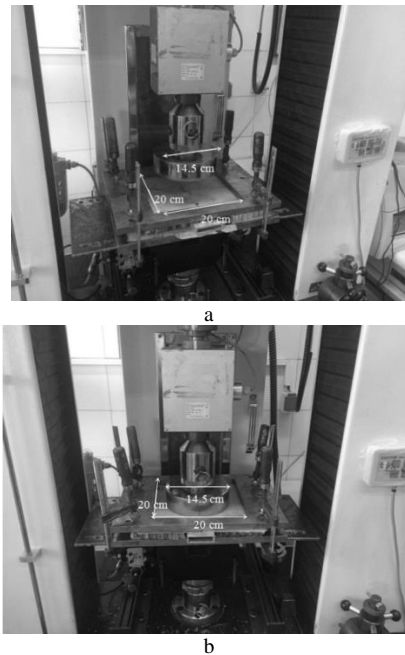


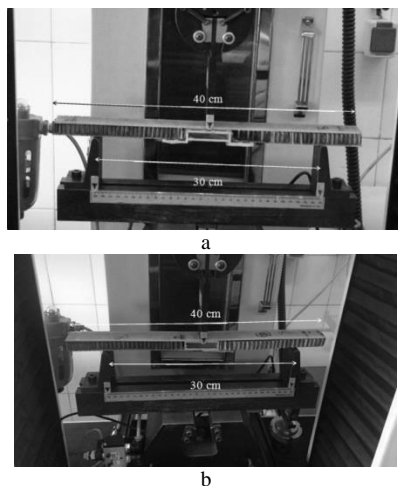
Fig. 1 Schematic Figure of connection type 1

شکل 1 شکل شماتیک نمونه با اتصال نوع اول

<sup>1</sup> A.R. Dodkins, R.A. Sheno, G.L. Hawkins



**Fig. 4** bending test on the plate- a) connection 1, b) connection 2  
 شکل 4 آزمون خمش بر روی ورق- (a) اتصال نوع اول، (b) اتصال نوع دوم

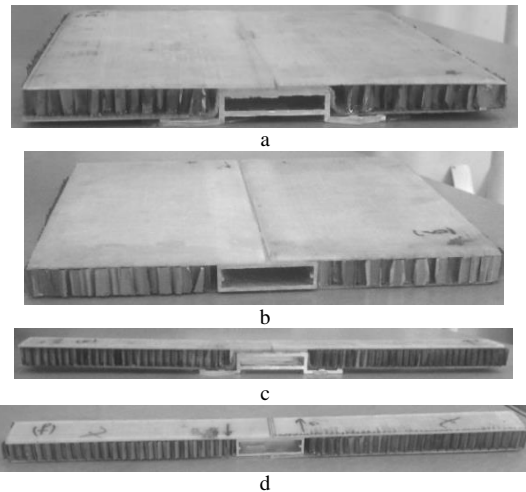


**Fig.5** Bending test on the plate- a) connection 1, b) connection 2  
 شکل 5 آزمون خمش بر روی ورق- (a) اتصال نوع اول، (b) اتصال نوع دوم

### 3-نتایج و بحث

نمودار نیرو- جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در شکل 6 نشان داده شده است، نمودار نیرو- جابجایی همانطور که در شکل 6 نشان داده شده است به 4 بخش می‌تواند تقسیم شود. بخش اول (I) غیرخطی است و مربوط به شروع تماس بین نمونه و سمبه (فک اعمال بار) می‌باشد. در بخش دوم (II) به علت کامپوزیت بودن رویه‌ها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می‌شود. بخش سوم (III) به علت شروع خرابی‌ها غیرخطی می‌باشد. بین بخش سوم و چهارم، افت ناگهانی نیرو مشاهده می‌شود که علت آن گسترش خرابی می‌باشد و در بخش چهارم (IV) سفتی نمونه به علت وجود خرابی‌های گسترده کاهش می‌یابد.

مدهای خرابی مشاهده شده، در شکل 7 نشان داده شده است و شامل گسیختگی رویه بالا، تغییر شکل پلاستیک اتصال و تغییر شکل برشی و کمانش لانه زنبوری می‌باشد.



**Fig. 3** specimens a) plate with connection type 1 b) plate with connection type 2 c) beam with connection type 1 d) beam with connection type 2

شکل 3 نمونه‌های نهایی- (a) ورق شامل اتصال نوع اول، (b) ورق شامل اتصال نوع دوم، (c) تیر شامل اتصال نوع اول، (d) تیر شامل اتصال نوع دوم

### 2-3-آزمون‌های تجربی

در این تحقیق دو نوع آزمون بر روی هر یک از دو اتصال انجام شد. این آزمون‌ها به قرار زیر می‌باشند:

آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر با ابعاد  $40 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$   
 آزمون خمش ورق بر روی ورق با ابعاد  $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$   
 تمامی آزمون‌ها در دمای اتاق ( $25^\circ\text{C}$ ) و رطوبت نسبی محیط (65%) انجام شدند. دستگاه مورد استفاده، دستگاه آزمون کشش سنتام (STM-150) با ظرفیت 15 تن می‌باشد.

### 2-3-1- آزمون خمش بر روی ورق‌های با ابعاد $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$

برای آزمون خمش ورق‌ها، نمونه آزمون بین دو فیکسچر فلزی به شکل قاب (هم از بالا و هم از پایین) قرار داده شد به طوریکه فقط  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  آن تحت بار قرار گرفت و نمونه آزمون و این صفحات توسط شش گیره به هم محکم شدند.

سمبه دارای قطر 145 mm در این آزمون استفاده شد به منظور اینکه تمامی اجزاء (اتصال، لانه زنبوری و رویه‌ها) در پاسخ شرکت نمایند. آزمون‌ها به صورت شبه‌استاتیک انجام شدند تا بار خرابی نهایی حاصل گردد. خرابی زمانی است که نمونه نتواند افزایش بیشتر در بار را تحمل نماید. لازم به ذکر است که سرعت انجام آزمون  $5 \text{ mm/min}$  بود. آزمون خمش بر روی صفحات طبق شکل 4 برای اتصال نوع اول و اتصال نوع دوم انجام شد.

### 2-3-2- آزمون خمش سه نقطه بر روی تیرهای با ابعاد $40 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$

برای هر اتصال سه تیر ساخته شد و مورد آزمون قرار گرفت. طول تیرها 40 cm و فاصله بین تکیه‌گاه‌ها 30 cm در نظر گرفته شد. سرعت انجام آزمون  $5 \text{ mm/min}$  می‌باشد. آزمون‌ها به صورت شبه‌استاتیک انجام شدند تا بار خرابی نهایی حاصل گردد. خرابی زمانی است که نمونه نتواند افزایش بیشتر در بار را تحمل نماید. نمونه و دستگاه آزمون برای اتصال نوع اول و برای اتصال نوع دوم در شکل 5 نشان داده شده است.

در کل 12 نمونه تحت خمش مورد آزمون قرار گرفت: 3 ورق با اتصال نوع اول، 3 ورق با اتصال نوع دوم، 3 تیر با اتصال نوع اول و 3 تیر با اتصال نوع 2.



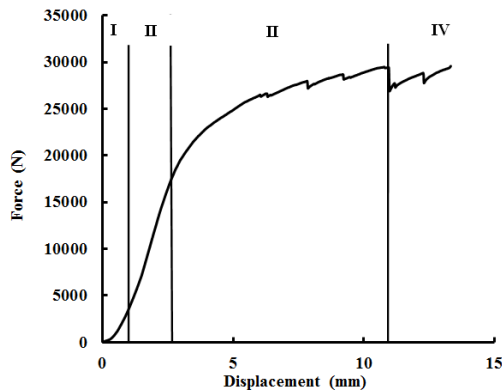
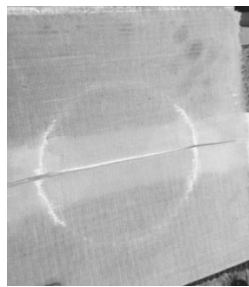


Fig. 8 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش

مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 9 نشان داده شده است و شامل گسیختگی رویه بالا و تغییرشکل پلاستیک اتصال می‌باشد. با اعمال نیرو بر مرکز تیر و روی اتصال، به علت آنکه اتصال دارای استحکام و صلبیت بالایی می‌باشد، نیروی اعمال شده توسط لانه زنبوری تحمل گردیده و لانه زنبوری دچار تغییرشکل برشی و کمانش می‌گردد و هیچگونه آثار خرابی بر روی اتصال مشاهده نمی‌شود. در نمودار شکل 10 ابتدا به دلیل کامپوزیت بودن رویه‌ها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می‌شود تا بار ماکزیمم حاصل گردد. همچنانکه جابجایی بیشتری اعمال گردید، افت نیرو و به علت کمانش و پارگی لانه زنبوری مشاهده می‌شود. مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 11 نشان داده شده است و شامل تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری می‌باشد. نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم در شکل 10 نشان داده شده است. نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم در شکل 12 نشان داده شده است.



a



b

Fig. 9 Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 2, a) failure of the upper skin, b) plastic deformation of the connection

شکل 9 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی صفحه دارای اتصال نوع دوم (a) گسیختگی رویه بالا، (b) تغییرشکل پلاستیک اتصال

نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در شکل 8 نشان داده شده است. مشابه نمودارهای مربوط به اتصال نوع I، نمودار نیرو-جابجایی در شکل 8 را می‌توان به 4 بخش تقسیم نمود. بخش اول (I) به علت شروع تماس بین نمونه و سمبه غیرخطی است. در بخش دوم (II) به علت کامپوزیت بودن رویه‌ها قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می‌شود. بخش سوم (III) غیرخطی است که علت آن شروع خرابی‌ها می‌باشد. بین بخش سوم و چهارم به علت گسترش خرابی‌ها افت ناگهانی نیرو مشاهده می‌شود و در بخش چهارم (IV) سفتی نمونه به علت وجود خرابی‌های گسترده کاهش می‌یابد.

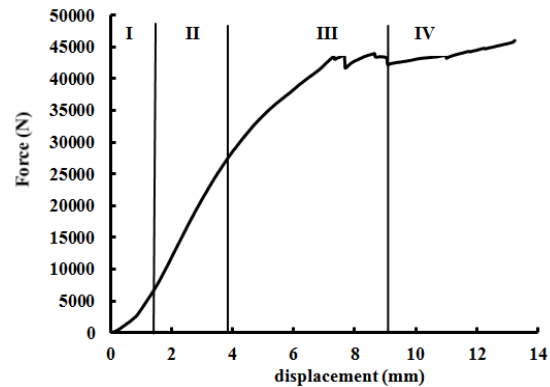
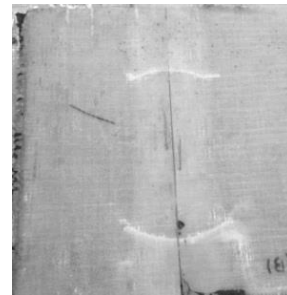


Fig. 6 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش



a



b



c

Fig. 7 Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 1, a) failure of the upper skin, b) plastic deformation of the connection, c) shear deformation and buckling of honeycomb

شکل 7 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی صفحه دارای اتصال نوع اول (a) گسیختگی رویه بالا، (b) تغییرشکل پلاستیک اتصال، (c) تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری

که به علت استحکام و صلبیت بالای اتصال، نیروی اعمال شده توسط لانه زنبوری تحمل گردیده و لانه زنبوری دچار تغییرشکل برشی و کمانش می‌گردد و هیچگونه آثار خرابی بر روی اتصال مشاهده نمی‌شود. مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 13 نشان داده شده است و شامل تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری می‌باشد. مقایسه بین نیروی ماکزیمم و نیروی شکست و جابجایی‌های مربوط به آن‌ها برای تیرها و ورق‌ها در جدول 2 نشان داده شده است.



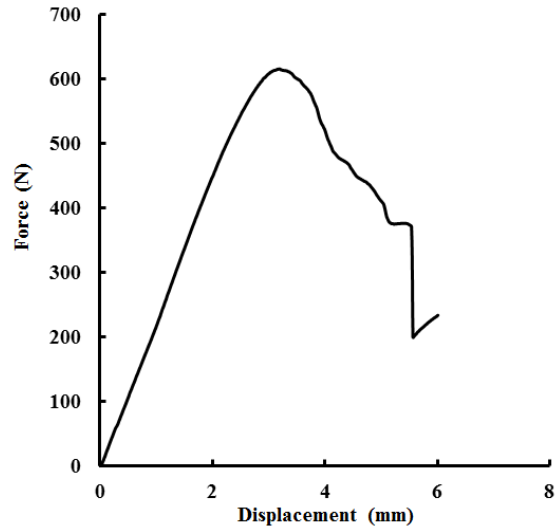
**Fig. 13** Shear deformation and buckling of honeycomb after performing bending test on the beams with connection type 2

شکل 13 تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری پس از انجام آزمون خمش بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم

جدول 2 مقایسه بین نیروی ماکزیمم و نیروی شکست و جابجایی‌های مربوط

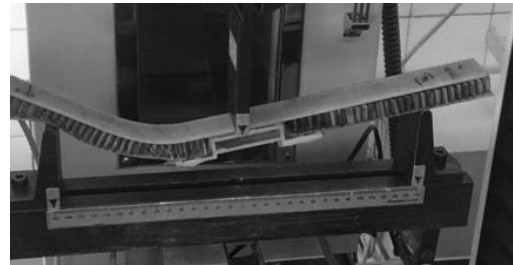
**Table 2** Comparison between maximum force and failure load and their corresponding displacements

تیر با اتصال نوع ۲	تیر با اتصال نوع ۱	ورق با اتصال نوع ۲	ورق با اتصال نوع ۱	
0.022	0.053	0.145	0.353	جرم اتصال (Kg)
557.7±0	495.9±119.7	21971.3±64.3	45410.4±144 5.7	نیروی ماکزیمم (N)
25350±0	9356.6±225 8.5	151526.5±44 3.4	128641.5±40 95.5	نیروی ماکزیمم بر واحد جرم (N/Kg)
4.904±0.784	2.814±0.383	3.285±0.0126	8.934±0.286	جابجایی مربوط به نیروی ماکزیمم (mm)
236.65±66.9 5	268.05±44.3 5	32983.7±341 3.9	47645.3±160 9.5	نیروی شکست (N)
10756.8±30 43.2	5057.5±836. 8	227473.8±23 544.1	134972.7±45 59.5	نیروی شکست بر واحد جرم (N/Kg)
39.731±3.24 9	32.066±0.29 22	13.503±0.175	13.812±0.567	جابجایی مربوط به نیروی شکست (mm)



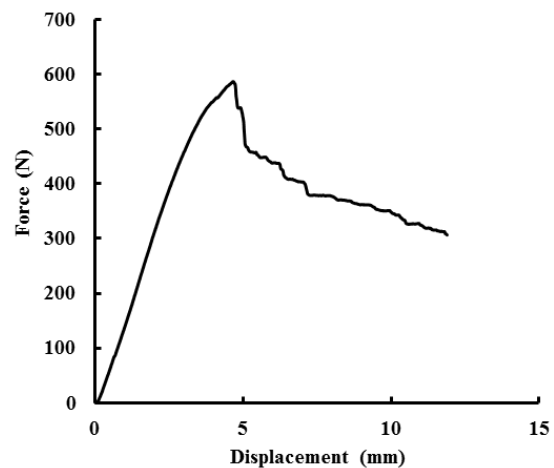
**Fig. 10** Force-displacement curve for beams with connection type 1 under bending

شکل 10 نمودار نیرو-جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش



**Fig. 11** Shear deformation and buckling of honeycomb after performing bending test on the beams with connection type 1

شکل 11 تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری پس از انجام آزمون خمش بر روی تیر دارای اتصال نوع اول



**Fig. 12** Force-displacement curve for beams with connection type 2 under bending

شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش

مشابه نمودارهای مربوط به اتصال نوع 1، در بخش اول نمودار شکل 12، ابتدا به دلیل کامپوزیت بودن رویه‌ها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می‌شود تا بار ماکزیمم حاصل گردد. با اعمال جابجایی بیشتر، افت نیرو به علت کمانش و پارگی لانه زنبوری مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است

در طول حل، اندازه مرحله زمانی جدید با در نظر گرفتن حداقل مقدار در تمامی المان‌ها و با استفاده از رابطه (1) بدست می‌آید.

$$\Delta t^{n+1} = TSSFAC \times \min \{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N\} \quad (1)$$

که در رابطه (1)، N تعداد المان‌ها و TSSFAC طبق پیشنهاد راهنمای نرم‌افزار برای حالاتی که انفجار وجود ندارد، مقدار 0.9 در نظر گرفته می‌شود. شرایط تماس contact surface to surface بین سمبه و رویه فوقانی اعمال گردید و شرایط تماس contact tied nodes to surface بین لانه زنبوری و رویه‌های فوقانی و تحتانی و اتصال با رویه‌های فوقانی و تحتانی اعمال گردید. شکل 15 و شکل 16 شرایط مرزی و بارگذاری را برای ورق‌ها و تیرها نشان می‌دهند.

خواص رویه‌های ساندویچ در سه جهت با استفاده از آزمون تجربی بر اساس استاندارد ASTM D638 بدست آمد [16] و رفتار پلاستیک اتصال و لانه زنبوری با استفاده از نمودار تنش- کرنش دو خطی<sup>1</sup> مدل شد [17]. خواص مکانیکی اتصالات و لانه زنبوری در جدول 3 و خواص مکانیکی رویه‌های GRP در جدول 4 قید شده است.

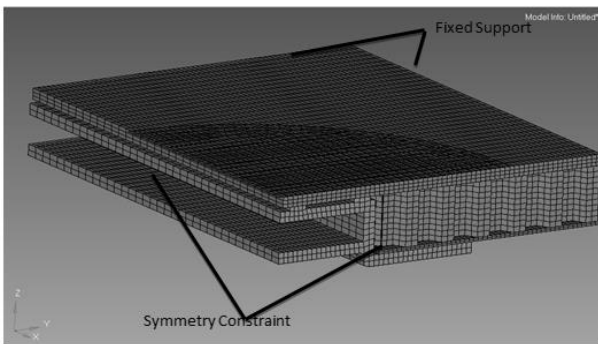


Fig. 15 Boundary conditions and loading for plates

شکل 15 شرایط مرزی و بارگذاری برای ورق‌ها

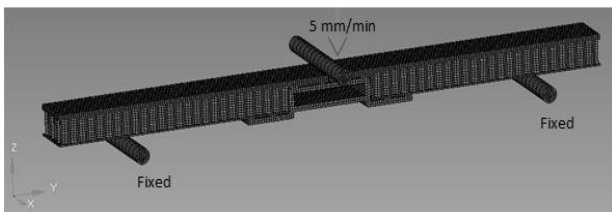


Fig. 16 Boundary conditions and loading for plates

شکل 16 شرایط مرزی و بارگذاری برای ورق‌ها

جدول 3 خواص مکانیکی اتصالات و لانه زنبوری

اجزاء	جنس	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)
اتصالات	آلومینیوم 6063-T5	2690	68.3	0.330	145.0
لانه زنبوری	آلومینیوم 5052-O	2680	69.3	0.330	90.0

<sup>1</sup> bilinear

با توجه به جدول 2، به علت آنکه نیروی ماکزیمم و نیروی شکست نمونه‌های دارای اتصال نوع اول (ورق و تیر) بیشتر از نمونه‌های دارای اتصال نوع دوم است، اتصال نوع اول استحکام بیشتری را از اتصال نوع دوم فراهم می‌کند. اما نمونه‌های دارای اتصال نوع دوم دارای حداکثر نیرو بر واحد جرم و نیروی خرابی بر واحد جرم بیشتری می‌باشند.

بنابراین در صورتی که در طراحی، کاهش وزن حائز اهمیت نباشد (مانند صنعت ریلی)، استفاده از اتصال نوع اول منطقی به نظر می‌رسد، در غیر اینصورت (مانند صنایع هوا فضا) استفاده از اتصال نوع دوم پیشنهاد می‌شود.

#### 4- تحلیل عددی

##### 4-1- توصیف مدل عددی

در این پروژه یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA 971- R7 برای شبیه‌سازی آزمون‌ها پیشنهاد گردید.

جهت انجام تحلیل عددی در این پروژه، پس از ایجاد مدل هندسی در هر یک از حالات، برای ایجاد شبکه، مدل در نرم‌افزار هایپر مش وارد گردید. لازم به ذکر است که تکیه‌گاه‌ها و سمبه نیز در هر حالت مدل شدند. به منظور کاهش تعداد المان‌ها و کاهش زمان حل، با استفاده از تقارن کافی است که فقط 1/4 ورق مدل گردید و قيود تقارن اعمال گردید در حالی که تیرها به طور کامل مدل شدند. شبکه مربعی دوبعدی برای لانه زنبوری ایجاد گردید و برای سایر اجزاء شبکه هشت‌وجهی سه بعدی مورد استفاده قرار گرفت (لانه زنبوری shell و بقیه اجزاء solid مدل شدند). مراحل بررسی همگرایی نتایج تحلیل عددی انجام شده برای ورق با اتصال نوع اول به صورت نمودار در شکل 14 آورده شده است. این نمودار پیش بینی حداکثر میزان جابجایی نقطه مرکز ورق، بر حسب تعداد کل المان‌های موجود در مدل را نشان می‌دهد.

تمامی تحلیل‌ها با استفاده از روش explicit انجام شدند. در آزمون‌های خمش، جابجایی برحسب زمان که از آزمایشات بدست آمد، به عنوان ورودی کار عددی مورد استفاده قرار گرفت و نیرو برحسب زمان بدست آمد. سمبه برای شبیه‌سازی آزمون خمش ورق، یک ورق صلب مدل گردید که دارای جابجایی با سرعت ثابت 5 mm/min می‌باشد. برای شبیه‌سازی آزمون خمش تیر، تکیه‌گاه‌ها و سمبه استوانه‌هایی صلب با قطر 5 mm مدل شدند و به سمبه جابجایی ثابت 5 mm/min اعمال گردید. با توجه به حداکثر جابجایی مشاهده شده در آزمون‌ها (15 mm) و سرعت انجام آزمون‌ها (5 mm/min)، زمان حل 180 s در نظر گرفته شد. بازه زمانی اولیه توسط نرم‌افزار تعیین گردید.

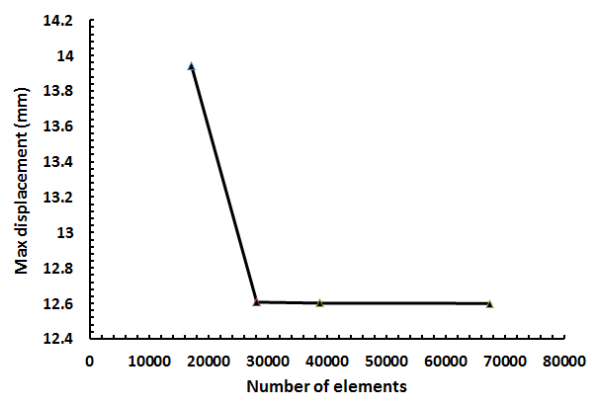


Fig. 14 FEM convergence analysis of plate with connection type 1

شکل 14 آنالیز همگرایی تحلیل المان محدود ورق با اتصال نوع اول

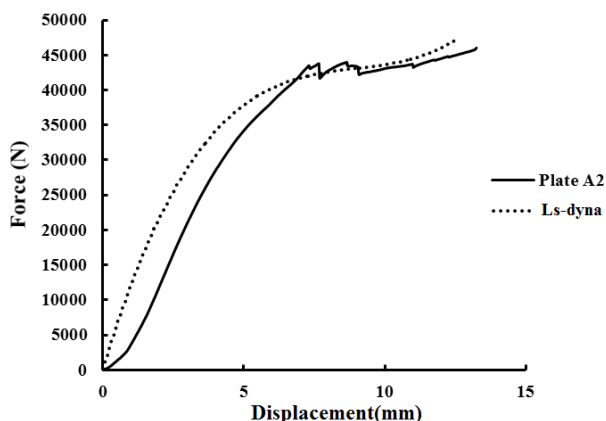


Fig. 17 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending (Numerical and experimental)

شکل 17 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمشی (تجربی و عددی)

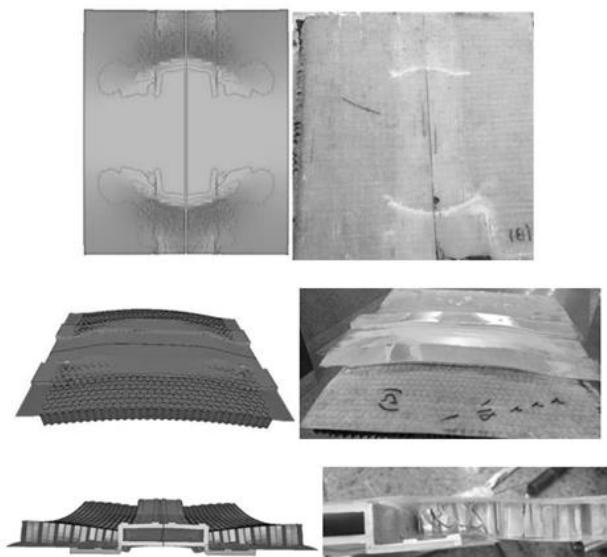


Fig. 18 Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 1 (Numerical and experimental)

شکل 18 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمشی بر روی صفحه دارای اتصال نوع اول (تجربی و عددی)

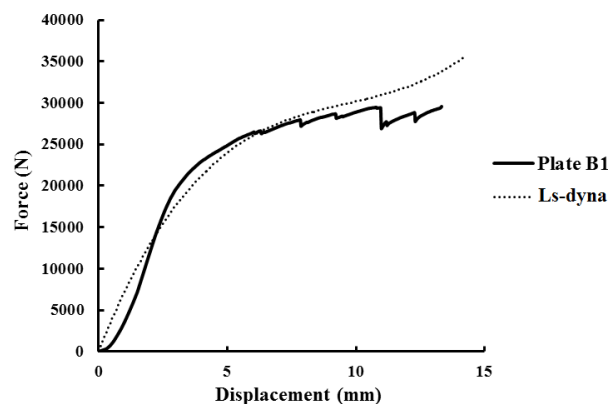


Fig. 19 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending (Numerical and experimental)

شکل 19 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمشی (تجربی و عددی)

جدول 4 خواص مکانیکی GRP

Table 4 Mechanical properties of GRP

مقدار	خاصیت
1540	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
44.6	مدول الاستیک در جهت 1 (GPa)
17.0	مدول الاستیک در جهت 2 (GPa)
16.7	مدول الاستیک در جهت 3 (GPa)
0.079	ضریب پواسون 12
0.090	ضریب پواسون 13
0.353	ضریب پواسون 23
3.49	مدول برشی در جهت 1 (GPa)
3.46	مدول برشی در جهت 2 (GPa)
3.2	مدول برشی در جهت 3 (GPa)
55.8	استحکام برشی (Mpa)
1240	استحکام کششی طولی (Mpa)
43.9	استحکام کششی عرضی (Mpa)
179.0	استحکام فشاری عرضی (Mpa)

رفتار رویه‌های کامپوزیتی تحت بار خمشی توسط معیار چانگ-چانگ<sup>1</sup> بررسی شده است که در نرم افزار از طریق تعریف ماده mat composite damage وارد گردید. ماده mat composite damage یک ماده اورتوتروپ با شکست ترد انتخابی برای کامپوزیت‌ها می‌باشد. 5 خاصیت ماده در سه معیار مورد استفاده قرار می‌گیرند که این پارامترها در جدول 4 قید شده‌اند. رفتار اتصال و لانه زنبوری با استفاده از نمودار تنش-کرنش دوخطی معادل شدند که ماده Mat plastic kinematic از نرم افزار انتخاب گردید و خواص مکانیکی آن‌ها طبق جدول 3 قرار داده شدند و مدول تانژانت صفر قرار داده شد. معیار خرابی مورد استفاده، معیار کرنش ماکزیمم می‌باشد. در نرم افزار، مقدار  $f_3$  (elongation at break = failure strain)، با توجه به شبهه-استاتیک بودن مسئله و این که المان‌ها در این حالت دچار شکست نمی‌شوند و فقط دچار تغییرشکل می‌شوند (اتصال فقط تغییرشکل پلاستیک دارد و دچار ترک و گسیختگی نمی‌شود)، عدد بزرگی قرار داده شد.

#### 2-4- مقایسه بین نتایج عددی و تجربی

##### 1-2-4- ورق با اتصال نوع اول

نمودار نیرو-جابجایی ورق با اتصال نوع اول تحت آزمون خمشی در شکل 17 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 18 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم می‌باشند.

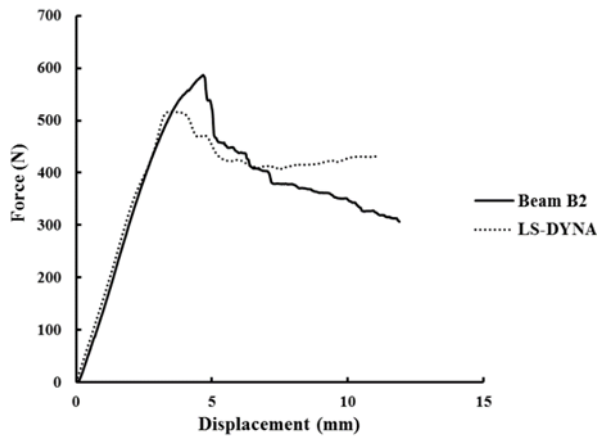
##### 2-2-4- ورق با اتصال نوع دوم

نمودار نیرو-جابجایی ورق با اتصال نوع اول تحت آزمون خمشی در شکل 19 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 20 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم می‌باشند.

##### 3-2-4- تیر با اتصال نوع اول

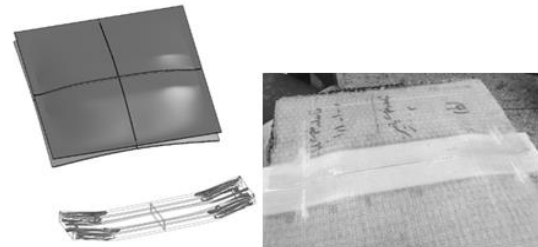
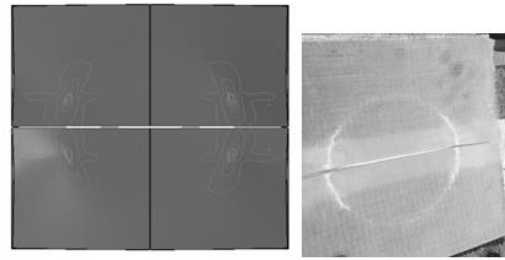
نمودار نیرو-جابجایی تیر با اتصال نوع اول تحت آزمون خمشی در شکل 21 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 22 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم می‌باشند.

<sup>1</sup> Chang- Chang composite failure model



**Fig. 23** Force-displacement curve for beams with connection type 2 under bending (Numerical and experimental)

شکل 23 نمودار نیرو- جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش (تجربی و عددی)



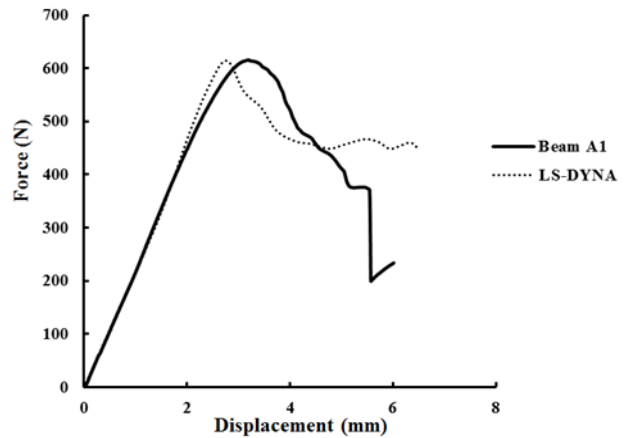
**Fig. 20** Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 2 (Numerical and experimental)

شکل 20 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی ورق دارای اتصال نوع دوم (تجربی و عددی)



**Fig. 24** Failure modes after performing bending test on the beams with connection type 2 (Numerical and experimental)

شکل 24 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی ورق دارای اتصال نوع دوم (تجربی و عددی)



**Fig. 21** Force-displacement curve for beams with connection type 1 under bending (Numerical and experimental)

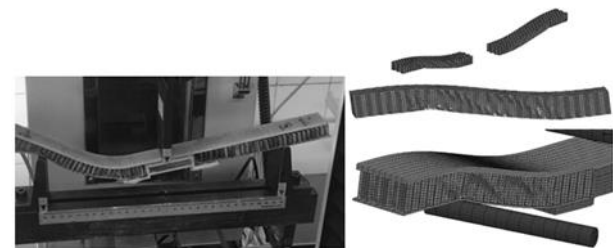
شکل 21 نمودار نیرو- جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش (تجربی و عددی)

### 5-تحلیل پارامتری

برای هر یک از بارگذاری‌های خمش و ضربه سرعت پایین و برای هر یک از اتصالات، دو تحلیل پارامتری روی طول اتصال و ضخامت اتصال انجام شده است.

برای تحلیل پارامتری روی ضخامت، با ثابت نگهداشتن ابعاد دیگر فقط مقدار پارامتر  $t$  در پنج مرحله و در هر مرحله به مقدار  $0.25 \text{ mm}$  افزایش داده شد و منحنی‌های نیرو- جابجایی در آزمون خمش ورق استخراج شدند. برای تحلیل پارامتری روی طول، با ثابت نگهداشتن ابعاد دیگر فقط مقدار پارامتر  $l$  در پنج مرحله و در هر مرحله به مقدار  $5 \text{ mm}$  افزایش داده شد و منحنی‌های نیرو- جابجایی در آزمون خمش استخراج شدند.

نمودار نیرو- جابجایی حاصل از انجام بارگذاری خمشی بر روی ورق شامل اتصال نوع 1 در ضخامت‌های مختلف اتصال، در شکل 25 ارائه گردیده است. همانطور که در شکل 25 مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت اتصال، شیب منحنی نیرو- جابجایی در بخش خطی و همچنین ماکزیمم نیرو افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت سطح زیر منحنی افزایش یافته است که این بدان معنی است که انرژی جذب شده توسط نمونه با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش ضخامت اتصال، ممان اینرسی مقطع افزایش یافته و در پی آن، مقاومت خمشی نمونه تحت آزمون بالاتر رفته است. جدول 5 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع اول نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش  $16.7\%$  در ضخامت، جرم به مقدار  $9.34\%$  و جذب انرژی به میزان  $7.36\%$  افزایش می‌یابند. نمودار نیرو- جابجایی حاصل



**Fig. 22** Failure modes after performing bending test on the beams with connection type 1 (Numerical and experimental)

شکل 22 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی ورق دارای اتصال نوع اول (تجربی و عددی)

### 4-2-4- تیر با اتصال نوع دوم

نمودار نیرو- جابجایی تیر با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در شکل 23 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 24 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم می‌باشند.

در بخش انتهایی نمودارها در شکل 26، در ضخامت‌های بالا، شیب نمودارها به شدت افزایشی می‌شود که علت آن این است که قسمت‌های بالا و پایین اتصال به هم رسیده و روی هم فشرده می‌شوند و پدیده‌ای مانند چگالش در لانه زنبوری‌ها اتفاق می‌افتد که باعث بالا رفتن شدید نیرو می‌شود.

نمودار نیرو-جابجایی حاصل از انجام بارگذاری خمشی در طول‌های مختلف اتصال برای نمونه شامل اتصال نوع 1 در شکل 27 و برای اتصال نوع 2 در شکل 28 ارائه گردیده است.

همانطور که در شکل 27 و شکل 28 مشاهده می‌شود، افزایش طول اتصال تاثیر قابل توجهی بر نمودار نیرو-جابجایی در هیچ یک از دو اتصال ندارد.

جدول 6 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع دوم

Table 6 mass and energy absorption changes with increasing thickness for connection 2		ضخامت (mm)
2.5	2	
0.178	0.145	جرم (Kg)
321.1732	305.0765	جذب انرژی (J)
1804.38	2103.97	جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)

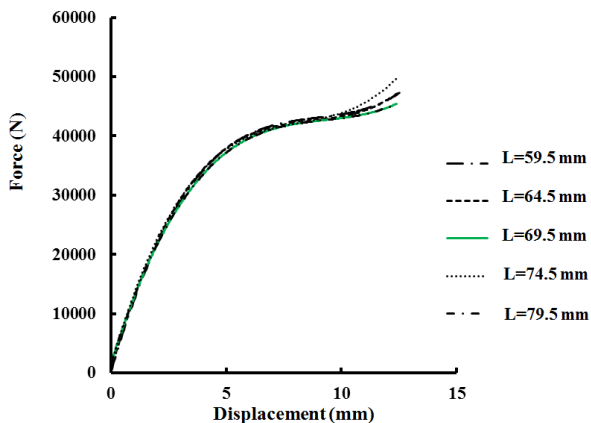


Fig. 27 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending in different connection lengths

شکل 27 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در طول‌های مختلف اتصال

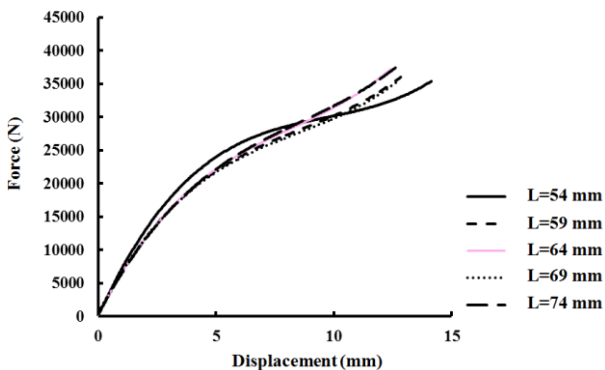


Fig. 28 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending in different connection lengths

شکل 28 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در طول‌های مختلف اتصال

از انجام بارگذاری خمشی بر روی ورق شامل اتصال نوع 2 در ضخامت‌های مختلف اتصال، در شکل 26 ارائه گردیده است. همانطور که در شکل 26 مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت اتصال، شیب منحنی تنش-کرنش در بخش خطی و همچنین ماکزیمم نیرو افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت، سطح زیر منحنی افزایش یافته است که این بدان معنی است که انرژی جذب شده توسط نمونه با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش ضخامت اتصال، ممان اینرسی مقطع افزایش یافته و در پی آن، مقاومت خمشی نمونه تحت آزمون بالاتر رفته است. جدول 6 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش 25% در ضخامت، جرم به مقدار 22.76% و جذب انرژی به میزان 5.28% افزایش می‌یابند.

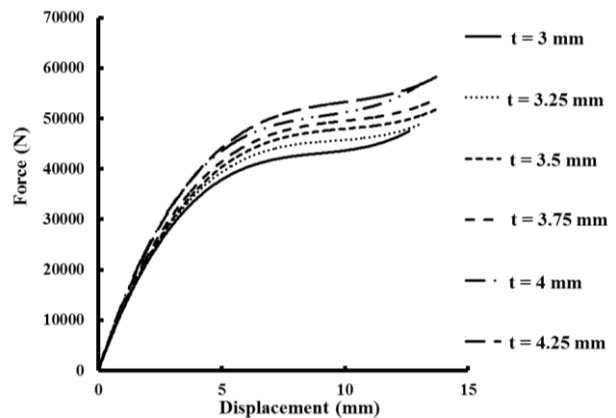


Fig. 25 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending in different connection thicknesses

شکل 25 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در ضخامت‌های مختلف اتصال

جدول 5 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع اول

Table 5 mass and energy absorption changes with increasing thickness for connection 1		ضخامت (mm)
3.5	3.25	3
0.386	0.37	0.353
495.8458	479.4984	461.8391
1284.57	1295.94	1308.33
		جرم (Kg)
		جذب انرژی (J)
		جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)

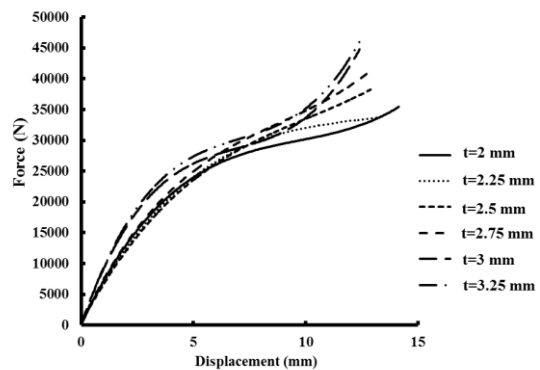


Fig. 26 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending in different connection thicknesses

شکل 26 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در ضخامت‌های مختلف اتصال

Composite Panels Joined by Fasteners” Composites: Part B, Vol. 32, pp. 299-308, 2001.

- [15] Dodkins, A.R. Sheno, R.A. and Hawkins, G.L., “Design of Joints and Attachments in FRP Ships’ structures”, Marine structures, Vol. 7, pp. 365-398, 1994.
- [16] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, D 638, 2016.
- [17] Hufnagel W., “Key to Aluminum Alloys: Designations, Compositions, Trade Names of Aluminum Materials”, the University of Michigan, 1982.

## 6- نتیجه‌گیری

در این پروژه دو نوع اتصال ساندویچی در نظر گرفته شد و بر روی هر دو اتصال، آزمون‌های خمش بر روی تیر و ورق انجام شدند. هر دو اتصال از آلیاژ AL 6063-T5 ساخته شدند اما هندسه آن‌ها متفاوت بود. نتایج نشان داد که استحکام اتصال نوع اول تقریباً 2 برابر استحکام اتصال نوع دوم می‌باشد ولی استحکام ویژه ورق با اتصال نوع اول کمتر از اتصال نوع دوم می‌باشد. البته با توجه به اینکه ممان اینرسی مقطع اتصال نوع اول بیشتر از ممان اینرسی مقطع اتصال نوع دوم است، بیشتر بودن استحکام اتصال نوع اول قابل پیش‌بینی می‌باشد.

تحلیل پارامتری روی طول و ضخامت دو اتصال انجام گرفت. در هر دو نوع اتصال، افزایش ضخامت اتصال منجر به استحکام بیشتر و جذب انرژی بیشتر می‌شود ولی استحکام ویژه و جذب انرژی ویژه کاهش می‌یابد. به علاوه، تغییر طول اتصال تاثیر چشمگیری بر روی استحکام نداشت.

## 7- مراجع

- [1] Safari, M. and Biglari, H., “Frequency Dependent Damped Vibration of Composite Sandwich Beam With Viscoelastic and Transverse Flexible core Based on GHM Method” Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 397-408, 2017. (In Persian)
- [2] Pirmohammadi, N. and Liaghat, G.H. and Hossein-Pol, M., “Experimental Investigation on Ballistic Behavior of Sandwich Panels Made of Honeycomb Core” Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 21-26, 2014. (In Persian)
- [3] Hassanpour Roubeneh, F. and Liaghat, Gh. Sabouri, H. and Hadavinia, H., “Investigation of Interaction between Aluminum Facing and Honeycomb Structure in Quasi-static and Impact Loading” Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 23-31, 2016. (In Persian)
- [4] Azarafza, R. Davar, A. and Mahmoodi, A., “Three-point Bending Test of Metal and Composite Sandwich panels with Grid Stiffened Core” Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2017. (In Persian)
- [5] Vahdatazad, N. Ebrahimi, S. and Liaghat, G. H., “Oblique Crashworthiness Optimization and Sensitivity Analysis of Tapered Sandwich Columns” Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 25-34, 2017. (In Persian)
- [6] Cao, J. and Grenestedt, J.L., “Design and Testing of Joints for Composite Sandwich/Steel Hybrid Ship Hulls” Composites: Part A, Vol. 35, Issue 9, pp. 1091-1105, 2004.
- [7] Bitzer, T., “Honeycomb Technology”, 1st edition, Chapman & Hill, 1997.
- [8] Toftgaard, H. and Lystrup, A., “Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships” Composites: Part A, Vol. 36, pp. 1055-1065, 2005.
- [9] Bunyawanichakul, P. and Castanie, B. and Barrau, J. J., “Experimental and Numerical Analysis of Inserts in Sandwich Structures” Applied Composite Materials, Vol. 12, pp. 177-191, 2005.
- [10] Bozhevolnaya, E. Lyckegaard, A. Thomsen, O.T. and Skvortsov V., “Local Effects in the Vicinity of Inserts in Sandwich Panels”, Composites: Part B, Vol. 35, pp. 619-627, 2004.
- [11] Niklas, K., “Search for Optimum Geometry of Selected Steel Sandwich Panel Joints” Polish Maritime Research, N. 2(56), Vol 15, pp. 26-3, 2008.
- [12] Heimbs, S. and Pein, M., “Failure Behavior of Honeycomb Sandwich Corner Joints and Inserts” Composite Structures, Vol. 89, pp. 575-588, 2009
- [13] Song, K. Choi, JY. Kweon, JH. Choi, JH. and Kim, KS., “An Experimental Study of The Insert Joint Strength of Composite Sandwich Structures” Composite Structures, Vol. 86, pp. 107-113, 2008.
- [14] Demelio, G. Genovese, K. and Pappalettere, C., “An experimental Investigation of Static and Fatigue Behavior of Sandwich







## مطالعه اثر جنس و ضخامت لایه میانی بر جذب انرژی شبه استاتیکی ورق‌های فلزی الیافی

الهام انصاری<sup>1</sup>، غلامحسین مجذوبی<sup>2\*</sup>، کاوه رحمانی<sup>3</sup>، محمد کشفی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد تاکستان، تاکستان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\* همدان، صندوق پستی 651754161، basu.ac.ir، gh\_majzoobi@basu.ac.ir

## اطلاعات مقاله

دریافت: 96/7/12

پذیرش: 96/9/27

## کلیدواژگان:

ورق فلزی الیافی

جذب انرژی

شبیه‌سازی عددی

مواد مرکب

## چکیده

در این تحقیق، اثر جنس و ضخامت لایه میانی بر جذب انرژی ورق‌های فلزی الیافی (FML) با مقطع مربعی تحت بار محوری شبه استاتیکی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. چهار لایه میانی شیشه-اپکسی، کربن-اپکسی، فوم پلی‌یورتان و آلومینیوم 2024 برای ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شد. در حالی که لایه‌های درونی و بیرونی تمامی نمونه‌ها، آلومینیوم 2024 انتخاب شده است. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پرس با جابجایی و سرعت یکسان فشرده شدند و ویژگی جذب انرژی آن‌ها شامل نیروی بیشینه، نیروی متوسط لهدیگی، انرژی جذب شده و تعداد چین‌خوردگی هر مورد مطالعه و مقایسه شد. سپس، شبیه‌سازی عددی بر روی نمونه‌ها انجام و مدل عددی به وسیله آزمایش‌های صورت گرفته اعتبار سنجی شد. حال، به وسیله مدل عددی اعتبار سنجی شده، اثر تغییر ضخامت لایه میانی برای یافتن ضخامت بهینه، مطالعه شد. نتایج پژوهش نشان داد که نمونه ساخته شده با لایه میانی الیاف کربن، بیشترین میزان جذب انرژی و نیروی متوسط را دارا می‌باشد. همچنین، نمونه با لایه میانی فوم کمترین بازدهی را از خود نشان داد. سرانجام با تغییر ضخامت لایه میانی نتیجه شد که بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌های است که ضخامت هر سه لایه تشکیل‌دهنده آن با هم برابر هستند.

## The effect of middle layer material and thickness on the quasi-static energy absorption of FML

Elham Ansari<sup>1</sup>, Gholamhossein Majzoobi<sup>2\*</sup>, Kaveh Rahmani<sup>2</sup>, Mohammad Kashfi<sup>2</sup>

1- Mechanical Engineering Department, Islamic University of Takestan, Takestan, Iran.

2- Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

\* P.O.B. 651754161, Hamedan, Iran, gh\_majzoobi@basu.ac.ir

## Keywords

Fiber metal laminates  
Energy absorption  
Numerical simulation  
Composite materials

## Abstract

In the present study the effect of change in thickness and material of the middle layer in fiber metal laminates (FMLs) with squared section on the energy absorption is investigated. In this work four types of specimens, based on the change in the material of the middle layer, were produced. In order to fabricate FML samples, Glass-epoxy, Carbon-epoxy, polyurethane foam and aluminum 2024 were utilized as the middle layer and aluminum 2024 for inner and outer layers, respectively. The specimens were then subjected to the compression test and their force-displacement curves were experimentally obtained. Additionally, the effect of the middle layer thickness on the energy absorption performance was studied by numerical simulation using Ls-Dyna explicit code. The numerical model was initially validated by experiment. In conclusion, it was found that the maximum and minimum efficiency were determined for the FML specimen made of Carbon-epoxy and foam, respectively. Moreover, by changing the middle layer thickness, it was numerically demonstrated that the specimen with three layers of the same thickness yields the best absorption energy capability.

## 1-مقدمه

مهم در طراحی این پروفیل‌ها می‌باشند [2]. از طرفی سبک‌سازی خودرو جهت کاهش مصرف انرژی اهمیت بسزایی دارد؛ بنابراین در ساخت این پروفیل‌ها می‌توان از مواد ترکیبی مانند ورق‌های فلزی الیافی<sup>1</sup> استفاده نمود. خواص این مواد ترکیبی از خواص لایه فلزی و ماده مرکب است، پس می‌توانند با توجه به استحکام بالا قابلیت جذب انرژی در سازه را افزایش دهند [3-5]. ورق‌های فلزی الیافی از لایه‌های فلز و ماده مرکب تقویت‌شده با الیاف ساخته شده‌اند. خواص مکانیکی مطلوب این مواد منجر شده است تا در ساخت قطعاتی که باید در شرایط محیطی با اختلاف دمای زیاد از جمله

یکی از مسائلی که امروزه بیش‌ازپیش موردتوجه طراحان قرار گرفته، افزایش ایمنی وسایل و ابزارها به‌خصوص وسایل حمل‌ونقل است که مهم‌ترین هدف آن کاهش صدمات جانی و مادی در تصادف‌ها می‌باشد. اهمیت بالای موضوع حفاظت از افراد و تجهیزات، باعث گردیده است که همواره، محققین به دنبال یافتن راهی برای افزایش مقاومت سازه‌ها و تجهیزات، در برابر خطرات ناشی از خرابی‌های مختلف باشند [1]. برای افزایش ایمنی سرنشینان خودرو در تصادفات جانبی، پروفیل‌های مختلف به‌عنوان ضربه‌گیر در درب‌های خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند. استحکام و قابلیت جذب انرژی بالا از پارامترهای

<sup>1</sup> Fiber Metal Laminates (FML)

## Please cite this article using:

Ansari, E. Majzoobi, G. Rahmani, K. and Kashfi, M., "The effect of middle layer material and thickness on the quasi-static energy absorption of FML", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 427-436, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

همگی دارای مقطع مربعی هستند، تشکیل شده است. نمایی از ابعاد، هندسه و ساختار نمونه‌های مورد استفاده در این کار در شکل 1 نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌ها، ضخامت و جنس لایه‌های بیرونی و درونی ثابت بوده و تنها لایه میانی تغییر خواهد کرد. برای ساخت لایه‌های درونی و بیرونی نمونه‌ها، آلومینیوم 2024 با ضخامت 0.8 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. با تغییر جنس لایه میانی چهار دسته نمونه مختلف تولید شد که برای سهولت بر اساس جنس لایه میانی کدگذاری شدند. کدهای به کاررفته برای هر کدام از نمونه‌ها در جدول 1 آمده است.

برای تولید نمونه‌ها، لایه درونی با استفاده از برش، خم‌کاری و جوشکاری ورق آلومینیوم تحت دمای کنترل‌شده تهیه شد. سپس، لایه میانی با توجه به نوع آن بر روی لایه درونی قرار گرفت. در نهایت، لایه بیرونی نمونه‌ها مشابه لایه درونی بر روی لایه میانی چسبانده شد. سپس، نمونه‌ها برای پخت رزین مورد استفاده به مدت 8 ساعت در دمای 80 درجه سلسیوس در کوره قرار گرفتند تا اپکسی خشک شده و به خواص بهینه مکانیکی خود برسد. شکل 2 نمونه ساخته‌شده قبل از عملیات سنگ‌زنی و پرداخت، را نشان داده شده است.

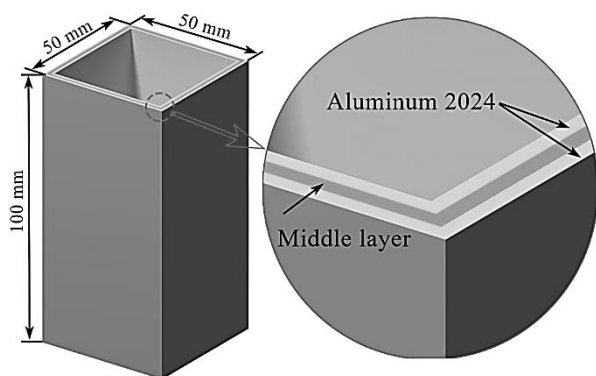


Fig. 1 Dimensions and layer configuration of FML specimen

شکل 1 نمایی از ابعاد نمونه‌های فلزی الیافی تولیدی جهت آزمایش جذب انرژی و ترتیب لایه‌ها

جدول 1 کدگذاری نمونه‌ها بر اساس جنس لایه میانی

کد	چیدمان لایه‌ها در نمونه‌ها
FML, C	آلومینیوم/ماده مرکب کربن اپکسی/آلومینیوم
FML, G	آلومینیوم/ماده مرکب شیشه اپکسی/آلومینیوم
Al, Al	آلومینیوم/آلومینیوم/آلومینیوم
Al, F	آلومینیوم/فوم پلی یورتان/آلومینیوم

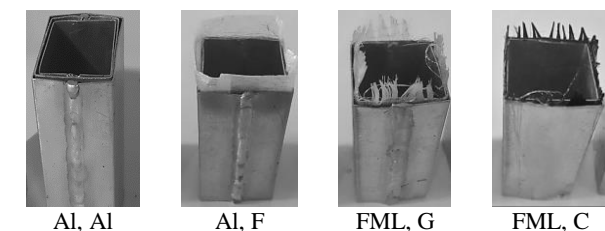


Fig. 2 Prepared specimens for experiment

شکل 2 نمونه‌های تولید شده جهت انجام آزمایش‌ها

صنایع هوافضا و مخازن تحت فشار چندلایه‌ای استفاده شوند، کاربرد وسیعی داشته باشند [6]. سازه‌های جدار نازک، به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت جذب انرژی بالایی نیز دارند به همین دلیل استفاده از آن‌ها در صنایع خودروسازی و هوافضا بسیار مورد توجه است [7، 8]. ضربه‌گیرهای مکانیکی انرژی جنبشی را توسط انجام کار پلاستیک جذب کرده و مانع از آسیب رسیدن به سایر قطعات مهم و ضروری دستگاه مدنظر خواهند بود [9]. اکثر جاذب‌های انرژی مکانیکی یک‌بار مصرف بوده و به‌عنوان عضو فدا شونده در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، الزام طراحی برای چنین جاذب‌هایی معمولاً دستیابی به جذب انرژی حداکثر در عین سبک بودن است [10]. در میان طراحی‌های مختلف فرآیند لهیدگی محوری معمولاً شامل سه مرحله می‌باشد، اول نیروی لهیدگی به بیشینه اولیه می‌رسد تا بر مقاومت اولیه جاذب غلبه کند، دوم به دلیل پیشرفت لهیدگی، نیرو کاهش و نوسان پیدا می‌کند و سوم نیرو به سرعت افزایش یافته و قسمت‌های له‌شده را افزایش داده تا به پایان لهیدگی برسد [11]. تاجداری و همکاران [12] به بررسی کمناش حاصل از لهیدگی محوری در پوسته جدار نازک با مقطع دایروی پرداختند و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توانستند حالت‌های مختلف ارتعاشی در حین لهیدگی را شبیه‌سازی کنند. پیرمحمد و همکاران [13] به بررسی عددی و تجربی رفتار لهیدگی لوله‌های جدار نازک تقویت‌شده با ورق‌های درونی تحت بارگذاری دینامیکی پرداختند. نامبردگان دریافتند که میزان جذب انرژی لوله دوجداره هشت‌ضلعی با تعداد چهار تقویتی به‌عنوان حالت بهینه در مجموع می‌باشد. دامغانی نوری و همکاران [14] به بررسی استوانه‌های مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری پرداختند. محققین بارگذاری‌های خود را به صورت ضربه‌ای و با دستگاه وزنه سقوطی بررسی نموده و دریافتند که جاذب‌هایی با زاویه سلول صفر درجه دارای فروریزش متقارن بوده و ظرفیت جذب بالاتری نسبت به حالت‌های دیگر از خود نشان می‌دهند. آذرافزا و همکاران [15] به بررسی حالت‌های مختلف واماندگی در پانل‌های ساندویچی پرداختند. نامبردگان دریافتند که تغییر جنس از شیشه به کربن مؤثرتر از افزایش ضخامت لایه میانی است. خسروی و همکاران [16] به بررسی رفتار سازه‌های مشبک کامپوزیتی تقویت شده با ذرات نانو پرداختند و دریافتند که با افزایش سه درصد نانو ذره، بیست و پنج درصد افزایش در خاصیت جذب انرژی مشاهده می‌شود. توسلی و همکاران [3] میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای کامپوزیتی کلاهی شکل تحت نیروی عرضی را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. نامبردگان با ارائه مدلی توانستند رفتار جاذب‌های مذکور را با دقت بالایی نسبت به نتایج آزمایشگاهی، پیش‌بینی نمایند.

در این پژوهش با استفاده از روش اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی اثر ضخامت و ماده لایه میانی نمونه‌های فلزی الیافی بر میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی جامعیت، چهار نوع نمونه با لایه میانی کربن-اپکسی، شیشه-اپکسی، فوم پلی‌یورتان<sup>1</sup> و آلومینیوم 2024 تهیه و آزمایش می‌شوند. بعد از اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، ضخامت لایه میانی به گونه‌ای محاسبه می‌شود که بیشترین میزان جذب انرژی حاصل گردد.

## 2- مواد و آزمایش‌ها

نمونه‌های فلزی الیافی مورد آزمایش از سه لایه درونی، میانی و بیرونی که

<sup>1</sup> Polyurethane Foam

جدول 2 خواص مکانیکی آلومینیوم 2024 مستخرج از آزمایش کشش

Table 2 Mechanical properties of Al 2024 determined by experiment

مقدار	نماد	خواص مکانیکی
73.04	$E$	ضریب الاستیسیته (GPa)
0.34	$\nu$	نسبت پواسان
95.5	$S_y$	تنش تسلیم (MPa)
172	$S_{ut}$	تنش نهایی (MPa)

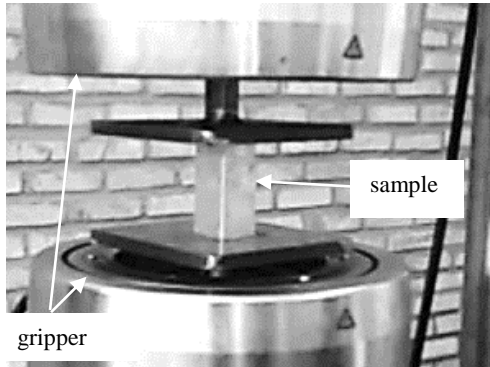


Fig. 5 Instron machine and the configuration of specimen and grippers  
شکل 5 نمایی از دستگاه اینسترون جهت انجام آزمایش شبه استاتیکی و محل قرارگیری نمونه در بین فک‌ها

### 3-مدلسازی اجزاء محدود

شبه‌سازی عددی برای بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌ها توسط نرم‌افزار LS-DYNA صورت گرفت. مدلسازی نمونه‌ها به صورت سه بعدی و شرایط مرزی کاملاً مطابق با شرایط آزمایش در نظر گرفته شده است. مدل اجزاء محدود نمونه‌ها همانند نمونه آزمایشگاهی از سه لایه تشکیل شده است. برای شبکه‌بندی لایه‌ها از المان‌های shell استفاده شده است. برای لایه‌های درونی و بیرونی آلومینیوم 2024 با ضخامت 0.8 میلی‌متر و لایه میانی بر اساس کد نمونه مورد نظر، از ماده مرکب شیشه-پوکسی، کربن-پوکسی، فوم پلی‌یورتان و آلومینیوم 2024 استفاده شده است.

ضخامت لایه میانی برای تمامی کدها برابر 0.8 میلی‌متر فرض شده است. پس از اعتبار سنجی مدل عددی، شبه‌سازی‌های دیگری با ضخامت‌ها مختلف لایه میانی به منظور بررسی رفتار جذب انرژی، نیز انجام شده است. به جهت تخصیص مدل ماده مربوط به مواد مرکب الیافی از مدل ماده شماره 54<sup>2</sup> و برای لایه فوم از مدل ماده شماره 57<sup>3</sup> در نرم‌افزار استفاده شده است [18, 19]. خواص مکانیکی لایه آلومینیومی و لایه‌های میانی به ترتیب بر اساس جدول 2 و مقادیر موجود در مراجع با توجه به درصد کسر حجمی الیاف به کاررفته، به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شدند [20-24].

هندسه مدل اجزاء محدود ایجاد شده شامل یک مقطع مربع جدار نازک سه لایه و دو جسم صلب (به عنوان فک‌های دستگاه) در دو انتهای آن است. فک بالایی در تمام جهات مقید شده است در حالی که فک پایینی تنها می‌تواند در راستای محوری جابجا شود. مطابق با شرایط آزمایش، بارگذاری با سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه با اعمال جابجایی از طریق فک پایین به نمونه اعمال می‌شود.

### 1-2-محاسبه خواص مکانیکی آلومینیوم 2024 به وسیله آزمایش کشش

نمونه‌های ورق آلومینیوم 2024 با استفاده از دستگاه برش وایرکات با دقت 0.05 میلی‌متر آماده شدند. سپس، آزمایش کشش برای محاسبه خواص مکانیکی آن طبق استاندارد ASTM E8M [17] انجام شد. شکل 3 ابعاد نمونه کشش ساخته شده از ورق آلومینیوم را نشان می‌دهد. آزمایش کشش مذکور به وسیله دستگاه کشش اینسترون<sup>1</sup> و با سرعت فک 1.52 میلی‌متر در دقیقه انجام شد. شکل 4 نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم 2024 را نشان می‌دهد و خواص مکانیکی آن در جدول 2 آورده شده است.

### 2-2-آزمایش لهیدگی

به منظور بررسی اثر جنس لایه میانی بر نیروی متوسط لهیدگی، بیشینه نیرو، انرژی جذب شده بر واحد جرم و نوع چین‌خوردگی نمونه‌ها، آزمایش فشار شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های انجام می‌شود. این آزمایش به دلیل ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در نمونه که منجر به چین‌خوردگی‌های متعدد در آن می‌شود، تحت عنوان آزمایش لهیدگی نیز شناخته می‌شود. بارگذاری نمونه‌ها به صورت شبه استاتیکی و با سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه و توسط دستگاه اینسترون با ظرفیت 60 تن انجام می‌شود. فک بالا دستگاه ثابت و فک پایین با حرکت به سمت بالا، نمونه‌ها را فشرده می‌کند. دستگاه مذکور و همچنین، نحوه قرارگیری نمونه در بین فک‌های آن در شکل 5 نشان داده شده است.

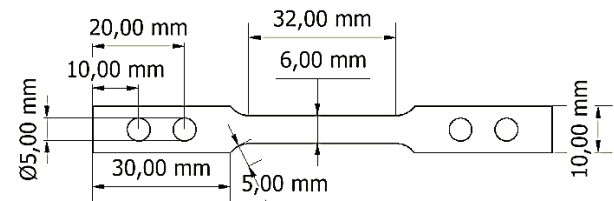


Fig. 3 Dimensions of aluminum quasi-static tensile test specimen

شکل 3 ابعاد نمونه آزمایش کشش شبه استاتیکی لایه آلومینیومی

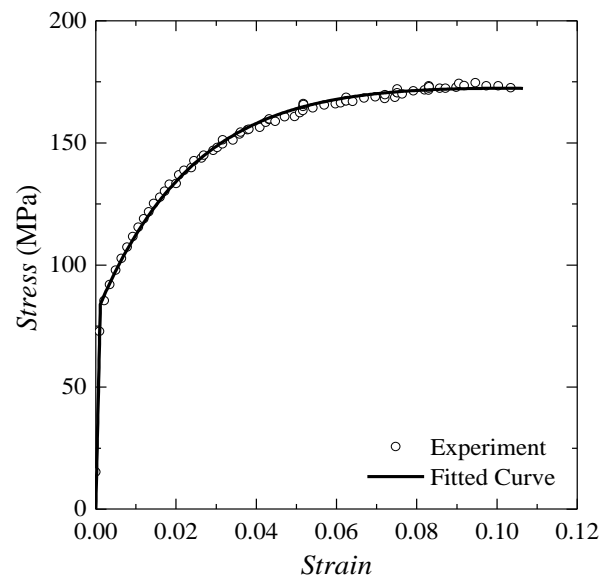


Fig. 4 True stress-strain curve of Al 2024 obtained from tensile test

شکل 4 منحنی تنش-کرنش حقیقی آزمایش کشش شبه استاتیکی برای آلومینیوم 2024

<sup>2</sup> Enhanced-Composite-Fabric

<sup>3</sup> Crushable-Foam

<sup>1</sup> Instron

## 4-1- نتایج و اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود

به منظور بررسی صحت مدل اجزاء محدود، نتایج آن با استفاده از نتایج تجربی موجود اعتبار سنجی می‌شود. جهت مقایسه، شکل چین خوردگی نمونه میزان جذب انرژی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل 8 نحوه چین خوردگی نمونه‌ها را تحت نیروی فشاری محوری، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود شبیه‌سازی به خوبی توانسته است رفتار نمونه‌های مختلف را پیش‌بینی کرده و چین خوردگی هر کدام را به نحو مطلوبی مدل‌سازی نماید.

بیشترین تراکم چین خوردگی مربوط به Al, F می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، چین‌های Al, F نسبت به دیگر نمونه‌ها، متراکم‌تر هستند. در حالی که، کمترین تراکم چین خوردگی مربوط به FML, C می‌باشد.

شکل و تعداد چین خوردگی‌های تجربی و پیش‌بینی شده به وسیله شبیه‌سازی در شکل 9 مقایسه شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، تطابق بالایی از لحاظ هندسه و تعداد چین خوردگی‌ها بین نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. علی‌رغم وجود درز جوش در نمونه‌های آزمایشگاهی، تغییر شکل پیش‌بینی شده با استفاده از روش عددی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. همچنین، یکی از معیارهای مهم در اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود تعداد چین خوردگی‌ها در هر آزمایش است که مدل عددی با دقت بالایی از این لحاظ، توانسته نتایجی نزدیک به آزمایش را پیش‌بینی نماید.

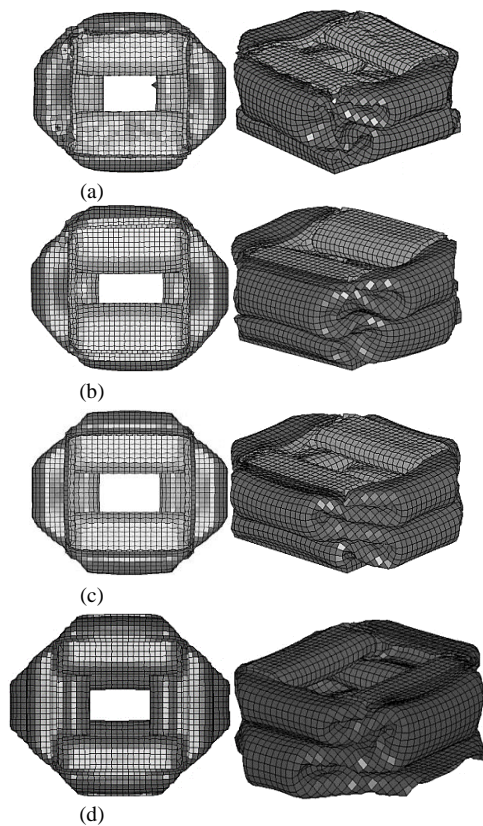


Fig. 8 Numerical prediction of deformed specimen (a) FML, C, (b) FML, G, (c) Al, F and (d) Al, Al

شکل 8 نحوه چین خوردگی‌های نمونه‌ها بعد از شبیه‌سازی انجام گرفته

Al, Al (d) و Al, F (c). FML, G (b). FML, C (a)

نوع تماس بین تمامی لایه‌ها و همچنین، فک‌های دستگاه از نوع تماس خودکار سطح به سطح<sup>1</sup> انتخاب شده است. برای یافتن اندازه بهینه المان‌ها، شبیه‌سازی‌های متعددی با اندازه‌های مختلف المان تکرار شد و اثر اندازه المان بر انرژی جذب شده بررسی گردید. در نهایت تعداد المان‌های بهینه برابر 3744 در نظر گرفته شد. مدل اجزاء محدود و شبکه‌بندی آن در شکل 6 نشان داده است.

## 4- بحث و نتایج

نتایج تجربی نشان داد که با افزایش نیرو، چین خوردگی در ابتدا در نزدیکی فک ثابت دستگاه شکل گرفته، سپس در طول نمونه پیشروی می‌کند. الگوی لهیدگی و همچنین چین خوردگی‌ها به دلیل تغییر جنس لایه میانی از لحاظ ظاهری نیز تفاوت‌هایی دارد. در شکل 7 نحوه چین خوردگی و لهیدگی نمونه‌ها با کدهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، به دلیل تغییر لایه میانی نمونه‌ها، چین خوردگی‌های به وجود آمده متفاوت هستند. منظم‌ترین چین خوردگی‌ها مربوط به نمونه با لایه میانی آلومینیوم است در حالی که عدم تقارن در دیگر نمونه‌ها قابل مشاهده است. زیرا در نمونه‌هایی که لایه میانی در آن‌ها ماده مرکب است احتمال تغییر ضخامت لایه میانی به دلیل برخی مشکلات ساخت وجود دارد که می‌تواند تقارن چین خوردگی‌ها را تحت شعاع قرار دهد.

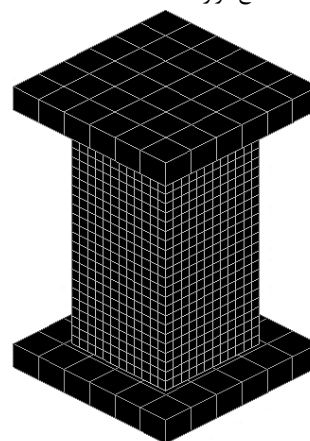
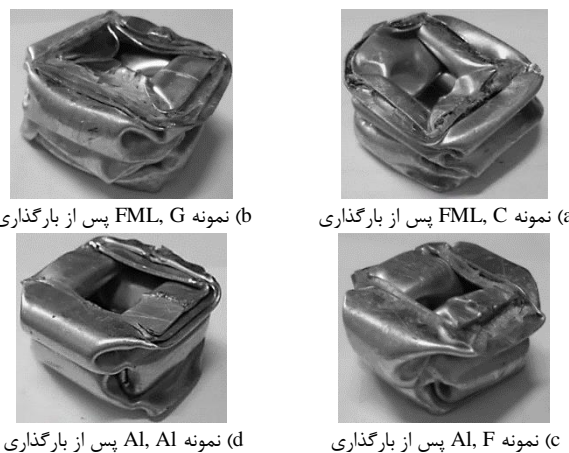


Fig. 6 FE model of compression test

شکل 6 نمایشی از مدل اجزاء محدود آزمایش جذب انرژی استاتیکی



(b) نمونه FML, G پس از بارگذاری

(a) نمونه FML, C پس از بارگذاری

(d) نمونه Al, Al پس از بارگذاری

(c) نمونه Al, F پس از بارگذاری

Fig. 7 Deformed specimen after quasi-static compression test

شکل 7 نحوه تغییر شکل نمونه‌ها پس از آزمایش شبیه استاتیکی

<sup>1</sup> Automatic surface to surface

به‌منظور بررسی قابلیت جذب انرژی هر کدام از کدها، مقدار بیشینه نیرو و همچنین، نیروی متوسط برای هر آزمایش به‌طور جداگانه محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. نیروی متوسط لهیدگی، از رابطه (1) محاسبه می‌شود [27].

$$F_{mean} = \frac{\int_0^{\delta_{max}} F d\delta}{\delta_{max}} \quad (1)$$

در رابطه اخیر  $F$  مقدار نیروی لهیدگی و  $\delta$  جابجایی متناظر با نیروی اعمالی است. نسبت نیروی متوسط لهیدگی به مقدار نیروی اولیه بیشینه توسط پارامتری به نام  $CFE^1$  یا درصد بازدهی نیروی لهیدگی تعریف می‌شود. به‌عبارت دیگر، هر چه این درصد به 100 نزدیک‌تر باشد نشان از آن دارد که نیروی لهیدگی یکنواخت و نزدیک به نیروی بیشینه است. رابطه (2) درصد بازدهی نیروی لهیدگی را نشان می‌دهد.

کمیت‌هایی مانند نیروی اولیه بیشینه و نیروی متوسط کمیت‌هایی هستند که در طراحی یک جاذب انرژی مکانیکی مهم بوده و میزان کارایی آن را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، جرم نمونه نیز یک عامل محدودکننده در طراحی جاذب‌های انرژی است. رابطه مهم دیگری که می‌توان به‌وسیله آن میزان جذب انرژی یک نمونه را با دیگر نمونه‌ها مقایسه نمود، انرژی جذب‌شده بر واحد جرم ( $SEA^2$ ) می‌باشد که نحوه محاسبه آن در رابطه (3) نشان داده شده است [28].

$$CFE = \frac{F_{mean}}{F_{max}} \quad (2)$$

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (3)$$

در روابط فوق  $F_{mean}$ ، نیروی متوسط لهیدگی،  $F_{max}$ ، نیروی لهیدگی بیشینه،  $E_a$ ، سطح زیر منحنی نیرو جابجایی حاصل از آزمایش لهیدگی و  $m$  جرم نمونه می‌باشد. از کمیت‌های مذکور جهت مقایسه عملکرد جاذب ساخته شده در این پژوهش نیز استفاده شده است. به‌منظور مقایسه بهتر عملکرد نمونه‌ها تحت آزمایش فشار شبه استاتیکی، مقادیر  $CFE$  و  $SEA$  برای همگی محاسبه و در شکل 11 نشان داده شده است.

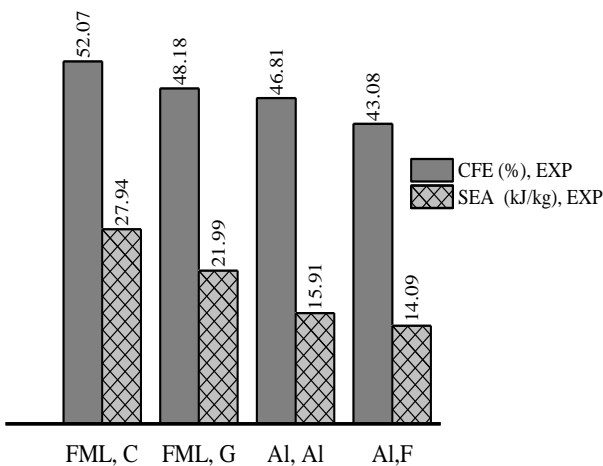


Fig. 11 Bar chart of CFE and SEA for all codes

شکل 11 نمودار درصد بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) و انرژی جذب‌شده بر واحد جرم (SEA)

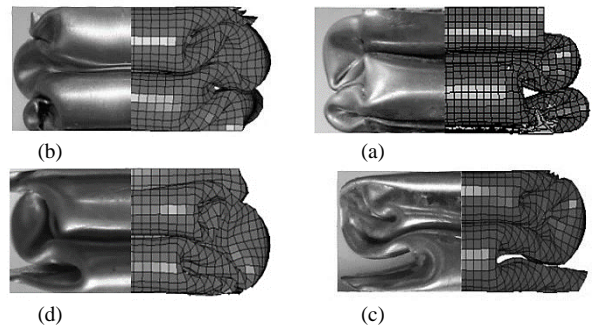


Fig. 9 Compression of FE and experiment (a) FML, C, (b) FML, G, (c) Al, F and (d) Al, Al

شکل 9 مقایسه چین‌خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی و مقایسه آن با مدل اجزاء محدود (a) FML, C (b) FML, G (c) FML, G (d) و Al, F (c) FML, G (b) FML, C (a) محدود

#### 2-4- مقایسه تجربی جذب انرژی کدهای مختلف

یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های بررسی عملکرد جاذب انرژی مکانیکی، نمودار نیرو جابجایی حاصل از آزمایش لهیدگی است [25]. شکل 10 نمودار نیروی لهیدگی برحسب جابجایی را برای نمونه‌های آزمایش‌شده در حالت شبه استاتیکی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودارهای مربوط به هر نمونه تا جابجایی 45 میلی‌متر، قبل از پدیده قفل‌شدگی ادامه داده شده است.

شکل 10 نشان می‌دهد که برای تمامی کد نمونه‌ها ابتدا نیرو به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته سپس، به دلیل به وجود آمدن لولاهای خمیری در آن مقدار نیرو افت می‌کند. درنهایت، برای تولید چین‌های بعدی دوباره مقدار نیرو رو به افزایش می‌گذارد [26,25].

همان‌گونه که در نمودار شکل 10 مشاهده می‌شود، بیشترین نیروی اولیه و همچنین بیشترین نیروی ثانویه لهیدگی مربوط به نمونه تولیدی فلزی الیافی با لایه میانی کربن-پکسی (FML, C) می‌باشد.

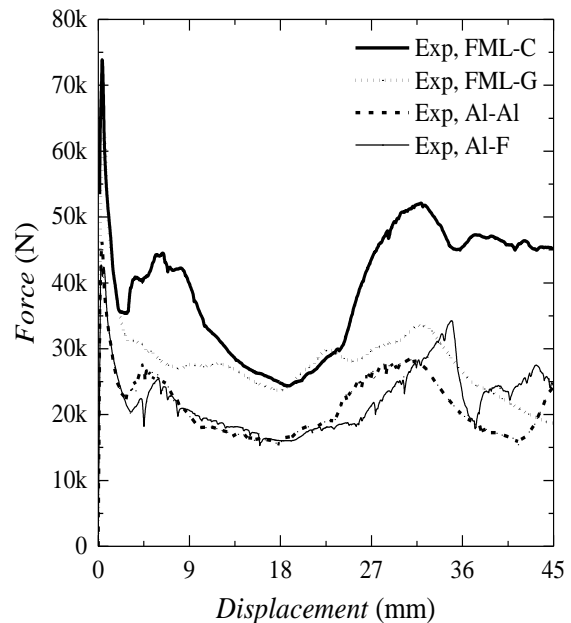


Fig. 10 The experimental force-displacement curve of all codes

شکل 10 نمودار نیروی لهیدگی برحسب جابجایی در آزمایش فشار شبه استاتیکی

<sup>1</sup> Crush Force Efficiency  
<sup>2</sup> Specific Energy Absorption

جدول 3 درصد افزایش میزان جذب انرژی بر واحد جرم نمونه نسبت به انرژی جذب شده FML,G و FML,C

Table 3 Increased energy absorption percentage according to FML, C and FML, G.

درصد افزایش انرژی جذب شده به FML,G بر واحد جرم		درصد افزایش انرژی جذب شده به FML,C بر واحد جرم			کد نمونه مقادیر محاسبه شده
Al, F	Al, Al	Al, F	Al, Al	FML, G	
35.93	27.65	49.57	43.06	21.30	

جدول 3 نشان می‌دهد که جذب انرژی نمونه با لایه میانی کربن-اپکسی بیش از 21 درصد بهتر از نمونه با لایه میانی شیشه-اپکسی می‌باشد. بیشترین اختلاف کد FML, C مربوط به نمونه با لایه میانی فوم (AL, F) که مقدار آن کمتر از 50 درصد به دست آمده است. همچنین نمونه FML, G نسبت به نمونه Al, F افزایش 36 درصدی را نشان می‌دهد.

#### 3-4- بررسی عددی ضخامت لایه میانی بر جذب انرژی

پس از اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود، برای بهینه‌سازی ضخامت لایه میانی نمونه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت برای لایه میانی شیشه‌سازی شده است. بدین منظور، سه ضخامت 0.6، 0.8 و 1 میلی‌متر برای لایه میانی در نظر گرفته شد. نمودارهای مربوط به هر کدام از شبیه‌سازی‌ها در ادامه نشان داده شده است. دلیل انتخاب ضخامت‌های ذکر شده، انتخاب ضخامت 0.8 میلی‌متر به عنوان مرجع و تغییرات 25% کاهش و افزایش آن است.

در شکل 13 تا 16 مشاهده می‌شود که تمامی نمودارها در ابتدا با شیب قابل توجهی افزایش یافته و بعد از رسیدن به نیروی بیشینه، کاهش می‌یابند. دلیل این کاهش به وجود آمدن لولای خمیری در نمونه بوده که منجر به کاهش نیرو خواهد شد [26]. همچنین، مشاهده می‌شود که FML, G و FML, C نسبت به تغییرات ضخامت لایه میانی حساسیت بالاتری نسبت به Al, Al دارند.

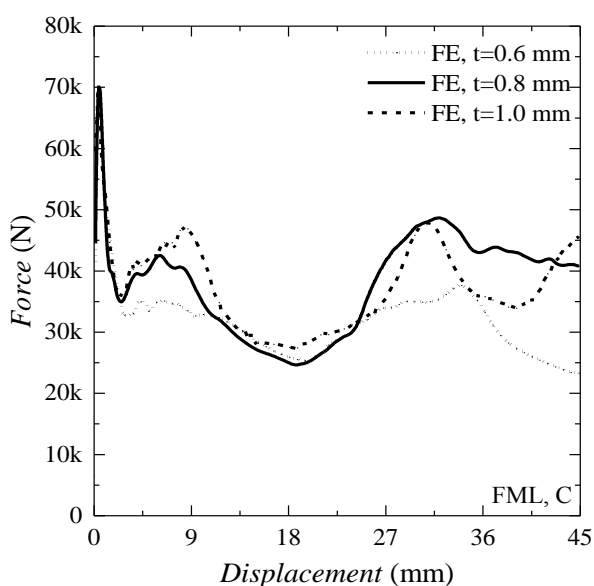


Fig. 13 FE force-displacement curves of FML, C for different middle layer thickness

شکل 13 نمودار نیروی لهیدگی مستخرج از شبیه‌سازی عددی برای نمونه FML, C و ضخامت‌های مختلف لایه میانی

همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، بیشترین درصد CFE مربوط به نمونه فلزی الیافی با لایه میانی کربن-اپکسی با مقدار 52.07 kJ/kg است. درصد بازدهی نیروی لهیدگی برای نمونه فلزی الیافی با لایه میانی شیشه-اپکسی و همچنین نمونه با لایه میانی آلومینیوم مقادیر مشابهی را نشان می‌دهد. در صورتی که برای نمونه با لایه میانی فوم درصد بازدهی نیروی لهیدگی با تفاوت معناداری نسبت به نمونه‌های دیگر در جایگاه چهارم در بین نمونه‌ها قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر FML,C در شرایط برابر بیش از 17% افزایش CFE را نسبت به Al, F نشان می‌دهد.

در شکل 12 نیروی بیشینه و متوسط لهیدگی با توجه به مقادیر نیرو جابجایی آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که در نمودار شکل 12 مشاهده می‌شود، تمامی مقادیر تجربی به دست آمده برای نیروی بیشینه و نیروی متوسط کمتر از مقدار پیش‌بینی شده عددی است. بیشترین مقدار خطا مربوط به نیروی متوسط Al, F به مقدار 35% است. در حالی که کمترین مقدار خطا مربوط به نیروی بیشینه و کمتر از 1.5% به دست آمده است. میانگین خطا در پیش‌بینی عددی کمتر از 15% است که با توجه به شرایط آزمایش و مدل‌سازی قابل قبول است.

دلیل خطا را می‌توان به اثر درز جوش در نمونه‌های آزمایشگاهی معطوف دانست که باعث شده است در حین آزمایش فشار، مقاومت ماده در آن نواحی کمتر شود. این موضوع می‌تواند انرژی جذب شده در نمونه را کاهش دهد. از سوی دیگر، در شبیه‌سازی عددی، مدل کاملاً عاری از هر نوع عیب و ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. وجود هرگونه عیب ساختاری در فلزات و همچنین، در لایه میانی به کاررفته برای هر کدام از نمونه‌ها می‌تواند منجر به کاهش انرژی جذب شده گردد. به منظور مقایسه بهتر نتایج، درصد افزایش میزان جذب انرژی بر واحد جرم نمونه‌ها نسبت به انرژی جذب شده FML, G و FML, C در جدول 3 آمده است.

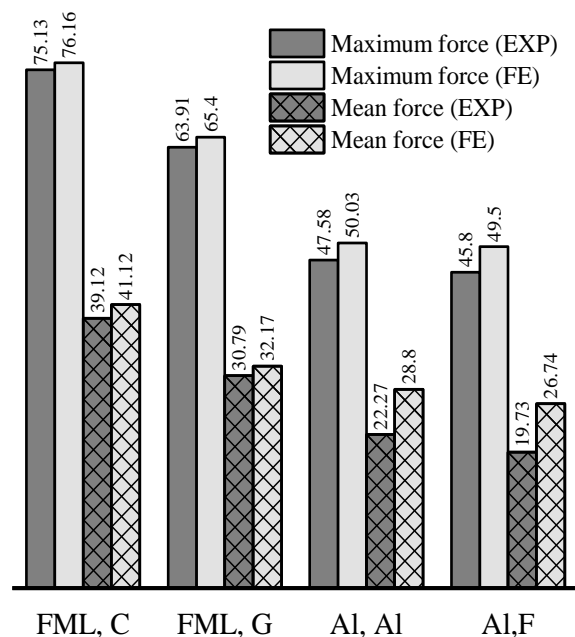


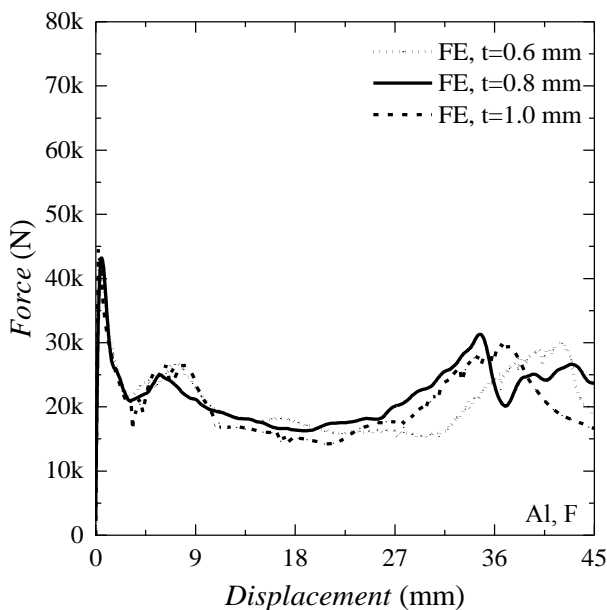
Fig. 12 Comparison of experimental and FE results of Maximum force and mean force of each code (All forces are in kN)

شکل 12 نیروی متوسط لهیدگی و بیشینه نیروی اولیه برای نمونه‌های آزمایش شده (نیروها به کیلو نیوتن)

مقادیر پیش‌بینی‌شده CFE برای تمامی نمونه‌ها با ضخامت لایه میانی متفاوت در شکل 17 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، برای FML, C بهترین عملکرد مربوط به ضخامت 0.8 میلی‌متر است که به ترتیب 6.9% و 1.7% از ضخامت‌های 0.6 و 1 میلی‌متر بهتر است. برای FML, G مقدار بهبود برای ضخامت 0.8 میلی‌متر به ترتیب 6.15% و 0.7% بیش از ضخامت‌های 0.6 و 1 میلی‌متر است. Al, Al با ضخامت 0.8 میلی‌متر به ترتیب 7.7% و 0.6% عملکرد بهتری را نسبت به ضخامت‌های 0.6 و 1 میلی‌متر نشان می‌دهد. در نهایت برای Al, F با اختلاف 10.81% و 1.5% نسبت به ضخامت 0.6 و 1 میلی‌متر، نمونه با ضخامت لایه میانی 0.8 عملکرد مطلوب‌تری را نشان می‌دهد.

به‌منظور حذف اثر جرم در تحلیل مقادیر انرژی‌های جذب‌شده، مقادیر SEA برای نمونه‌های مختلف با ضخامت‌های لایه میانی 0.6، 0.8 و 1 میلی‌متر در شکل 18 نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد برای تمامی نمونه‌ها عملکرد جذب انرژی با سه لایه با ضخامت یکسان از دیگر حالات بهتر است.

سرانجام، با توجه به شکل 17 و شکل 18 و نمودارهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که اگر ضخامت هر سه لایه تشکیل‌دهنده نمونه یکسان باشد، بیشترین نیروی متوسط لهیدگی و نیرو بیشینه در این حالت به دست خواهد آمد. به‌عبارت‌دیگر، در صورتی که ضخامت لایه میانی با لایه‌های بیرونی و درونی متفاوت باشد عملکرد جذب انرژی بهینه نخواهد بود.

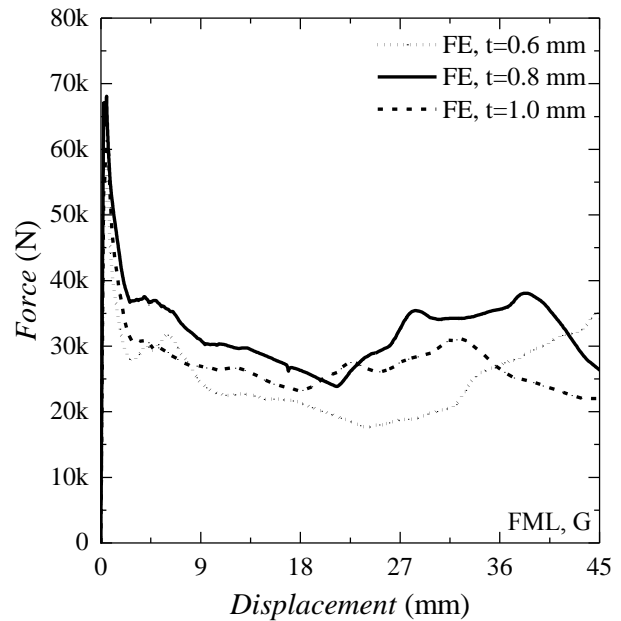


**Fig. 16** FE force-displacement curves of Al, F for different middle layer thickness

شکل 16 نمودار نیروی لهیدگی مستخرج از شبیه‌سازی عددی برای نمونه Al, F و ضخامت‌های مختلف لایه میانی

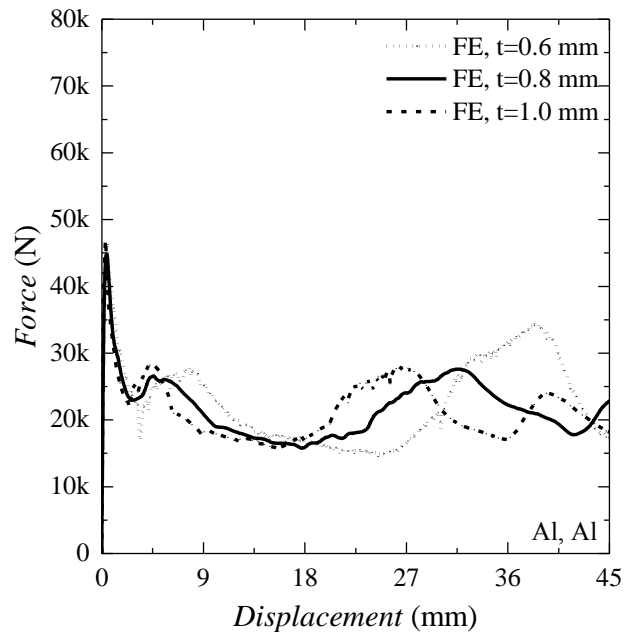
##### 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جذب انرژی نمونه‌های جدار نازک با مقطع مربعی ساخته شده از ورق‌های فلزی الیافی تحت بارگذاری فشاری محوری، مطالعه شده است.



**Fig. 14** FE force-displacement curves of FML, G for different middle layer thickness

شکل 14 نمودار نیروی لهیدگی مستخرج از شبیه‌سازی عددی برای نمونه FML, G و ضخامت‌های مختلف لایه میانی



**Fig. 15** FE force-displacement curves of Al, Al for different middle layer thickness

شکل 15 نمودار نیروی لهیدگی مستخرج از شبیه‌سازی عددی برای نمونه Al, Al و ضخامت‌های مختلف لایه میانی

با افزایش جایجایی فک‌ها بعد از چین‌خوردگی اول، بار دیگر نیرو افزایش‌یافته تا به مقدار بیشینه دوم برسد. نیروی بیشینه دوم شروع چین‌خوردگی بعدی در نمونه را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه در نمودارهای فوق با یکدیگر قابل‌مقایسه بوده اما بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌هایی است که به ترتیب SEA و CFE بیشتری را دارا می‌باشند [29].

- نمونه با لایه میانی شیشه-اپکسی به میزان 28 و 35 درصد به ترتیب نسبت به آلومینیوم و فوم افزایش جذب انرژی بر واحد جرم را نشان می‌دهد.
- بیشینه مقدار نیرو اولیه و همچنین، نیروی متوسط بیشینه در حالتی رخ خواهد داد که ضخامت هر سه لایه به صورت یکسان در نظر گرفته شود. این موضوع همچنین باعث شده که چین‌خوردگی‌ها در نمونه به صورت یکنواخت‌تری صورت پذیرفته و قابلیت جذب انرژی در آن افزایش یابد.

## 6-مراجع

- [1] Alghamdi, A. A. A., "Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview" *Thin-Walled Structures*, Vol. 39, No. 2, pp. 189-213, 2001.
- [2] Saathoff, D. G., "Energy Absorbing Vehicle Doors", to Google Patents, 1994.
- [3] Tavassoli, N. Darvizeh, A. Darvizeh, M. and Sabet, S. A. R., "Analytical and Experimental Investigation into the Crushing Behavior of Hat Shaped Composite Energy Absorber" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, 2015. (In Persian)
- [4] Ahmad, Z. Abdullah, M. R. and Tamin, M. N., "Experimental and Numerical Studies of Fiber Metal Laminate (Fml) Thin-Walled Tubes under Impact Loading" *Mechanical and Materials Engineering of Modern Structure and Component Design*, Vol. 70, pp. 433-443, 2015.
- [5] Zhen, C., "Review on the Dynamic Impact Characteristics of Fiber Metal Laminates", *Journal of Advanced Review on Scientific Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-11, 2015.
- [6] Olabi, A. G. Morris, E. and Hashmi, M., "Metallic Tube Type Energy Absorbers: A Synopsis", *Thin-Walled Structures*, Vol. 45, No. 7, pp. 706-726, 2007.
- [7] Mamalis, A. G. Robinson, M., Manolakos, D. E. Demosthenous, G. A. Ioannidis, M. B. and Carruthers, J., "Crashworthy Capability of Composite Material Structures" *Composite Structures*, Vol. 37, No. 2, pp. 109-134, 1997.
- [8] Abramowicz, W., "Thin-Walled Structures as Impact Energy Absorbers", *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 2-3, pp. 91-107, 2003.
- [9] Reid, S. R., "Plastic Deformation Mechanisms in Axially Compressed Metal Tubes Used as Impact Energy Absorbers" *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 35, No. 12, pp. 1035-1052, 1993.
- [10] Ghamarian, A. Zarei, H. R. and Abadi, M. T., "Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled End-Capped Conical Tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 10, pp. 1312-1319, 2011.
- [11] Song, J. Chen, Y. and Lu, G., "Light-Weight Thin-Walled Structures with Patterned Windows under Axial Crushing", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 66, pp. 239-248, 2013.
- [12] Tajdari, M. Azimi, M. Khorram, M. and Jam, J. E., "Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Triangular Cutout Subject to Axial Compression" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 24-37, 2013. (In Persian)
- [13] Pirmohammad, S. Nikkha, H. and Sobhan, E., "Experimental and Numerical Study on the Collapse Behavior of Double Walled Tubes Reinforced with inside Ribs under Dynamic Axial Loading" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 347-358, 2016. (In Persian)
- [14] Damghani, N. M. Hatami, H. and Ghodsbin, J. A., "Experimental Investigation of Expanded Metal Tube Absorber under Axial Impact Loading" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 371-378, 2015. (In Persian)
- [15] Azarazfa, R. Davar, A. and Mahmoodi, A., "Three-Point Bending Test of Metal and Composite Sandwich Panels with Grid Stiffened Core", 2017.
- [16] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "An Experimental Investigation into the Effect of Surface-Modified Silica Nanoparticles on the Mechanical Behavior of E-Glass/Epoxy Grid

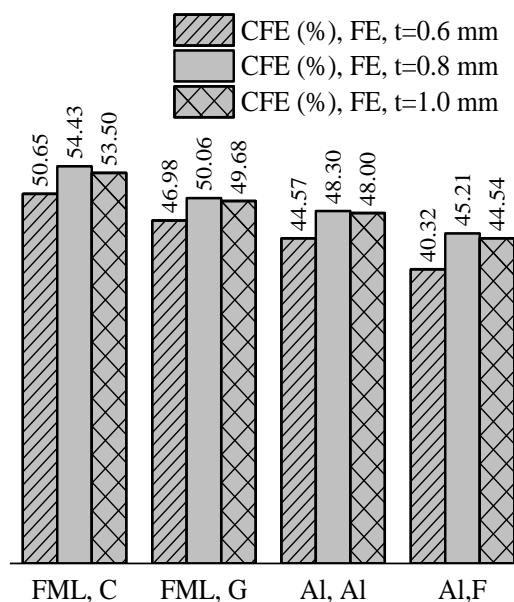


Fig. 17 CFE compression of all specimen for middle layer thickness of 0.6, 0.8 and 1.0 mm

شکل 17 نمودار درصد بازدهی نیروی له‌شدگی (CFE) برای نمونه‌های مختلف با ضخامت لایه میانی 0.6، 0.8 و 1 میلی‌متر

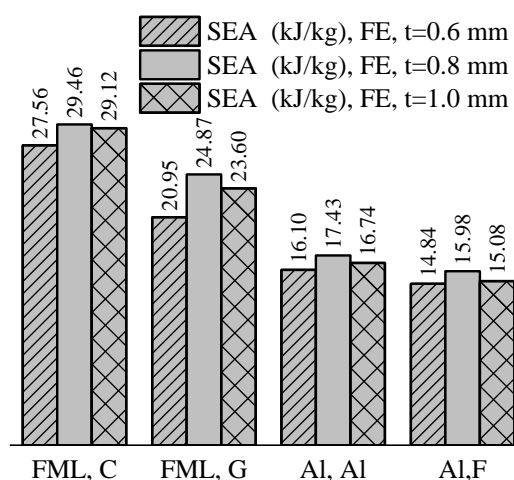


Fig. 18 SEA compression of all specimen for middle layer thickness of 0.6, 0.8 and 1.0 mm

شکل 18 نمودار انرژی جذب‌شده بر واحد جرم (SEA) برای نمونه‌های مختلف با ضخامت لایه میانی 0.6، 0.8 و 1 میلی‌متر

اثر ضخامت لایه میانی با تغییر آن از ماده مرکب شیشه-اپکسی، کربن-اپکسی، فوم پولی‌یورتان و آلومینیوم 2024 به صورت تجربی و عددی بررسی و مطالعه شده است. نتایج پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- در حالت شبه استاتیکی نمونه فلزی الیافی با لایه میانی کربن-اپکسی بیشترین نیروی متوسط لهیدگی (39.12 کیلو نیوتن) و بیشترین مقدار جذب انرژی بر واحد جرم (27.94 ژول بر کیلوگرم) نسبت به بقیه نمونه‌ها دارا می‌باشد.
- نمونه با لایه میانی کربن-اپکسی به میزان 50، 43 و 21 درصد به ترتیب نسبت به فوم، آلومینیوم و شیشه-اپکسی افزایش جذب انرژی بر واحد جرم را نشان می‌دهد.



- Composite Panels under Transverse Loading“, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2016.
- [17] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standard, 2001.
- [18] “The Official Site of the European New Car Assessment Programme“, Accessed; <http://www.euroncap.com/en>.
- [19] Mallick, P. K., “Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design“, CRC press, 2007.
- [20] Abrate, S., “Impact Engineering of Composite Structures“, Springer Science & Business Media, 2011.
- [21] Murugan, R. Ramesh, R. and Padmanabhan, K., “Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates“, Procedia Engineering, Vol. 97, pp. 459-468, 2014.
- [22] Duleba, B. and Greskovic, F., “Simulation of Loading the Polymer/Carbon Fiber Composites and Prediction of Safety Factors“ International Journal of Engineering and Innovative Technology, Vol. 2, No. 8, pp. 2277-3754, 2013.
- [23] Pederson, J., “Finite Element Analysis of Carbon Fiber Composite Ripping Using Abaqus“ Master of Science Thesis, Clemson University, 2006.
- [24] Kashfi, M. Majzoobi, G. Bonora, N. Iannitti, G. Ruggiero, A. and Khademi, E., “A Study on Fiber Metal Laminates by Using a New Damage Model for Composite Layer“, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 131, pp. 75-80, 2017.
- [25] Nikkhah, H. Guo, F. Chew, Y. Bai, J. Song, J. and Wang, P., “The Effect of Different Shapes of Holes on the Crushing Characteristics of Aluminum Square Windowed Tubes under Dynamic Axial Loading“ Thin-Walled Structures, Vol. 119, pp. 412-420, 2017.
- [26] Zhang, X. Leng, K. and Zhang, H., “Axial Crushing of Embedded Multi-Cell Tubes“, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 131-132, pp. 459-470, 2017.
- [27] Chahardoli, S. and Alavi Nia, A., “Experimental and Numerical Investigations on Collapse Properties of Capped-End Frusta Tubes with Circular Triggers under Axial Quasi-Static Loading“ International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 134, pp. 545-561, 2017.
- [28] Graciano, C. Martínez, G. and Smith, D., “Experimental Investigation on the Axial Collapse of Expanded Metal Tubes“ Thin-Walled Structures, Vol. 47, No. 8, pp. 953-961, 2009.
- [29] Alavi Nia, A. and Akhavan Attar, A., “The Effect of Different Layouts in Internal and External Stiffeners on the Energy Absorption of Thin-Walled Structures with Square Sections“ Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 997-1010, 2017.





## بررسی کمانش ورق‌های مرکب لایه‌ای متعامد تحت شرایط حرارتی و رطوبتی با اعمال آسیب جداشدگی لایه‌ها به روش نوار محدود

فرشاد گودرزبان<sup>1</sup>، حسین اموشاهی<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان  
2- استادیار، مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان  
\* اصفهان، صندوق پستی 73441-81746، [h.amoushahi@eng.ui.ac.ir](mailto:h.amoushahi@eng.ui.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مقاله تأثیر تغییرات شرایط محیطی از جمله درجه حرارت و رطوبت محیط بر بار کمانشی ورق‌های لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور با در نظر گرفتن اثرات تغییر مشخصات مصالح تشکیل دهنده ورق در اثر دما و رطوبت بر ظرفیت کمانش ورق در شرایط تکیه گاهی مختلف و بارگذاری دو محوره ارزیابی شده است. همچنین تأثیر آسیب جدا شدگی لایه‌ها بر ظرفیت کمانش ورق در حالت‌های مختلف بررسی شده است. روش مورد استفاده جهت محاسبه بار بحرانی ورق‌ها روش نوار محدود بوده که تئوری برشی مرتبه اول بر آن اعمال شده است. در روش نوار محدود از توابع شکل مثلثاتی در جهت طولی نوار و توابع شکل هرمیتی در جهت عرضی برای جابجایی‌های برون صفحه و توابع شکل خطی برای جابجایی‌های درون صفحه استفاده شده است. برای مدل سازی جدا شدگی لایه‌ها، محل و ابعاد جداشدگی با جدا سازی المان‌ها و بازایی مجدد ماتریس‌های سختی استاندارد، هندسی، نیرویی و جرمی تعیین شده و اثر آن‌ها بر میزان بار بحرانی ورق لایه‌ای در حالت‌های گوناگون ارزیابی شده است. نتایج حاصله بیانگر میزان تغییرات بار بحرانی در دما و رطوبت‌های مختلف و همچنین میزان تأثیر جدا شدگی لایه‌ها می‌باشد</p>	<p>دریافت: 96/8/3 پذیرش: 96/10/13</p> <p><b>کلیدواژگان:</b> کمانش ورق لایه‌ای روش نوار محدود تغییرات دما و رطوبت جداشدگی</p>

## Buckling analysis of composite cross-ply laminated plates under hygrothermal loads with delaminations using the finite strip method

**Farshad Goodarziyan, Hossein Amoushahi\***

Department of civil and transportation engineering, University of Isfahan. Isfahan, Iran.  
\* P.O.B. 81746-73441, Isfahan, Iran, [h.amoushahi@eng.ui.ac.ir](mailto:h.amoushahi@eng.ui.ac.ir)

### Keywords

Buckling  
Composite plates  
Finite strip method  
Hygrothermal loads  
Delamination

### Abstract

In this paper the effect of hygrothermal conditions such as temperature and moisture on buckling of composite laminated plates is investigated. For this purpose, the effect of changing in material characteristics with changing in temperature and moisture on buckling capacity of plates with different end conditions and biaxial loading is evaluated. In addition, the effect of delamination of layers on buckling load of plate is studied in different situations. The finite strip method is used in present paper to calculate the critical load of plate considering first shear order deformation theory. In finite strip formulation for evaluating the displacement field of each strip, the trigonometric shape functions is used in longitudinal direction and the Hermitian and linear shape function is used for out of plate and in plane transverse direction, respectively. The place and dimension of delaminating layers is modeled by separating the adjacent elements and reconstructing the standard, geometric, force and mass matrices, so, the critical load of laminated plates is calculated in different situation. The results show that the amount of changing in critical load of laminated plate for different temperatures, moistures and delamination of layers.

می‌توانند بصورت زوایای 0 و 90 درجه روی یکدیگر قرار گیرند که ورق‌های مرکب حاصله در هر حالت رفتار متفاوتی را از خود بروز می‌دهد.

کمانش ورق‌های مرکب یکی از موضوعات مهم در طراحی سازه‌های متشکل از مواد مرکب می‌باشد. عموشاهی و ازهری در سال 2009 میلادی، روش نوار محدود را برای پیش بینی کمانش‌های موضعی، تغییر شکلی و جانبی ورق‌های کامپوزیت FRP، معرفی نمودند. هر ورق تحت تأثیر ترکیبات بار محوری، خمشی و برشی قرار می‌گرفت. توابع شکل در راستای طولی برای تحلیل کمانش در تمامی مودها به صورت سینوسی در نظر گرفته شد و توابع چند جمله‌ای برای جهات عرضی مورد استفاده قرار گرفت. تنش و لنگر بحرانی برای کلیه مقاطع I- شکل، قوطی و ناودانی تحت بارهای محوری و

### 1-مقدمه

ماده مرکب مخلوط فیزیکی از دو یا چند ماده مختلف است که این مواد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و مرز مشخصی را با یکدیگر تشکیل می‌دهند. این مخلوط در مجموع و با توجه به برخی معیارها، خواص بهتری از هریک از اجزای تشکیل دهنده خود را دارا می‌باشد. ورق مرکب مجموعه‌ای از لایه‌های روی هم انباشته شده بوده که در جهت بدست آمدن سختی و ضخامت مورد نظر طراحی می‌گردند. به عنوان مثال لایه‌های تک جهته می‌توانند طوری قرار گیرند که تماماً در یک جهت باشند. همچنین

**Please cite this article using:**

Goodarziyan, F. and Amoushahi, H., "Buckling analysis of composite cross-ply laminated plates under hygrothermal loads with delaminations using the finite strip method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 437-450, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

سه مود اول فرکانس ورق مرکب در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار گرفت [14]. النفاذ روش اجزاء محدود سه بعدی را برای تحلیل دینامیکی ورق‌های مرکب تقویت شده با فیبر مورد استفاده قرار داد. ورق‌های تقویت شده با فیبر تحت اثر آسیب جدایشی ورق‌ها نیز قرار داشتند. از طی این مقاله فرکانس طبیعی و تغییر مکان‌های ورق مرکب را محاسبه کرده و موارد مختلفی از بابت نسبت ابعادی و خصوصیات آسیبی متفاوت را مورد بررسی قرار داد. مدل او دارای نتایجی مطابق با نتایج آزمایشگاهی بود و این موضوع نشان دهنده دقت بالای مدل مورد بررسی وی بود. مدل او دارای المان‌های مستطیلی هشت گره‌ای بود و ورق مورد بررسی او از نوع ورق نازک بود [15]. پارهی و همکاران طی مطالعه‌ای ورق چندلایه را با نظر گرفتن آسیب جدایش لایه‌ها بصورت تصادفی مورد تحلیل دینامیکی قرار دادند. در این مدل تغییر مکان هر زیر لایه‌ای بر اساس تغییر مکان میان صفحه‌ای لیمینیت اصلی برای محاسبه سختی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارهی و همکاران در مطالعه محل قرارگیری جدایش زیر لایه‌ها بدین نتیجه رسیدند که کمترین فرکانس ورق مرکب در حالتی رخ می‌دهد که جدایش در میان صفحه قرار داشته باشد و بیشترین میزان فرکانس ارتعاشی زمانی بدست می‌آید که آسیب جدایشی در سطح ورق مرکب قرار گرفته باشد. نسبت بعد به ضخامت ورق مرکب نیز در حالات مختلف جدایشی مورد بحث قرار گرفته شد. در بین مدل‌های بررسی شده این محققان، ورق با نسبت بعد به ضخامت 10 دارای بیشترین فرکانس و ورق با نسبت بعد به ضخامت 100 به کمترین میزان فرکانس رسید [16].

استفاده از روش نوار محدود برای تحلیل استاتیکی، پایداری و دینامیکی ورق‌ها، علی‌الخصوص ورق‌های مستطیلی، به عنوان یک روش سریع و دقیق مد نظر محققان قرار گرفته است. گودرزیان و عموشاهی فرکانس ارتعاش آزاد ورق‌های لایه‌ای با و بدون اثر جدایشی لایه‌ها را بررسی کردند [17]. همچنین تغییر شکل و بار کمانشی وابسته به زمان صفحات مستطیلی و یسکو الاستیک توسط عموشاهی به روش نوار محدود ارزیابی شده و نتایج برای مواد پلیمری به صورت نمودارهایی ارائه شدند [18,19]. ورزندیان و ضیایی، پاسخ تحلیلی ارتعاش آزاد غیرخطی نانو ورق مستطیلی با شرایط مرزی مختلف را مورد بررسی قرار داده و خورشیدی و همکاران تاثیرات محیط حرارتی بر ارتعاشات آزاد ورق مستطیلی از جنس مواد تابعی را مورد مطالعه قرار دادند و اثر عواملی از قبیل نسبت ابعاد و دما را روی ارتعاش ورق تجزیه و تحلیل نمودند [20,21].

در بخش بعدی به استخراج روابط برای حل مسئله، تئوری حاکم بر مسئله و نهایتاً روابط نوار محدود بدست آمده پرداخته می‌شود و سپس صحت سنجی به همراه نتایج بدست آمده ارائه می‌گردد.

## 2- استخراج روابط

در این بخش ابتدا با بررسی تئوری حاکم بر مسئله به بررسی چگونگی تغییر مکان‌ها و کرنش‌های مدل پرداخته می‌شود و سپس کرنش‌ها بر اساس تغییر مکان‌ها بیان می‌گردند و در آخر روابط نیرو- تغییر مکان مورد نیاز بررسی می‌گردد.

### 2-1- تئوری حاکم بر مسئله

در تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول خطوط نرمال عرضی پس از تغییر شکل عمود بر صفحات میانی قرار نمی‌گیرند. این موضوع منجر به منظور نمودن تغییرات کرنش‌های برشی در ضخامت ورق می‌گردد. در این تئوری

خمشی، با استفاده از حل مقادیر ویژه، محاسبه گردید. آن‌ها در نهایت تنش بحرانی را برای نسبت‌های مختلف  $E_x/E_y$  با استفاده از منحنی‌های طراحی، بدست آوردند [1]. لی ضریب کمانش را به عنوان تابعی از نسبت بال به جان، با حل دقیق و روش تقریبی انرژی معرفی نمود [2]. او حل خود را برای مقاطع ارتوتروپیک با تکیه گاه ساده و گیردار توسعه داد [3]. هر دو نوع کمانش محلی و کلی برای ستون‌های اف آر پی ضخیم، با شرایط تکیه گاهی مختلف، توسط لی و هوسن مورد مطالعه قرار گرفت [4].

بنکس و رودز رفتار کمانشی و پس کمانشی ورق مرکب را برای مقاطع I- شکل و قوطی، با این فرض که هر مقطع، از ورق‌های متصل شده به وسیله تکیه گاه‌های مقید در چرخش ساخته شده، مورد مطالعه قرار دادند [5,6]. لپاتین و مرزو، ورق مرکب را در حالی مورد تحلیل قرار دادند که در دو جهت موازی دارای تکیه گاه مفصلی، در یک جهت تکیه گاه گیردار و در جهت دیگر آزاد بود. آن‌ها کمانش ورق مستطیلی را در این شرایط تکیه گاهی مورد بررسی قرار داده و معادلات تغییرات کمانش را با استفاده از اصل لاگرانژ و تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول نوشتند. مدل این تحقیق شامل تیری بصورت طره‌ای از جنس ورق لایه‌ای، که تحت بار گسترده قرار داشت، مورد بررسی قرار گرفت. تیر آن‌ها متشکل از هسته مرکزی و جداره‌های خارجی با مشخصات مکانیکی متفاوت از یکدیگر بود. آن‌ها تیر مورد مطالعه را در حالات مختلف ضخامت هسته مرکزی مورد تحلیل قرار دادند و بار بحرانی کمانش را برای تیر در هر حالت بدست آورده و با نتایج تئوری مقایسه نمودند. طبق نتایج بدست آمده آن‌ها بار بحرانی کمانش تیر با افزایش ضخامت هسته مرکزی افزایش پیدا می‌کند. آن‌ها ورق مورد مطالعه خود را در حالت SSCF بهینه سازی کرده و برای هر بار بحرانی کمانش، ضخامت هسته مرکزی، ضخامت جداره‌های خارجی و وزن حداقل مواد مورد استفاده در این شرایط را محاسبه نمودند و نسبت بهره‌وری به هر حالت اختصاص دادند [7].

جدایشی لایه‌های ورق مرکب یکی از آسیب‌هایی بوده که ممکن است در حین ساخت و یا هنگام بهره برداری از ورق مرکب طی شرایط محیطی خاص و یا بارگذاری ناگهانی ایجاد شود. در سال‌های اخیر بسیاری از مطالعات ورق معطوف به آسیب جدایشی بین لایه‌های ورق گردیده، از اولین مطالعات در این خصوص، می‌توان به مطالعه دلا و شو در خصوص ارتعاش ورق اشاره نمود [8]. تنک، مطالعه این آسیب را در رنج گسترده‌ای از فرکانس‌ها، بر اساس تئوری الاستیسیته سه بعدی برای ورق مرکب، به انجام رساند [9]. جو با استفاده از روش اجزاء محدود که بر اساس تئوری میندیلین رابطه بندی گردیده بود، به مطالعه تأثیر این آسیب بر رفتار دینامیکی ورق، پرداخت [10]. چمپنلی و همکاران، سه نوع مختلف کامپوزیت با زمینه گرافیت را با جایگذاری جدایش ورق‌ها در گوشه‌ها و لبه‌های مدل خود بررسی کردند [11]. هو و جرومینیدیس در سال 1999، این مطالعه را بر روی ورق‌های ضخیم انجام داده و تست‌های آزمایشگاهی مختلف در خصوص ارتعاش آزاد ورق به انجام رساندند [12]. شیاو و ژنگ تأثیر عامل جدایشی لایه‌های ورق را بر ارتعاش آزاد ورق مرکب به شکل مستطیل در شرایط تکیه گاهی ساده مورد تحقیق قرار دادند. مدل آن‌ها توسط روش نوار محدود با در نظر گرفتن سختی‌های داخل صفحه‌ای و خمشی در حالت ارتعاش مورد تحلیل قرار گرفت [13]. کومار و همکاران ورق‌های مرکب تحت اثر آسیب جدایشی لایه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. روش تحلیلی آن‌ها روش اجزاء محدود با المان چهارگوش 9 گره‌ای بود و ورق دچار جدایش در موده‌های مختلف ارتعاشی توسط آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه این محققان انواع آسیب‌های جدایشی با مساحت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و

در مدل ارائه شده مطابق شکل 2، رابطه‌ای بین نیروها، ماتریس صلبیت و کرنش‌ها نوشته می‌شود. رابطه کلی نیرو-کرنش برای این ورق مرکب که تحت اثر شرایط افزایش حرارت و رطوبت محیط قرار دارد، بصورت رابطه (3) می‌باشد.

$$\{F\} = [D]\{\varepsilon\} - \{F^N\} \quad (3)$$

در رابطه (3)،  $D$  ماتریس صلبیت و  $\varepsilon$  کرنش هر نقطه از ورق می‌باشد. بردار نیروهای داخلی  $F$  و بردار نیروهای حرارتی و رطوبتی تحت عنوان  $F^N$  طی روابط (4) و (5) در نظر گرفته می‌شود.

$$\{F\} = \{N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y\}^T \quad (4)$$

$$\{F^N\} = \{N_x^N, N_y^N, N_{xy}^N, M_x^N, M_y^N, M_{xy}^N, 0, 0\}^T \quad (5)$$

در روابط (4) و (5)، مقادیر ماتریس  $F$  شامل  $N_x, N_y, N_{xy}$  که نیروهای داخل صفحه‌ای در واحد عرض و  $M_x, M_y, M_{xy}$  که لنگرهای در واحد عرض هستند، می‌باشد. پارامترهای  $Q_x$  و  $Q_y$  نیز نیروهای برشی ورق مرکب در واحد عرض می‌باشند. همچنین پارامترهایی که با بالانویس ( $N$ ) مشخص گردیده‌اند، مقادیر نیروهای داخلی حاصل از تغییر درجه حرارت و درصد رطوبت محیط می‌باشند که هر کدام در ادامه تعریف می‌گردند.

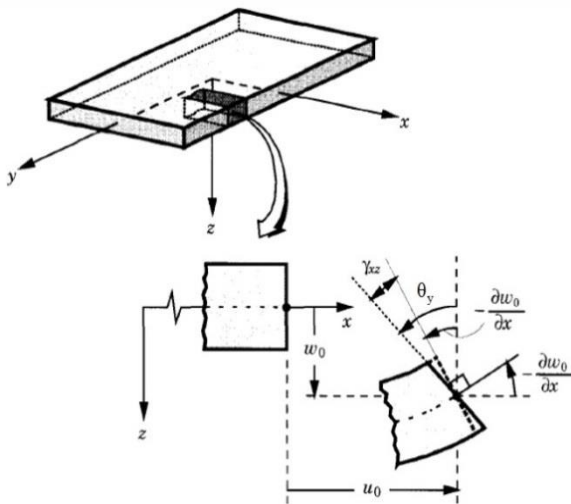


Fig. 1 Deformation of plate edge according to FSDT [17]

شکل 1 لبه ورق بعد از تغییرشکل طبق تئوری تغییرشکل مرتبه اول [17]

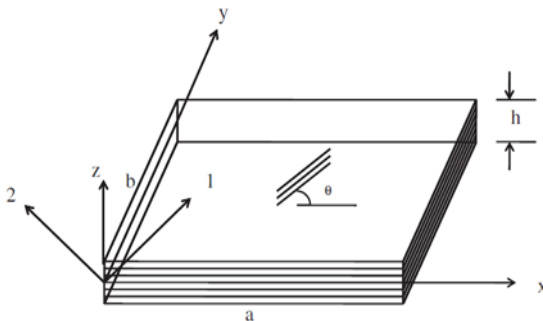


Fig. 2 Coordinate system of laminated plate [22]

شکل 2 سیستم مختصات ورق مرکب [22]

کرنش‌های در نظر گرفته شده شامل کرنش‌های اصلی، انحناء و چرخش‌های هر نقطه بوده که به کمک رابطه (6) بیان می‌شوند.

مؤلفه  $w$  مستقل از ضخامت بوده و براین اساس پارامترهای جابجایی به مطابق رابطه (1) می‌باشند.

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\theta_y(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\theta_x(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (1)$$

که  $u_0, v_0$  و  $w_0$  به ترتیب مؤلفه‌های جابجایی نقطه‌ای روی میان صفحه ورق در امتداد محورهای  $x, y$  و  $z$  و  $\theta_x$  و  $\theta_y$  به ترتیب چرخش صفحات عمود بر میان صفحه، حول محورهای  $x$  و  $y$  هستند. شکل 1 تغییرات وضعیت لبه ورق را قبل و بعد از تغییرشکل بر اساس تئوری تغییرشکل مرتبه اول به نمایش می‌گذارد. بدین ترتیب رابطه کرنش‌ها با جابجایی‌ها بصورت رابطه (2) تعریف می‌گردند.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{yz}^{(0)} \\ \gamma_{xz}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{yz}^{(1)} \\ \gamma_{xz}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} + \theta_x \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \theta_y \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \\ \frac{\partial \theta_x}{\partial y} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial \theta_y}{\partial y} + \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

با توجه به رابطه (2)، کرنش‌های در راستای محورهای  $x$  و  $y$  در امتداد ضخامت ورق لایه‌ای بصورت خطی تغییر می‌کنند، در حالی که کرنش‌های برشی  $\gamma_{yz}$  و  $\gamma_{xz}$  در امتداد ضخامت ورق توزیع ثابتی دارند و در نتیجه تنش‌های برشی نظیر آن‌ها نیز ثابت می‌باشند. بر طبق تئوری تیرهای همگن، توزیع تنش‌های برشی  $\sigma_{zx}$  و  $\sigma_{yz}$  در امتداد ضخامت تیر به صورت سهمی می‌باشد. بنابراین در تیرها و ورق‌های کامپوزیت لایه‌ای، این تنش‌های برشی باید حداقل توابع درجه دو از مختصه  $z$  باشند. این مغایرت بین حالت تنش واقعی و حالت تنش ثابت در نظر گرفته شده در تئوری مرتبه اول، اغلب توسط یک ضریب اصلاح برش برطرف می‌شود. این ضریب به گونه‌ای محاسبه می‌شود که انرژی کرنشی ناشی از تنش‌های برشی بدست آمده در این تئوری با انرژی کرنشی ناشی از تنش‌های برشی پیش بینی شده از تئوری الاستیسیته سه بعدی برابر شود. ضریب اصلاح برش، برای یک ورق کامپوزیت لایه‌ای به خواص و مشخصات هندسی ورق و نیز شرایط مرزی بستگی دارد.

## 2-2- روابط نیرو-تغییر مکان

شکل 2، ورق مرکب در نظر گرفته شده را در مختصات کلی قرارگیری مدل و همچنین مختصات محلی در نظر گرفته شده هر لایه به نمایش می‌گذارد. ابعاد ورق و ضخامت ورق در شکل 2 قابل مشاهده هستند.

محیط بوده  $T_0$  و  $T$  به ترتیب درجه حرارت اولیه و ثانویه محیط بر حسب درجه کلوین هستند.

### 3-2- روابط کرنش خطی و غیر خطی بر حسب تغییر مکان

بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، کرنش‌ها به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می‌گردند. کرنش‌های خطی بصورت کرنش‌های طولی، عرضی، چرخش‌ها و انحناء‌های مدل، بصورت رابطه (14) ارائه می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{,x}^0 \\ v_{,y}^0 \\ u_{,y}^0 + v_{,x}^0 \\ \theta_{y,x} \\ -\theta_{x,y} \\ \theta_{y,y} - \theta_{x,x} \\ \theta_y + w_{,x} \\ -\theta_x + w_{,y} \end{bmatrix} \quad (14)$$

مقادیر  $u_x^0$  و  $v_y^0$  مشتقات تغییر مکان‌ها نسبت به اندیس‌های  $x$  و  $y$  بوده و  $u$ ،  $v$  و  $w$  تغییر مکان‌ها در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشد. همچنین  $\theta_x$  و  $\theta_y$  چرخش‌های ورق در جهات عمود بر محورهای  $y$  و  $x$  هستند. با این فرض که پارامتر  $w$  در جهت  $z$  تغییر نمی‌کند، روابط کرنش غیر خطی بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، بصورت رابطه (15) تعریف می‌گردند.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xnl} \\ \varepsilon_{ynl} \\ \gamma_{xynl} \\ \gamma_{xznl} \\ \gamma_{yznl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(u_{,x}^2 + v_{,x}^2 + w_{,x}^2) \\ \frac{1}{2}(u_{,y}^2 + v_{,y}^2 + w_{,y}^2) \\ (u_{,x}u_{,y} + v_{,x}v_{,y} + w_{,x}w_{,y}) \\ (u_{,x}u_{,z} + v_{,x}v_{,z}) \\ (u_{,y}u_{,z} + v_{,y}v_{,z}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 4-2- روش نوار محدود

برای هر خط از نوار تحلیلی روش نوار محدود در هر مود، پنج درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود که در شکل 3 نشان داده شده است. با در نظر گرفتن توابع هارمونیک در جهت طولی نوار و توابع شکل خطی در جهت عرض نوار، روابط (16)، برای تغییر مکان هر نوار بدست می‌آید.

$$\begin{cases} u_s = \sum_{n=1}^r [N_1 \quad N_2] N_3 \begin{Bmatrix} u_{1n} \\ u_{2n} \end{Bmatrix} \\ v_s = \sum_{n=1}^r [N_1 \quad N_2] N_4 \begin{Bmatrix} v_{1n} \\ v_{2n} \end{Bmatrix} \\ w_s = \sum_{n=1}^r [N_1 \quad N_2] N_3 \begin{Bmatrix} w_{1n} \\ w_{2n} \end{Bmatrix} \\ \theta_{x_s} = \sum_{n=1}^r [N_1 \quad N_2] N_4 \begin{Bmatrix} \theta_{x1n} \\ \theta_{x2n} \end{Bmatrix} \\ \theta_{y_s} = \sum_{n=1}^r [N_1 \quad N_2] N_3 \begin{Bmatrix} \theta_{y1n} \\ \theta_{y2n} \end{Bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

بر اساس رابطه بین  $\varepsilon_s$  و  $\delta_s$ ، ماتریس  $B_s$  برای هر نوار در مود  $n$  ام از مدل تحلیلی مطابق رابطه (17) بدست می‌آید.

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, \kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}\}^T \quad (6)$$

مقادیر  $\varepsilon_x^0$ ،  $\varepsilon_y^0$  و  $\gamma_{xy}^0$  کرنش‌های داخل صفحه‌ای میان ضخامت  $\kappa_x$ ،  $\kappa_y$  و  $\kappa_{xy}$  انحناء‌های ورق و همچنین  $\gamma_{xz}$  و  $\gamma_{yz}$  کرنش‌های برشی ورق هستند. در ادامه رابطه (7)، فرم کلی ماتریس صلبیت  $D$  را به نمایش می‌گذارد.

$$[D] = \begin{bmatrix} A & B & 0 \\ B & d & 0 \\ 0 & 0 & S \end{bmatrix} \quad (7)$$

درایه‌های ماتریس  $D$  شامل ماتریس‌های صلبیت محوری  $(A)$ ، صلبیت محوری-خمشی  $(B)$ ، صلبیت خمشی  $(d)$  و صلبیت برشی  $(S)$  بوده که هر کدام طبق رابطه‌های (8) و (9) تعریف می‌گردند.

$$(A_{ij}, B_{ij}, d_{ij}) = \sum_{k=1}^m \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\overline{Q}_{ij})_k (1, z, z^2) dz, \quad (8)$$

$$i, j = 1, 2, 6 \quad (S_{ij}) = \sum_{k=1}^m \alpha (\overline{Q}_{ij})_k dz, \quad i, j = 4, 5 \quad (9)$$

در روابط (8) و (9)،  $m$  تعداد لایه‌ها و ضریب تصحیح برشی  $\alpha$  به علت توزیع کرنش برشی در ضخامت اعمال می‌گردد. ماتریس  $\overline{Q}_{ij}$  مربوط به صلبیت در جهت مختصات کلی مدل بوده و ماتریس  $Q_{ij}$  مربوط به صلبیت مدل در جهت مختصات محلی می‌باشد که بر اساس مشخصات مکانیکی مدل از جمله مدول الاستیسیته و مدول پواسون و با در نظر گرفتن زاویه قرارگیری لایه‌ها محاسبه می‌شوند [17].

از سوی دیگر درایه‌های ماتریس  $F^N$  شامل نیروها و لنگرهای غیر مکانیکی حاصل از شرایط رطوبتی و حرارتی بر اساس روابط (10) و (11) محاسبه می‌گردند.

$$\{N_x^N, N_y^N, N_{xy}^N\} = \sum_{k=1}^m \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\overline{Q}_{ij})_k (e)_k dz \quad (10)$$

$$\{M_x^N, M_y^N, M_{xy}^N\} = \sum_{k=1}^m \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\overline{Q}_{ij})_k (e)_k z dz \quad (11)$$

در روابط (10) و (11)، بردار  $e$  به عنوان کرنش غیر مکانیکی ورق مرکب بوده و برای هر لایه با زاویه  $\bar{\theta}_k$  به فرم رابطه (12) تعریف می‌گردد.

$$\{e\}_k = [T] \{\beta_1, \beta_2\}_k^T (C - C_0) + [T] \{\alpha_1, \alpha_2\}_k^T (T - T_0) \quad (12)$$

$$\{e\}_k = \{e_x, e_y, e_{xy}\}_k^T$$

در رابطه (12)، ماتریس  $T$  بر اساس زاویه هر لایه بصورت جداگانه محاسبه گردیده و در محاسبه بردار  $e$ ، مطابق با رابطه فوق، برای هر لایه در نظر گرفته می‌شود. ماتریس  $T$  به فرم رابطه (13) تعریف می‌گردد.

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 \\ n^2 & m^2 \\ -2mn & 2mn \end{bmatrix}, m = \cos \bar{\theta}_k, n = \sin \bar{\theta}_k \quad (13)$$

در رابطه (13) پارامترهای  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضرایب رطوبتی در جهت‌های طولی و جانبی و پارامترهای  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  ضرایب حرارتی در جهت‌های طولی و جانبی هستند که جهت محاسبه ماتریس کرنش غیر مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.  $C_0$  و  $C$  در رابطه (13) به ترتیب رطوبت اولیه و رطوبت ثانویه

با در نظر گرفتن  $N_4 = \sin \frac{n\pi y}{a}$ ،  $N_3 = \frac{x}{b}$ ،  $N_2 = 1 - \frac{x}{b}$ ،  $N_1 = 1 - \frac{x}{b}$  و  $N_4 = \sin \frac{n\pi y}{a}$  ماتریس  $\mathbf{B}_s^n$  و متعاقب آن ماتریس سختی استاندارد به صورت نشان داده شده در روابط (18) تا (20) قابل نگارش هستند [17].

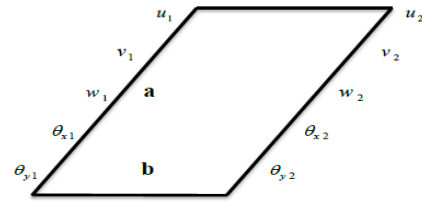


Fig. 3 Degrees of freedom of each strip in each mode

شکل 3 درجه های آزادی هر نوار در روش نوار محدود برای هر مود

$$\mathbf{K} = \iint \mathbf{B}_s^T \mathbf{D} \mathbf{B}_s dx dy \quad (18)$$

$$\mathbf{B}_s = [\mathbf{B}_s^1 \quad \mathbf{B}_s^2 \quad \dots \quad \mathbf{B}_s^r] \quad (19)$$

در ادامه رابطه سختی هندسی نوشته محاسبه می‌شود. که در آن ماتریس‌های  $\mathbf{G}_s$  و  $\mathbf{S}$  برحسب نیروهای داخلی و میدان جابجایی به صورت نشان داده شده در روابط (23) و (24) قابل محاسبه هستند [17].

$$\mathbf{K}_g^n = \iint \mathbf{G}_s \mathbf{S} \mathbf{G}_s dx dy \quad (21)$$

$$\mathbf{K}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_g^1 & & & & \\ & \mathbf{K}_g^2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & & \mathbf{K}_g^r \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_s = \mathbf{B}_s^n \boldsymbol{\delta}_s \Rightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \hat{\varepsilon}_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}_{8 \times 1} = \mathbf{B}_s^{n \times 8 \times 5} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{y1} \\ \theta_{x1} \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \theta_{y2} \\ \theta_{x2} \end{bmatrix}_{10 \times 1} \quad (17)$$

$$\mathbf{B}_s^n = \begin{bmatrix} N_1'N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_1'N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1N_4' & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2N_4' & 0 & 0 & 0 \\ N_1N_3' & N_1'N_4 & 0 & 0 & 0 & N_2N_3' & N_2'N_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_1'N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2'N_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_1N_4' & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2N_4' \\ 0 & 0 & 0 & N_1N_3' & N_1'N_4 & 0 & 0 & 0 & N_2N_3' & N_2'N_4 \\ 0 & 0 & N_1'N_3 & N_1N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2'N_3 & N_2N_3 & 0 \\ 0 & 0 & N_1N_3' & 0 & N_1N_4 & 0 & 0 & 0 & N_2N_3' & 0 & N_2N_4 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} N_x & N_{xy} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_x & M_{xy} & 0 & Q_x \\ N_{xy} & N_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{xy} & M_y & 0 & Q_y \\ 0 & 0 & N_x & N_{xy} & 0 & 0 & -M_x & -M_{xy} & 0 & 0 & 0 & -Q_x \\ 0 & 0 & N_{xy} & N_y & 0 & 0 & -M_{xy} & -M_y & 0 & 0 & 0 & -Q_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_x & N_{xy} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_{xy} & N_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_x & -M_{xy} & 0 & 0 & \frac{N_x h^2}{12} & \frac{N_{xy} h^2}{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{xy} & -M_y & 0 & 0 & \frac{N_{xy} h^2}{12} & \frac{N_y h^2}{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} N_1'N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2'N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_1N_3' & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2N_3' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1'N_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2'N_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1N_4' & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2N_4' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_1'N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2'N_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_1N_3' & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2N_3' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_1'N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2'N_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_1N_3' & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2N_3' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_1'N_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2'N_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_1N_4' & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2N_4' \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

### 6-2- روند تحلیل ورق مرکب

در این مقاله، تحلیل ورق مرکب تحت بارهای ناشی از حرارت و رطوبت در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول با استفاده از روابط (5) و (10) تا (12) بردار  $F^N$  محاسبه شده و سپس بردار  $P^N$  بر مبنای رابطه (25) تعیین می‌گردد. پس از آن بر اساس رابطه (18) ماتریس سختی استاندارد محاسبه شده و با روی هم‌گذاری ماتریس‌های بار و سختی هر نوار ماتریس‌های مذکور برای کل ورق حاصل می‌شود. سپس با اعمال شرایط مرزی در لبه‌های ورق بردار تغییر مکان اولیه ( $\delta$ ) در هر نوار به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta = K^{-1}P^N \quad (28)$$

در ادامه با استفاده از تغییر مکان‌های بدست آمده و به کمک توابع شکل در رابطه (16)، کرنش‌های هر نقطه از ورق به کمک رابطه (17) محاسبه می‌شود. در مرحله دوم تحلیل، با استفاده از کرنش‌های محاسبه شده در مرحله اول و بکارگیری رابطه (1)، بردار نیروهای داخلی ایجاد شده تحت تأثیر تغییرات درجه حرارت و رطوبت در هر نقطه بر اساس مختصات آن تعیین می‌شود. سپس ماتریس  $S$  به کمک رابطه (23) و ماتریس سختی هندسی به وسیله رابطه (22) برای هر نوار محاسبه می‌شوند. با انجام مراحل مذکور و تشکیل ماتریس سختی هندسی برای کل ورق اعمال قیود مربوط به شرایط مرزی بار بحرانی کمانش ورق مرکب بر اساس حل مقادیر ویژه زیر حاصل خواهد شد:

$$\det |K - K_g| = 0 \quad (29)$$

شایان ذکر است که انجام دو مرحله‌ای تحلیل ورق مرکب باعث خواهد شد تا نیروهای داخلی ایجاد شده ناشی از اثر حرارت و رطوبت به طور دقیق در تمام نقاط ورق محاسبه شود که این امر در محاسبه بار بحرانی ورق جدا شده به حصول نتایج دقیق‌تری منجر خواهد شد [17].

### 3-صحت سنجی

در این مطالعه جنس ورق‌های مرکب از نوع الیاف شیشه بافته شده در زمینه اپوکسی می‌باشد. این ورق لایه‌ای در حالت کلی شامل 16 لایه، که ضخامت هر لایه 0.375 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. این لایه‌ها مجموعاً، ورق مرکبی به ضخامت 6 میلی‌متر تشکیل می‌دهند. ورق مرکب اولیه بصورت مربعی در نظر گرفته شده و بعد از آن 0.235 میلی‌متر می‌باشد. در اولین مدل بررسی شده، فیبرهای تمامی لایه‌های ورق دارای زوایای یکسان و به زاویه صفر درجه هستند. با افزایش درجه حرارت محیط از 300 کلوین به 375 کلوین، مدول الاستیسیته و مدول برشی ورق مرکب از جنس شیشه و اپوکسی مطابق با جدول 1 تغییر می‌نماید و همچنین با تغییرات درصد رطوبت محیط نیز، ورق فوق‌الذکر دارای تغییراتی در مدول الاستیسیته و برشی به شرح جدول 2 می‌باشد.

جداول 3 و 4 مربوط به محاسبات فرکانس طبیعی، بر اساس دو روش نوار محدود و اجزاء محدود و مقایسه این اعداد با نتایج حاصله از عملیات آزمایشگاهی و تئوری پندا و همکاران می‌باشد.

در ادامه ورق مرکبی متشکل از چهار لایه با زوایای 0، 90، 90 و 0 درجه برای صحت سنجی نتایج بدست آمده با نتایج سایر محققان، ارزیابی می‌گردد. نسبت طول به عرض ورق مورد نظر 1 و نسبت بعد به ضخامت آن 100 می‌باشد. ویتنی و همکاران [24]، سای رم و سینها [25] و پارهی و همکاران [22] این مدل را که از جنس کربن-اپوکسی می‌باشد، مورد تحلیل

برداری نیروهای ناشی از حرارت و رطوبت در هر نوار نیز مطابق رابطه (25)، برای هر نوار محاسبه می‌گردد.

$$P^N = \iint B_s^T F^N dx dy \quad (25)$$

### 2-5- اثر جدشدگی لایه‌های ورق مرکب

جدایش لایه‌های ورق مرکب یکی از آسیب‌های محتمل بر ورق مرکب می‌باشد که ممکن است در فرآیند تولید یا بر اثر ضربه یا بارگذاری خاصی حاصل گردد. در این وضعیت ورق در قسمتی از سطح مقطع دچار تفکیک شده که ورق مرکب را به دو یا چند زیر لایه تبدیل می‌کند. برای نمونه یک نمونه از جدشدگی لایه‌ها در شکل 4 نشان داده شده است که در آن  $Z_{0dl}$  بیانگر مختصات مرکز زیر لایه‌ای است که از پس از جدا شدگی ایجاد می‌شود. به عبارتی ورق در بالا و پایین ناحیه جدا شده به تعدادی زیرلایه تقسیم می‌شود که لازم است ماتریس  $D$  که  $[D]_t$  نشان داده می‌شود برای هر یک مجدداً بازنویسی شود.

برای این منظور با برقراری همسازي در مرزهای اتصال ورق به زیر لایه‌ها و یکسان کردن مقادیر جابجایی نقاط در آن‌ها، بردار نیروهای داخلی نشان داده شده در رابطه (4) برای هر زیرلایه بر حسب درجات آزادی مربوط به آن زیر لایه مجدداً نوشته شده و ماتریس‌های  $[A]_t$ ،  $[B]_t$ ،  $[d]_t$  و  $[S]_t$  برای هر زیر لایه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب می‌توان گفت که برای ورق مرکب در مرز جدایش و برای هر زیر لایه یک ماتریس  $[D]_t$  جداگانه و برای نواحی سالم ماتریس  $D$  مشابه با حالت قبل یعنی رابطه (7) در نظر گرفته می‌شود. ماتریس  $[D]_t$  برای هر زیرلایه جدا شده طبق رابطه (26) بدست می‌آید [16,22].

$$[D]_t = \begin{bmatrix} A_{ij} & z_t^0 A_{ij} + B_{ij} & 0 \\ B_{ij} & z_t^0 B_{ij} + d_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & S_{ij} \end{bmatrix} \quad (26)$$

درایه‌های ماتریس  $[D]_t$  بر اساس مشخصات هر زیر لایه و با در نظر گرفتن انتگرال روی تمام ضخامت زیر لایه محاسبه گردیده و طبق ماتریس فوق‌جانمایی می‌گردد.

$$\begin{aligned} [A_{ij}]_t &= \int_{-\frac{h_t+z_t^0}{2}}^{\frac{h_t+z_t^0}{2}} [Q_{ij}] dz \\ [B_{ij}]_t &= \int_{-\frac{h_t+z_t^0}{2}}^{\frac{h_t+z_t^0}{2}} [Q_{ij}] (z - z_t^0) dz \\ [d_{ij}]_t &= \int_{-\frac{h_t+z_t^0}{2}}^{\frac{h_t+z_t^0}{2}} [Q_{ij}] (z - z_t^0)^2 dz \\ [S_{ij}]_t &= \int_{-\frac{h_t+z_t^0}{2}}^{\frac{h_t+z_t^0}{2}} [Q_{ij}] dz \end{aligned} \quad (27)$$

شایان ذکر است که منظور از زیر لایه مجموعه‌ای از چند لایه بوده که بین مرزهای جدا شده قرار می‌گیرند. بر این اساس  $Z_t^0$  مختصات مرکز زیر لایه و  $h_t$  ضخامت زیر لایه نام آن می‌باشد.

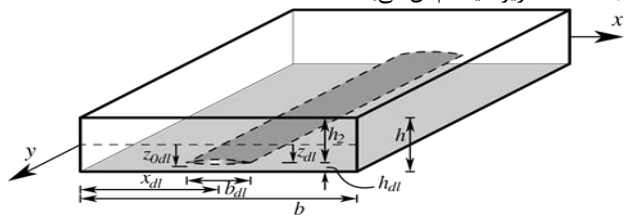


Fig. 4 Delamination model

شکل 4 مدل جدشدگی



**جدول 5** مقایسه ضریب بدون بعد فرکانس حاصله از تحلیل ورق لایه‌ای با زوایای 0/90/90/0 درجه در حرارت 325 کلون و درصد رطوبت 10% با نتایج سایر محققین

**Table 5.** Comparing the non-dimensional frequency of laminated 0/90/90/0 plates under  $T=325^{\circ}\text{K}$  and  $C=10\%$

مرجع [22]	مرجع [25]	مرجع [24]	تحقیق حاضر
8.068	8.046	8.088	8.08
9.411	9.393	9.429	9.43

**جدول 6** مقایسه فرکانس طبیعی (Hz) حاصله از تحلیل ورق مرکب چهار طرف مفصل همراه با درصد جدایشی لایه‌ای 6.25% در درجه حرارت‌های مختلف

**Table 6.** Comparing the natural frequency of composite laminated plates with SSSS boundary conditions and 6.25% delamination in different temperatures

حرارت (کلون)	350	325	300
روش آزمایشگاهی در مرجع [21]	281	261	244
روش عددی در مرجع [21]	277	265	242
تحقیق حاضر	304	275	240

در ادامه به بررسی بار بحرانی کمانش تحت شرایط مختلف محیطی (حرارتی و رطوبتی) پرداخته می‌شود و با در نظر گرفتن هفت نوع بارگذاری مختلف (نسبت‌های متفاوت بار بحرانی کمانش در راستای محور  $y$  به بار بحرانی کمانش در راستای  $x$ ) نتایج مقایسه می‌گردند.

#### 4- بررسی بار بحرانی کمانش

در این بخش به بررسی تغییرات بار بحرانی کمانش در اثر تغییرات شرایط مختلف رطوبتی و حرارتی پرداخته می‌شود. مدل اولیه، یک ورق لایه‌ای با مشخصات  $b = 235\text{mm}$  و  $a = 235\text{mm}$ ،  $m = 16$ ،  $h = 6\text{mm}$  در هفت وضعیت بارگذاری مختلف شامل  $N_x = N_x = 0.33N_y$ ،  $N_y = 0$ ،  $N_x = 3N_y$ ،  $N_x = N_y$ ،  $N_x = 2N_y$ ،  $0.5N_y$  در تمامی حالات دمای اولیه  $T_0 = 300^{\circ}\text{K}$  و رطوبت اولیه برابر با  $C_0 = 0\%$  فرض شده است. در نمودارهای رسم شده در این بخش از ضرایب بدون بعد کمانش ورق در جهات  $x$  و  $y$  مطابق با روابط (31) و (32) استفاده گردیده است:

$$K_1 = \frac{N_{xcr} b^2 \times 12(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{\pi^2 E_2 h^3} \quad (31)$$

$$K_2 = \frac{N_{ycr} b^2 \times 12(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{\pi^2 E_2 h^3} \quad (32)$$

مطابق با شکل 5، با افزایش بار  $N_y$  از صفر به  $0.33N_x$ ، بار بحرانی کمانش  $N_x$  برای حالت 300 درجه کلون، به میزان 24.79 درصد کاهش می‌یابد. به همین ترتیب با افزایش بار  $N_y$  به نسبت 0.5، 1، 2 و 3 برابری  $N_x$ ، بار بحرانی کمانش  $N_{xcr}$  به ترتیب به میزان 33.47 درصد، 50 درصد، 66.69 درصد و 75.04 درصد کاهش می‌یابد. درصد کاهش بار بحرانی کمانش بر اثر افزایش درجه حرارت از 300 کلون تا 375 کلون، برای حالت  $N_y = 0$  برابر 28.7 درصد و برای نسبت‌های 0.33، 0.5، 1، 2 و 3 از  $N_y$  به  $N_x$  به میزان 28.42 درصد می‌باشد.

در جدول 7 نیز تغییرات بار بحرانی کمانش در بارگذاری‌های مختلف و تحت اثر افزایش درصد رطوبت از 0 تا 75 درصد برای یک ورق لایه‌ای چهار طرف مفصل ارائه شده است.

دینامیکی قرار دادند. این محققان ورق مرکب را در مرحله اول، در درجه حرارت 325 درجه کلون و در مرحله دوم در درصد رطوبت 10% مورد بررسی کردند که نتایج آن در جدول 5، ارائه شده و با نتایج حاصل از تحقیق حاضر مقایسه شده است. در این جدول مقادیر بدون بعد فرکانس طبیعی  $\bar{\omega}$  بر اساس رابطه (30) محاسبه شده است.

$$\bar{\omega} = \omega b^2 \sqrt{\frac{\rho}{E_2 h^2}} \quad (30)$$

که در آن،  $b$  عرض ورق،  $h$  ضخامت آن،  $E_2$  مدول الاستیسیته در راستای عرضی و  $\omega$  فرکانس طبیعی ارتعاش آزاد ورق است. نتایج حاصل در جداول 3 تا 5 بیان‌گر صحت نتایج حاصله است.

همچنین جهت صحت سنجی نتایج بدست آمده برای ورق دارای جدا شدگی لایه‌ها، جدول 6 برای مقایسه نتایج ورق دچار جداشدگی با نتایج حاصله از تحقیق پندا و همکاران برای ورق دارای جداشدگی 6.25 درصد ارائه می‌گردد.

**جدول 1** تغییرات مدول الاستیسیته و برشی با افزایش درجه حرارت محیط در ورق شیشه- اپوکسی [22]

**Table 1.** Changing in elasticity and shear modulus of glass/epoxy composite plate with temperature [22]

دما (کلون)	375	350	325	300
$E_1$ (GPa)	13.21	14.93	15.39	15.4
$G_{12}$ (GPa)	3.48	3.51	3.54	3.56

**جدول 2** تغییرات مدول الاستیسیته و برشی با افزایش درصد رطوبت محیط در ورق شیشه- اپوکسی [22]

**Table 2.** Changing in elasticity and shear modulus of glass/epoxy composite plate with moisture [22]

رطوبت (%)	75	50	25	0
$E_1$ (GPa)	13.17	14.69	15.38	15.4
$G_{12}$ (GPa)	3.47	3.49	3.53	3.56

**جدول 3** مقایسه نتایج فرکانس طبیعی (Hz) در اثر افزایش درجه حرارت محیط در حالت چهار طرف مفصل، با نتایج آزمایشگاهی و عددی سایر محققین

**Table 3.** Comparing the natural frequency (Hz) of SSSS plates under temperature changing

دما (کلون)	375	350	325	300
روش آزمایشگاهی در مرجع [23]	269	291	304	318
روش عددی در مرجع [23]	270	291	306	320
تحقیق حاضر	261	293	314	331

**جدول 4** مقایسه نتایج فرکانس طبیعی (Hz) در اثر افزایش درصد رطوبت محیط در حالت چهار طرف مفصل، با نتایج آزمایشگاهی و عددی سایر محققین

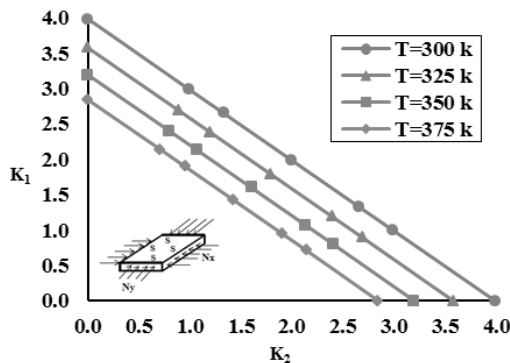
**Table 4.** Comparing the natural frequency (Hz) of SSSS plates under moisture changing

رطوبت (%)	75	50	25	0
روش آزمایشگاهی در مرجع [23]	280	279	292	321
روش عددی در مرجع [23]	260	291	300	322
تحقیق حاضر	225	268	304	331

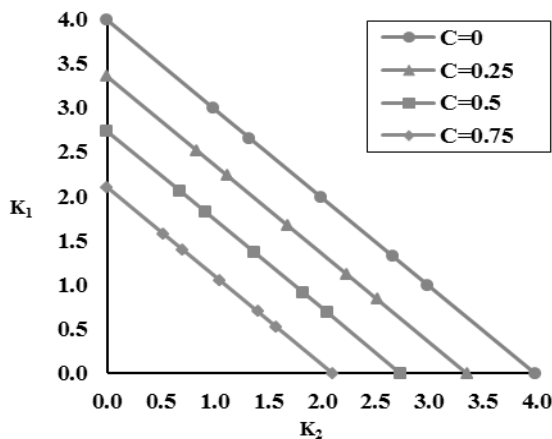
تغییر شرایط بارگذاری از نسبت صفر به سه  $N_y/N_x$  به ترتیب به میزان 19.78 درصد، 27.34 درصد، 43.22 درصد، 60.6 درصد و 70.58 درصد از تحلیل بدست آورده شده است.

جدول 8 مربوط به تغییرات بار بحرانی کمانش بر اثر افزایش درصد رطوبت در شش بارگذاری مذکور می‌باشد. درصد تغییرات بار بحرانی در اثر تغییرات رطوبتی از 0 تا 75 درصد در بارگذاری‌ها به ترتیب 26.7 درصد، 29.9 درصد، 29.9 درصد، 30 درصد و 28.2 درصد می‌باشد.

در شکل‌های 9 و 10 تغییرات بار بحرانی  $N_x$  و  $N_y$  برای شش بارگذاری مختلف، بر حسب یکدیگر ترسیم شده است. شکل 8 مربوط به درجه حرارت‌های 300 کلوین تا 375 کلوین و شکل 9 مربوط به درصد رطوبت‌های 0 تا 75 درصد برای حالت تکیه گاهی دو طرف مفصل و دو طرف گیردار می‌باشد.



**Fig. 6** Interaction curves of  $N_x$  and  $N_y$  for different temperatures (SSSS) شکل 6 تغییرات بار بحرانی کمانش  $N_x$  ورق مرکب بر حسب بار بحرانی کمانش  $N_y$  و در اثر افزایش درجه حرارت برای ورق چهار طرف مفصل

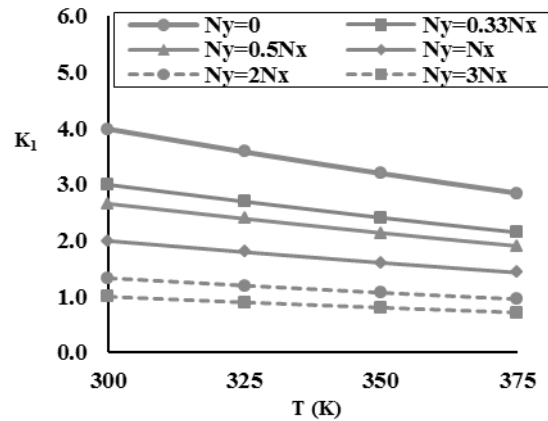


**Fig. 7** Interaction curves of  $N_x$  and  $N_y$  for different temperatures (SSSS) شکل 7 تغییرات بار بحرانی کمانش  $N_x$  ورق مرکب بر حسب بار بحرانی کمانش  $N_y$  و در اثر افزایش درصد رطوبت محیط برای ورق چهار طرف مفصل

جدول 8 مقادیر بار بحرانی کمانش ( $K_1$ ) ورق مرکب در بارگذاری‌های مختلف و تحت درصد رطوبت‌های متفاوت، برای ورق دو طرف مفصل و دو طرف گیردار

**Table 8.** Buckling factor of SCSC composite plates under different loads and moistures

75	50	25	0	رطوبت (%)
6.42	6.80	7.27	7.81	$N_y=0$
5.13	5.44	5.82	6.26	$N_y=0.33 N_x$
4.65	5.00	5.27	5.67	$N_y=0.5 N_x$
3.63	3.85	4.12	4.43	$N_y=N_x$
2.52	2.67	2.86	3.08	$N_y=2 N_x$
1.93	2.04	2.17	2.03	$N_y=3 N_x$



**Fig. 5** Changing in critical load of SSSS with temperature

شکل 5 بررسی تغییرات بار بحرانی کمانش ورق مرکب در بارگذاری‌های مختلف و در اثر افزایش درجه حرارت برای ورق چهار طرف مفصل

جدول 8 مقادیر بار بحرانی کمانش ( $K_1$ ) ورق مرکب در بارگذاری‌های مختلف و تحت درصد رطوبت‌های متفاوت، در وضعیت تکیه گاهی چهار طرف مفصل

**Table 7.** Buckling factor of composite SSSS plates under different loads and moistures

75	50	25	0	رطوبت (%)
2.10	2.73	3.35	3.99	$N_y=0$
1.58	2.06	2.52	2.99	$N_y=0.33 N_x$
1.40	1.83	2.23	2.65	$N_y=0.5 N_x$
1.05	1.37	1.68	1.99	$N_y=N_x$
0.70	0.91	1.12	1.33	$N_y=2 N_x$
0.53	0.69	0.84	1.00	$N_y=3 N_x$

براساس جدول 7، میزان تغییرات بار بحرانی کمانش بر اثر افزایش درصد رطوبت از 0 تا 75 درصد به طور متوسط برای تمام بارگذاری‌ها به میزان 47.3 درصد می‌باشد. درصد تغییرات در سه مرحله کاهش درصد رطوبت از 0 تا 25 درصد، از 0.25 درصد تا 0.5 درصد و از 0.5 درصد تا 0.75 درصد به ترتیب برای بارگذاری اول 16.12 درصد، 22.17 درصد و 31.01 درصد است. در نمودارهای شکل‌های 5 و 6، تغییرات بار بحرانی کمانش  $N_x$  و  $N_y$  در درجه حرارت‌های 300 کلوین، 325 کلوین، 350 کلوین و 375 کلوین و رطوبت‌های 0، 25، 50 و 75 درصد به نمایش در آمده است. وضعیت تکیه گاهی بررسی شده دوم حالت دو طرف مفصل، دو طرف گیردار می‌باشد. در این حالت با بستن درجات آزادی  $u_L, v_L, w_L, \theta_{xL}, \theta_{yL}$  در سمت چپ لبه مدل و بستن درجات آزادی  $u_R, v_R, w_R, \theta_{xR}, \theta_{yR}$  در لبه سمت راست مدل وضعیت دو طرف مفصل و دو طرف گیردار اعمال می‌گردد. در این تحلیل، مدل از لایه‌های مربعی شکل با طول و عرض 0.235 متر، به تعداد 16 لایه تشکیل می‌گردد.

در شکل 8 تغییرات بار بحرانی کمانش  $N_x$  بر حسب افزایش درجه حرارت محیط به نمایش گذاشته شده است. تحلیل مقادیر این نمودار در شش بارگذاری مختلف در ضخامت یکسان و ابعاد یکسان تمامی مدل‌ها به روش نوار محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

همانطور که انتظار می‌رود با افزایش درجه حرارت محیط بار بحرانی کمانش در هر وضعیت بارگذاری دچار کاهش می‌گردد. بطور متوسط در شش بارگذاری به نمایش گذاشته شده در نمودار شکل 7، میزان کاهش بار بحرانی کمانش به میزان 9.5 درصد می‌باشد. همچنین میزان کاهش این بار بحرانی با

5- بررسی تأثیر مساحت جداشدگی لایه‌های ورق مرکب بر بار بحرانی کمانش

در این قسمت به بررسی اثر جداشدگی لایه‌های ورق مرکب که ممکن است بر اثر بار ناگهانی یا مونتاژ نامناسب بوجود آید، پرداخته می‌شود. در مدل بندی نوار محدود، ورق مرکب در محل دچار جداشدگی لایه‌ها، از یک ورق مرکب اصلی به دو یا چند زیر لایه تقسیم می‌گردد. برای مثال در حالت جداشدگی 6.25 درصد، دو نوار از 32 نوار مدل ورق مرکب در محل خود به دو زیر لایه با مشخصات مختلف تقسیم می‌گردند. در حالت جداشدگی 6.25 درصد و در وضعیتی که جدایش در مرکز سطح رخ داده است، دو نوارهای 16 و 17 به دو زیر لایه تقسیم گردیده و مجموعاً تعداد نوارها به 34 نوار تحلیلی تبدیل می‌گردد. در این قسمت با مدل کردن جداشدگی‌های 6.25 درصد و 12.5 درصد در روش نوار محدود و محاسبه ماتریس‌های سختی مربوطه، با حل مقادیر ویژه اقدام به محاسبه بار بحرانی کمانش در وضعیت‌های بدون جداشدگی و همچنین وضعیت‌های دارای جداشدگی می‌شود. در بررسی اولیه با مدل کردن ورق مرکب مربعی با بعد 235 میلی‌متر و تعداد 16 لایه و ضخامت کلی 6 میلی‌متر، جداشدگی 6.25 درصدی در لایه میانی ورق مرکب ایجاد می‌گردد و ماتریس‌های سختی مربوطه محاسبه می‌گردد (شکل 11).

در این بررسی شش بارگذاری متفاوت  $N_x = 0.33 N_y, N_y = 0$ ،  $N_x = 0.5 N_y, N_x = N_y, N_x = 2 N_y$  و  $N_x = 3 N_y$  در نظر گرفته می‌شود. شکل 12، مربوط به تغییرات بار بحرانی کمانش با افزایش درجه حرارت برای شش بارگذاری متفاوت، برای مدل‌های بدون جداشدگی و با جداشدگی 6.25 درصد در حالت چهار طرف مفصل می‌باشد. بر اساس این نمودار و داده‌های محاسبه شده بر اساس تحقیق حاضر، بار بحرانی کمانش از مدل بدون جداشدگی تا مدل جداشدگی 6.25 درصد بطور میانگین به میزان 16 درصد برای درجه حرارت 300 کلوین، 23.44 درصد برای درجه حرارت 325 کلوین، 32.6 درصد برای درجه حرارت 350 کلوین و 43.88 درصد برای درجه حرارت 375 کلوین کاهش دارد. همچنین در هر مرحله از افزایش بار  $N_y$ ، تغییرات بار بحرانی کمانش بر اثر اعمال جداشدگی به میزان کمتری نسبت به حالت قبل کاهش داشته است. بر اثر اعمال جداشدگی، تغییرات بار بحرانی کمانش نیز افزایش داشته است، بطوریکه برای مثال برای بارگذاری اول، با افزایش درجه حرارت از 300 کلوین تا 375 کلوین، در حالت بدون جداشدگی، 28.82 درصد و برای حالت جداشدگی 6.25 درصد، 52.09 درصد کاهش داشته است.

شکل 13 نیز مربوط به تغییرات بار بحرانی کمانش دو مدل جداشدگی بر اثر افزایش درصد رطوبت می‌باشد. در این حالت نیز بطور میانگین با تغییر مدل از حالت بدون جداشدگی به حالت دارای جداشدگی، برای درصد رطوبت 25، 28.77 درصد کاهش، برای درصد رطوبت 50، 46.9 درصد کاهش و برای درصد رطوبت 75، 77.1 درصد کاهش را مدل تجربه می‌نماید.

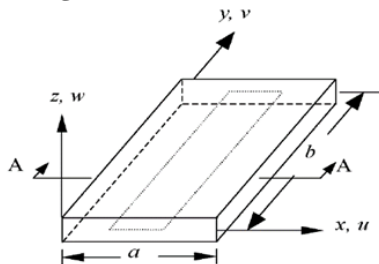


Fig. 11 Delamination of laminated plate

شکل 11 مدل جداشدگی ورق مرکب

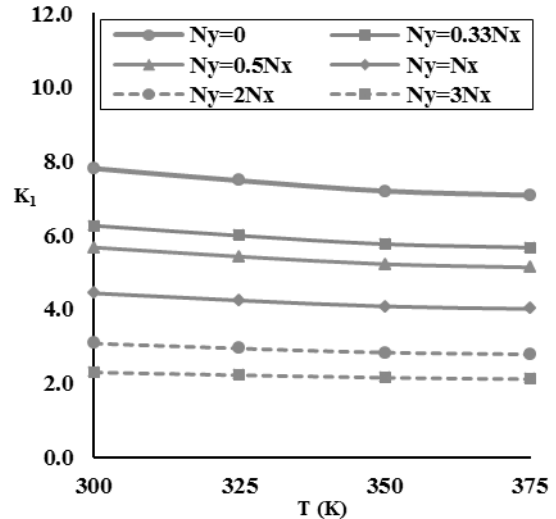


Fig. 8 Changing in critical load of SCSC with temperature

شکل 8 بررسی تغییرات بار بحرانی کمانش ورق مرکب در بارگذاری‌های مختلف و در اثر افزایش درجه حرارت برای ورق دو طرف مفصل و دو طرف گیردار

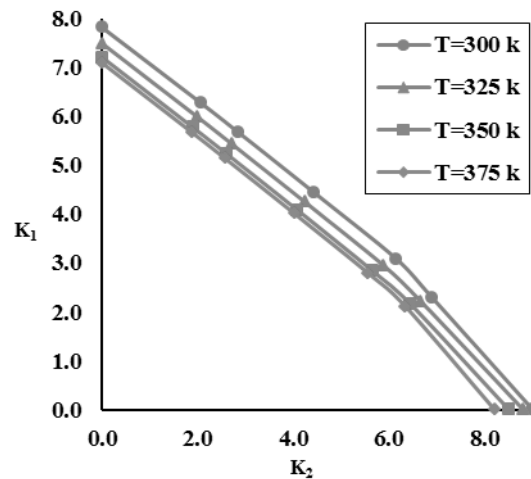


Fig. 9 Interaction curves of  $N_x$  and  $N_y$  for different temperatures (SCSC)

شکل 9 تغییرات بار بحرانی کمانش  $N_x$  ورق مرکب بر حسب بار بحرانی کمانش  $N_y$  و در اثر افزایش درجه حرارت برای ورق دو طرف مفصل و دو طرف گیردار

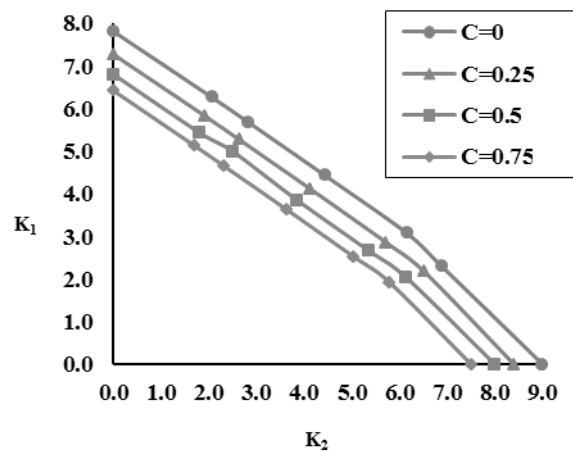


Fig. 10 Interaction curves of  $N_x$  and  $N_y$  for different moistures (SCSC)

شکل 10 تغییرات بار بحرانی کمانش  $N_x$  ورق مرکب بر حسب بار بحرانی کمانش  $N_y$  و در اثر افزایش درصد رطوبت برای ورق دو طرف مفصل و دو طرف گیردار

جداشدگی در راستای ضخامت همزمان با تغییر شرایط محیطی مطابق شکل‌های 14 و 15 به نمایش گذاشته می‌شود. نتایج حاصله نشان می‌دهد که حداقل فرکانس ارتعاش آزاد ورق‌ها در حالتی بدست می‌آید که جدا شدگی در لایه میانی رخ دهد و با فاصله گرفتن جداشدگی از وسط ضخامت میزان فرکانس ارتعاشی افزایش می‌یابد.

در این وضعیت یعنی حالت افزایش درصد رطوبت از 0 درصد تا 75 درصد نیز با اعمال مدل جداشدگی 6.25 درصد، ورق مرکب حساسیت بیشتری از خود بروز می‌دهد. بطوریکه در بارگذاری اول برای حالت بدون جداشدگی 47.36 درصد و برای حالت با جداشدگی 85.63 درصد کاهش را بر اثر افزایش درصد رطوبت از 0 تا 75 درصد تجربه می‌نماید. با در نظر گرفتن  $h$  به عنوان ضخامت کل ورق و  $h_2$  به عنوان فاصله محل جداشدگی از لبه (مطابق شکل 4)، تاثیر تغییر محل قرارگیری

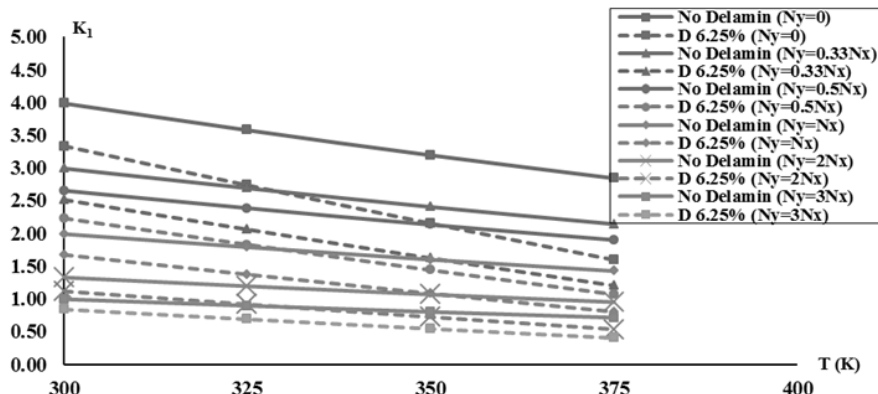


Fig. 12 Changing in critical load of SSSS laminated plates with temperature for no delamination and 6.25% delamination

شکل 12 بررسی تغییرات بار بحرانی کمانش دو مدل بدون جداشدگی و جداشدگی 6.25 درصد، بر اثر افزایش درجه حرارت در وضعیت چهار طرف مفصل

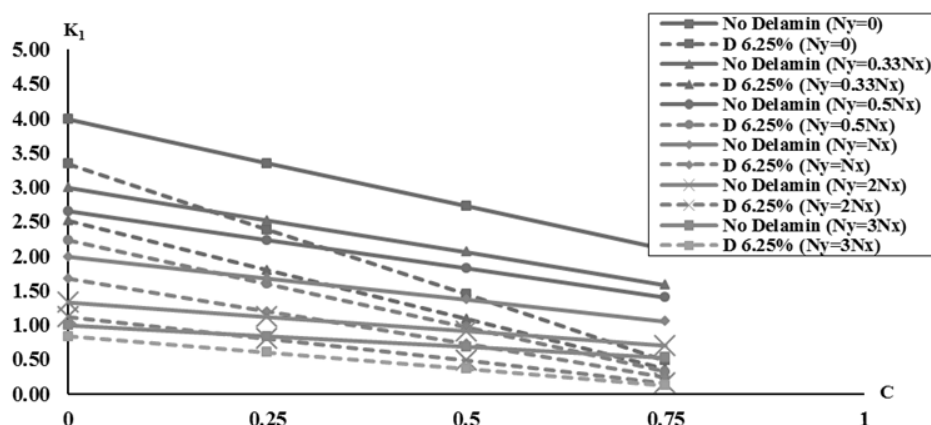


Fig. 13 Changing in critical load of SSSS laminated plates with moisture for no delamination and 6.25% delamination

شکل 13 بررسی تغییرات بار بحرانی کمانش دو مدل بدون جداشدگی و جداشدگی 6.25 درصد، بر اثر افزایش درصد رطوبت در وضعیت چهار طرف مفصل

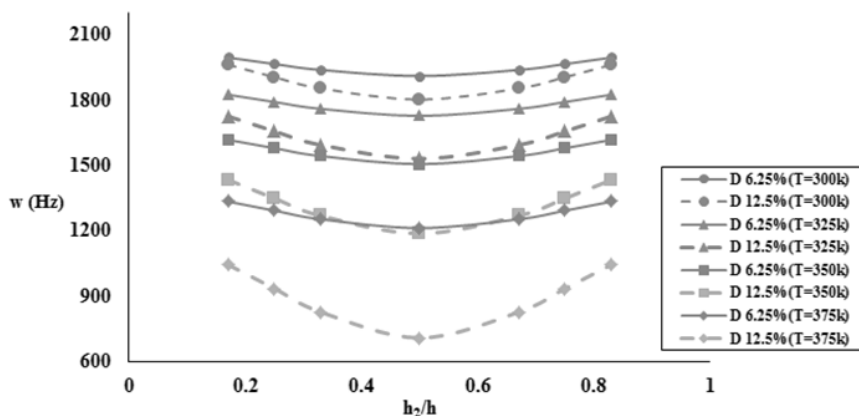


Fig. 14 Effect of vertical location of delamination in frequency of composite plate for 6,25% and 12,5% delamination in different temperatures (SSSS)

شکل 14 بررسی تأثیر محل عمودی قرارگیری جداشدگی بر فرکانس ورق مرکب برای جداشدگی‌های 6.25 درصد و 12.5 درصد در درجه حرارت‌های مختلف و در وضعیت تکیه گاهی چهار طرف مفصل

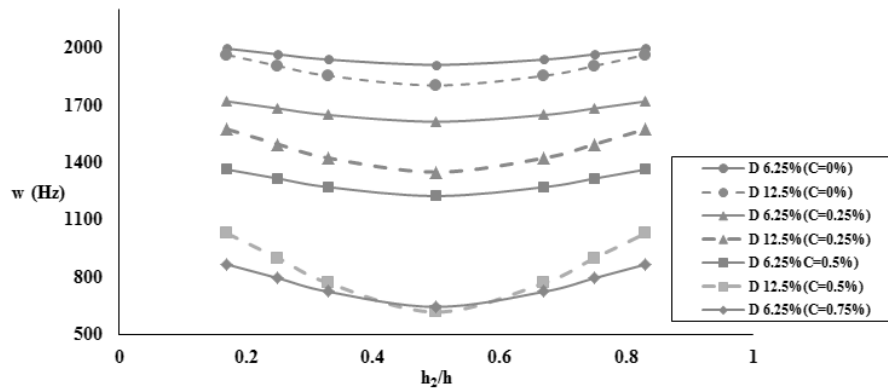


Fig. 15 Effect of vertical location of delamination in frequency of composite plate for 6,25% and 12,5% delamination in different moistures (SSSS)

شکل 15 بررسی تأثیر محل عمودی قرارگیری جداشدگی بر فرکانس ورق مرکب برای جداشدگی‌های 6,25 درصد و 12,5 درصد در رطوبت‌های مختلف و در وضعیت تکیه گاهی چهار طرف مفصل

می‌باشد. همچنین میزان کاهش این بار بحرانی با تغییر شرایط بارگذاری از نسبت صفر به سه برابر  $N_y/N_x$  به ترتیب به میزان 20 درصد، 27 درصد، 43 درصد، 61 درصد و 71 درصد از تحلیل بدست آورده شد.

درصد تغییرات بار بحرانی کمانش در اثر تغییرات رطوبتی از 0 تا 75 درصد در وضعیت CSCS در شش بارگذاری مختلف بطور میانگین 30 درصد می‌باشد.

تغییرات در وضعیت تکیه گاهی دو طرف مفصل و دو طرف گیردار به میزان 17 درصد برای تغییرات حرارتی و به میزان 26 درصد برای تغییرات رطوبتی، نسبت به وضعیت تکیه گاهی چهار طرف مفصل کمتر می‌باشد.

با بررسی محل رخ دادن جدا شدگی در راستای ضخامت مشاهده می‌شود که حداقل فرکانس ارتعاش آزاد ورق‌ها در حالتی بدست می‌آید که جدا شدگی در لایه میانی رخ دهد و با فاصله گرفتن جداشدگی از وسط ضخامت میزان فرکانس ارتعاشی افزایش می‌یابد.

### 6-نتیجه گیری

با توجه به تعدد اجرای سازه‌های متشکل از ورق‌های مرکب و تأثیرپذیری رفتار دینامیکی و پایداری آن‌ها از شرایط مختلف رطوبتی و حرارتی و همچنین رفتار دراز مدت این نوع سازه‌ها تحت آسیب‌های ناشی از مشکلات مونتاژ و بارگذاری، در این پژوهش، هدف بر بررسی پایداری ورق‌های مرکب تحت شرایط حرارتی و رطوبتی، همراه با احتمالات وجود آسیب‌های درونی ورق، نهاد گردید. در ادامه با اعمال بارهای حرارتی و رطوبتی در مدل و در انواع بارگذاری‌های مختلف طولی و عرضی، بار بحرانی کمانش ورق مرکب در شرایط تکیه گاهی مختلف مورد محاسبه قرار گرفت. سپس با اعمال جدا شدگی‌های مختلف در ورق مرکب و همچنین اعمال همزمان شرایط حرارتی و رطوبتی در حین این آسیب، مقادیر بار بحرانی کمانش ورق مرکب دارای جداشدگی با ورق مرکب بدون آسیب مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش با تحلیل نوار محدود بطور جمع بندی مطابق با بندهای ذیل ارائه می‌گردد.

- با افزایش بار  $N_y$  از صفر به  $0.33N_x$  در حالت ورق مرکب چهار طرف مفصل، بار بحرانی کمانش  $N_x$  برای حالت 300 درجه کلونین، به میزان 25 درصد کاهش می‌یابد. به همین ترتیب با افزایش بار  $N_y$  به نسبت 0.5، 1، 2 و 3 برابر  $N_x$ ، بار بحرانی کمانش  $N_{xcr}$  به ترتیب به میزان 33 درصد، 50 درصد، 67 درصد و 75 درصد کاهش می‌یابد. درصد کاهش بار بحرانی کمانش بر اثر افزایش درجه حرارت از 300 کلونین تا 375 کلونین، برای حالت  $N_y = 0$  برابر 39 درصد و برای نسبت‌های 0.5، 1، 2 و 3 از  $N_y$  به  $N_x$  بطور میانگین به میزان 39 درصد می‌باشد.

- میزان تغییرات بار بحرانی کمانش بر اثر افزایش درصد رطوبت از 0 تا 75 درصد برای حالت چهار طرف مفصل، بطور میانگین برای تمام بارگذاری‌ها به میزان 55 درصد می‌باشد. درصد تغییرات در سه مرحله کاهش درصد رطوبت از 0 تا 25 درصد، از 25 درصد تا 50 درصد و از 50 درصد تا 75 درصد به ترتیب برای بارگذاری اول 16 درصد، 22 درصد و 13 درصد، برای سایر بارگذاری‌ها بطور میانگین به میزان 16 درصد، 22 درصد و 31 درصد می‌باشد.

- در وضعیت تکیه گاهی CSCS بطور میانگین در شش بارگذاری بررسی شده (نسبت‌های  $N_y/N_x$  برابر با 0، 0.33، 1، 2 و 3) بر اثر افزایش درجه حرارت، میزان کاهش بار بحرانی کمانش به میزان 22 درصد

### 7-فهرست علائم

ماتریس صلیبیت محوری	A
طول نوار	a
ماتریس صلیبیت محوری-خمشی	B
عرض نوار	b
رطوبت ثانویه	C
رطوبت اولیه	$C_0$
ماتریس صلیبیت	D
ماتریس صلیبیت خمشی	d
مدول الاستیسیته	$E_i$
بردار کرنش ناشی از حرارت و رطوبت	e
بردار نیروهای داخلی	F
بردار نیروهای داخلی ناشی از حرارت و رطوبت	$F^N$
ضخامت ورق	h
ضخامت هر زیر لایه	$h_i$
ماتریس سختی استاندارد	K

8-مراجع

[1] Amoushahi, H. and Azhari, M., "Buckling of Composite FRP Structural Plates Using the Complex Finite Strip Method" Composite structures, Vol. 90, pp. 92-99, 2009.

[2] Lee, D., "The Local Buckling Coefficient for Orthotropic Structural Sections" Aeronautic J, Vol 82, pp. 313-320, 1978.

[3] Lee, D., "Some Observation on the Local Instability of Orthotropic Structural Sections" Aeronautic J, Vol 83, pp. 110-114, 1979.

[4] Lee, D. and Hewson, P., "The Use of Fiber-Reinforced Plastics in Thin-Walled Structures" Stability problems in engineering structures and composites, pp. 23-25, 1978.

[5] Banks, W. and Rhodes, J., "The Post-Buckling Behavior of Composite Box Sections" Proceedings of the international conference on composite structures, pp. 402-414, 1981.

[6] Banks, W. and Rhodes, J., "The Instability of Composite Channel Sections" Proceedings of the international conference on composite structures, pp. 442-452, 1983.

[7] Lopatin, A. and Morozov, E., "Buckling of a Uniformly Compressed Rectangular SSCF Composite Sandwich Plate" Composite Structures, Vol. 105, pp. 108-115, 2013.

[8] Della, C. and Shu, D., "Vibration of Delaminated Composite Plates" Appl Mech, Vol. 60, pp. 1-20, 2007.

[9] Tenek, L. Henneke, E. and Gunzburger, M., "Vibration of Delaminated Composite Plates and Some Applications to Non-Destructive Testing" Compos Struct, Vol 23, pp.253-262.

[10] Ju, J. Lee, H. and Lee, K., "Finite Element Analysis of Free Vibration of Delaminated Composite Plates" Compos Eng, Vol. 5(2), pp. 195-209, 1995.

[11] Champanelli, R. and Engblom, J., "The Effect of Delaminations in Graphite/PEEK Composite Plates on Modal Dynamic Characteristics" Compos Struct, Vol. 31, pp. 195-202, 1995.

[12] Hou, J. and Jeronimidis, G., "Vibration of Delaminated Thin Composite Plates" J Compos Part-A, Vol. 30, pp. 989-995, 1999.

[13] Shiau, L. and Zeng, J., "Free Vibration of Rectangular Plate with Delamination" Journal of Mechanics, Vol. 26, pp. 87-93, 2010.

[14] Kumar, S. Cinefra, M. and Carrera, M., "Finite Element Analysis of Free Vibration of The Delaminated Composite Plate With Variable Kinematic Multilayered Plate Elements" Composites Part B, Vol. 66, pp. 453-465, 2014.

[15] Alnefaie, K., "Finite Element Modeling of Composite Plates With Internal Delamination" Composite Structures, Vol. 90, pp. 21-27, 2009.

[16] Parhi, P. Bhattacharyya, S. and Sinha, P., "Finite Element Dynamic Analysis of Laminated Composite Plates with Multiple Delaminations" Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 19, 2000.

[17] Goodarzian, F. and Amoushahi, H., "Dynamic Analysis of Composite Plates with Delaminations under Hygrothermal Loads Using Finite Strip Method" Journal of solid and fluid mechanics, Vol. 7, No. 1, pp. 187-203, 2016. (In Persian)

[18] Amoushahi H., "Time Depended Deformation and Buckling of Viscoelastic Thick Plates by a Fully Discretized Finite Strip Method Using Third Order Shear Deformation Theory" European Journal of Mechanics A/Solids, Vol.68, pp. 38-52, 2018.

[19] Amoushahi H., "Time Depended Deformation of Viscoelastic Thick Plates by a Fully Discretized Finite Strip Method Using Higher Order Shear Deformation Theory", Accepted in Civil Engineering Sharif Journal, 2017 (In Persian).

[20] Varzandian, G.A. and Ziaei S., "Analytical Solution of Non-Linear Free Vibration of Thin Rectangular Plates with Various Boundary Conditions Based on Non-Local Theory" AJSR-Mechanical Engineering, Vol 48, No. 4, pp. 331-346, 2017. (In Persian)

[21] Khorshidi, K. Bakhsheshy, A. and Ghadirian, H., "The Study of the Effects of Thermal Environment on Free Vibration Analysis of Two-Dimensional Functionally Graded Rectangular Plates on Pasternak Elastic Foundation" Journal of solid and fluid mechanics, Vol 6, No. 3, pp. 137-147, 2016. (In Persian)

[22] Parhi, P. Bhattacharyya, S. and Sinha, P., "Hygrothermal Effects on the Dynamic Behavior of Multiple Delaminated Composite Plates and Shells" Journal of Sound and vibration, Vol. 248(2), pp. 195-214, 2001.

[23] Panda, H. Sahu, S. and Parhi, P., "Hygrothermal Effects on Free Vibration of Delaminated Woven Fiber Composite Plates" Composite Structures, Vol. 96, pp. 502-513, 2013.

ماتریس سختی هندسی	$K_g$
ضرایب بدون بعد کمانش در راستای $x$ و $y$	$K_1, K_2$
لنگرهای خمشی	$M_x, M_y, M_{xy}$
لنگرهای خمشی ناشی از حرارت و رطوبت	$M_x^N, M_y^N, M_{xy}^N$
تعداد لایه‌ها	$m$
توابع شکل راستای عرضی	$N_i$
نیروهای محوری	$N_x, N_y, N_{xy}$
نیروهای محوری ناشی از حرارت و رطوبت	$N_x^N, N_y^N, N_{xy}^N$
بار بحرانی ورق در راستای $x$ و $y$	$N_{xcr}, N_{ycr}$
شماره مود تغییر شکل	$n$
بردار نیرویی ناشی از حرارت و رطوبت	$P^N$
ماتریس صلبیت لایه‌ها در مختصات لایه‌ها	$Q$
ماتریس صلبیت لایه‌ها در مختصات کلی	$\bar{Q}$
نیروهای برشی	$Q_i$
نیروهای برشی ناشی از حرارت و رطوبت	$Q_i^N$
تعداد مود تغییر شکل	$r$
ماتریس صلبیت برشی	$S$
ماتریس تبدیل راستای لایه‌ها	$T$
دمای ثانویه	$T$
دمای اولیه	$T_0$
جابجایی در راستای محورهای $x, y$ و $z$	$u, v, w$
جابجایی میان صفحه در راستای محورهای $x, y$ و $z$	$u_0, v_0, w_0$
مختصات مرکز هر زیر لایه	$z_0^t$
ضرایب ثابت حرارت در راستای طولی و جانبی لایه‌ها	علایم یونانی $\alpha_1, \alpha_2$
ضرایب ثابت رطوبت در راستای طولی و جانبی لایه‌ها	$\beta_1, \beta_2$
مولفه‌های کرنش برشی	$\gamma_{ij}$
بردار درجات آزادی	$\delta$
مولفه‌های کرنش طولی	$\epsilon_{ij}$
درجات آزادی چرخش لبه‌ای حول محورهای $y$ و $x$	$\theta_x, \theta_y$
زاویه هر لایه نسبت به دستگاه مختصات کلی	$\bar{\theta}$
انحنای ورق	$\kappa_i$
نسبت پواسون	$\nu_i$
چرخش لبه‌ها حول محورهای $x$ و $y$	$\phi_x, \phi_y$
فرکانس طبیعی ارتعاش آزاد ورق	$\omega$
ضریب بدون بعد فرکانس طبیعی ارتعاش آزاد ورق	$\bar{\omega}$

- [24] Whitney, J. and Ashton, J., "Effect of Environment on the Elastic Response of Layered Composite Plates" American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, Vol. 9, pp. 1708-1713, 1971
- [25] Sairam, K. and Sinha, P., "Hygrothermal Effects on the Free Vibration of Laminated Composite Plates" Journal of Sound and vibration, Vol. 158, pp. 133-148, 1992.







## بررسی خواص و ریز ساختار پلی وینیل کلراید چقرمه شده با دی اکتیل فتالات/ پلی متیل متاکریلات / نانوگرافن

حدیث جلیلیان<sup>1</sup>، قاسم نادری<sup>2</sup>، شیرین شکوهی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی، مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران  
2- استاد، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران  
3- استادیار، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 137-14665، [shokoohish@ripi.ir](mailto:shokoohish@ripi.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>آمیزه‌های چندجزئی بر پایه پلی‌وینیل کلراید سخت (UPVC) به عنوان جزء اصلی و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) برای چقرمه سازی پلی وینیل کلراید، نانوگرافن (GNP) به عنوان تقویت کننده و دی‌اکتیل فتالات (DOP) در نقش نرم کننده با ترکیب درصدهای مختلف (90.10 و 80.20 حاوی 0، 0.5، 1 و 2 نانوگرافن) توسط مخلوط‌کن داخلی تهیه شدند. ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های تهیه شده با هدف بررسی اثرات متقابل PMMA و GNP بر خواص بستر UPVC بررسی شد. نتایج بدست آمده از آزمون‌های کشش و ضربه نشان داد که با افزایش درصد نانوگرافن، مدول کششی افزایش و ازدیاد طول تا نقطه پارگی، استحکام کششی و مقاومت ضربه کاهش می یابد. در درصدهای ثابت نانوگرافن، مقاومت ضربه و مدول کششی و نیز درجه پراکنش نانوگرافن در نمونه های حاوی 20% PMMA بالاتر است که به اختلاط بهتر فازها در اثر برهمکنش های مشاهده شده بین نانوگرافن و پلی‌متیل متاکریلات در طیف سنجی مادون قرمز و امتزاج پذیری بالاتر دو فاز پلیمری در این ترکیب درصد نسبت داده می شود. همچنین، مشاهده سطح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی بویستی نشان داد با افزایش درصد نانوگرافن سطح شکست نمونه ها زبرتر بوده و مسیر رشد ترک در حضور نانوگرافن طولانی تر و ناهموارتر می باشد.</p>	<p>دریافت: ۹۶/۹/۱ پذیرش: ۹۷/۲/۳۱</p> <p><b>کلیدواژگان:</b> پلی وینیل کلراید سخت پلی متیل متاکریلات نانوگرافن نانوکامپوزیت</p>

### Investigation on the Microstructure and Properties of PVC Toughened with DOP/PMMA/Nano-Graphene

Hadis Jalilian<sup>1</sup>, Ghasem Naderi<sup>2</sup>, Shirin Shokoohi<sup>3\*</sup>

1- Islamic Azad University, South-Tehran Branch, Tehran, Iran.  
2- Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran.  
3- Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran.  
\*P.O.B. 14665-137, Tehran, Iran. [shokoohish@ripi.ir](mailto:shokoohish@ripi.ir)

**Keywords**

UPVC  
PMMA  
Nanographene  
Nanocomposite

**Abstract**

Nanocomposites samples based on unplasticized polyvinyl chloride (UPVC) containing polymethyl methacrylate (PMMA) as toughener, graphene nano-platelets (GNP) as reinforcement and di-octylphthalate as plasticizer using Haake internal mixer. Nanocomposite samples were analyzed using x-ray diffraction and scanning electron microscopy to investigate the mutual interactions between GNP and PMMA. Mechanical properties (Tensile modulus, elongation at break and impact resistance) of the prepared nanocomposites including tensile modulus, elongation at break and impact strength were also measured. Results showed that increasing nanographene platelets content increases tensile modulus where impact strength, tensile strength and elongation at break are decreased. At constant graphene contents, nanocomposites containing 20% PMMA show higher impact strength and tensile modulus. This was attributed to the higher mixing efficiency due to the interactions established between PMMA and GNP observed through FTIR and also higher miscibility of UPVC/PMMA pair besides the PMMA characteristics. Fracture surface of nanocomposites are significantly rough at the presence of nano-graphene which shows the torturous crack growth path.

**1-مقدمه**

سوسپانسیونی تهیه می‌شود، به دو دسته نرم و سخت تقسیم بندی می‌گردد. نوع سخت که فاقد نرم کننده است، با توجه به قیمت پایین، پایداری ابعادی، مقاومت حرارتی، ضربه انتقال حرارتی پایین و مقاومت در برابر اشعه فرابنفش کاربردهای وسیع تری دارد. دمای انتقال شیشه‌ای پایین این

پلی‌وینیل کلراید یکی از مهم‌ترین رزین‌های ترموپلاستیک تجاری است که به شکل لوله، کفپوش، تسمه نقاله، بطری، پنجره و غیره در صنایع مختلف کاربرد گسترده دارد. گریدهای تجاری پلی وینیل کلراید که از پلیمریزاسیون

**Please cite this article using:**

Jalilian, H. Naderi, G. and Shokoohi, S., "Investigation on the Microstructure and Properties of PVC Toughened with DOP/PMMA/Nano-Graphene", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 451-456, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

حاضر با هدف مطالعه اثر PMMA و نانوکرافن و برهمکنش های متقابل احتمالی این دو بر چقرمگی و خواص مکانیکی پلی وینیل کلراید سخت حاوی 40 phr نرم کننده دی اکسید تیتانیوم فتالات انجام شده است. اثر ترکیب درصد اجزاء شامل پلی متیل متاکریلات و نیز نانوکرافن، نحوه پراکنش و ریزساختار نانوکامپوزیت نیز بررسی و گزارش شده است.

## 2-تجربی

**مواد-** پلی وینیل کلراید سخت استفاده شده در این تحقیق گرید سوسپانسیون با K-value=67 شرکت پتروشیمی غدیر بوده است. پلی متیل متاکریلات به صورت جامد بلوری سفید رنگ گرید IH830 ساخت شرکت ال جی کره، نانوکرافن (GNP) گرید xGNP-C750 محصول شرکت XG science، پایدار کننده تولید شرکت ایرانی همپار (گرید 4617) و پلاستی سایز دی-اکتیل فتالات (DOP) به PVC افزوده شدند. مشخصات کلی مواد نامبرده در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 مشخصات مواد مورد استفاده.

Table 1. Material characteristics used.

ماده	ویژگی	مقدار	واحد
PVC	Apparent bulk density	0.57	gr/cm <sup>3</sup>
	K-Value	67	-
PMMA	Specific gravity	1.18	gr/cm <sup>3</sup>
	Melt flow index (3.8kg, 230°C)	2.5	gr/10min
Graphene	Density	2.2	gr/cm <sup>3</sup>
Nanoplatelets	Specific surface area	750	m <sup>2</sup> /gr
	Thickness	2	nm
	Width	1	μm

**دستگاهها و روشها-** برای اختلاط از دستگاه مخلوط کن داخلی برابندر مدل 50w ساخت آلمان استفاده شد. آماده سازی نمونه ها برای آزمون های کشش و ضربه توسط دستگاه قالب گیری فشاری نوع mini test press ساخت Toyo-seiki ژاپن مدل WCH انجام شد.

آمیزه های PVC/PMMA/GNP بر اساس ترکیب درصد های نشان داده شده در جدول 2 در دمای اختلاط ۲۳۰ درجه سانتیگراد تهیه شدند. بدین ترتیب که پلی متیل متاکریلات و نانوکرافن به ترتیب طی دو مرحله به مخلوط مذاب پلی وینیل کلراید و DOP در برابندر اضافه شدند. پس از اندازه گیری خواص ضربه به روش چارپی منطبق با استاندارد ISIRI 9277، سطح شکست نمونه های تست ضربه با لایه نازکی از طلا به ضخامت ۵۰۰-۱۰۰۰ آنگستروم پوشش داده شده و توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Texcan VEGA-II ساخت کشور چک مشاهده شد. برای بررسی درجه پراکنش لایه های گرافن در بستر پلیمری از دستگاه XRD مدل Philips XPert PRO با اشعه Cu K α و ولتاژ شتاب دهنده 40 kV استفاده شد. طیف بازتابش با سرعت روبش 1 °/min در زوایای بازتابش بین 24 تا 31 درجه ثبت شد. فاصله بین لایه ای صفحات و نیز ضخامت کلوخه های نانوکرافن بر اساس بازتابش پرتو ایکس از لایه های مختلف پراکنده در فاز پیوسته پلیمری به ترتیب بر اساس معادله براگ  $(d = \lambda / 2 \sin \theta_{\max})$  [11] و معادله دبای-شر  $(t = k\lambda / \beta \cos \theta_{\max})$  [12] با استفاده از مقادیر زاویه بازتابش  $(\theta)$ ، طول موج پرتو ایکس  $(\lambda)$  و پهنای پیک در نیمه حداکثری  $(\beta)$  و ثابت  $(k=0.89)$  به دست آمده از این آزمون محاسبه گردید. اندازه گیری دمای انتقال شیشه ای با استفاده از دستگاه کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC) ساخت شرکت Perkin Elmer با نرخ حرارت دهی 10 °C/min انجام شد. جهت حصول اطمینان از برقراری پیوندهای احتمالی، از دستگاه طیف مادون قرمز (FTIR)

ترموپلاستیک، پایداری ابعادی آن را در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سانتیگراد محدود می کند [11]. از همین رو بهبود پایداری حرارتی و خواص مکانیکی پلی وینیل کلراید (PVC) در دماهای بالاتر، همواره مورد توجه بوده است.

با توجه به ویسکوزیته بالای مذاب پلی وینیل کلراید، نرم کننده هایی از جمله دی اکسید تیتانیوم، به منظور ارتقای فرآیندپذیری به آن افزوده می شوند. چنین افزودنی هایی تا حدی باعث بهبود چقرمگی این ترموپلاستیک نیز می شوند. خواص مکانیکی و حرارتی پلی وینیل کلراید نرم را می توان با اختلاط آن با پلیمرهای دیگر و یا افزودن عوامل تقویت کننده بهبود داد. از آنجا که پلیمرهای آکریلات دارای پارامتر حلالیت بسیار نزدیک به PVC هستند، افزودن پلی متیل متاکریلات (PMMA) به منظور بهبود خواص ضربه و فرآیندپذیری، سالهاست که به عنوان یک گزینه مناسب مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع، فاز سخت PMMA در بستر پلی وینیل کلراید به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل کرده و باعث می شود PVC تحت سازوکار تسلیم برشی تغییر شکل یافته و پاسخ منعطف (Ductile) از خود نشان دهد. میزان این انعطاف به مقاومت در برابر ترک بستگی دارد که در فاز PMMA بسیار ضعیف تر از PVC است. مشاهدات نشان داده است که اگر ترکیب درصد PMMA از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد، در کنار ماهیت سخت این پلیمر، به دلیل افزایش تعداد و حجم ذرات پراکنده در بستر PVC، تعداد ترک ها و نیز طول مسیر رشد ترک ها کاهش یافته، تنش موجود در نوک ترک ها افزایش یافته و چقرمگی افت می کند. پلیمرهای آکریلات، همچنین، می توانند شروع دی هیدروکلریناسیون پلی وینیل کلراید را که مکانیزم اصلی تخریب این پلیمر بشمار می آید، به تعویق بیندازند [2]. از طرفی افزودن تقویت کننده هایی همچون استئارات منیزیم، کائولین و غیره می تواند خواص مکانیکی و حرارتی PVC را بهبود بخشد [3]. بهبود چقرمگی PVC از طریق اختلاط با اصلاح کننده های ضربه هسته-پوسته نیز گزارش شده است. هسته لاستیکی مقاومت به ضربه را، بخصوص در دماهای پایین تر، تامین می کند و پوسته مسئولیت حفظ سختی، شکل مطلوب و پراکنش مناسب ذرات از طریق سازگاری با بستر پلیمری را بر عهده دارد [4-5].

بررسی منابع نشان می دهد که مطالعات متعددی در زمینه بررسی عملکرد میکروکامپوزیت ها و نانوکامپوزیت های تهیه شده بر پایه PVC/PMMA انجام شده است. چن و همکاران [6] زنجیرهای PMMA را بر سطح ذرات نانوکربنات کلسیم پیوند زده و افزایش مدول و استحکام کششی نانوکامپوزیت های مربوطه را مشاهده نمود. افزایش مدول یانگ، مقاومت پارگی و پایداری حرارتی PVC با تهیه نانوکامپوزیت های PVC/PMMA/Nano-CaCO<sub>3</sub> مشاهده شد [7]. همچنین نانوکامپوزیت های PVC حاوی ۵٪ مونت موریلونیت و ۱۰٪ PMMA در مقایسه با پلی وینیل کلراید خالص، کرنش خمشی شکست، استحکام خمشی و دمای اعوجاج گرمایی را افزایش داد. همچنین حضور فاز PMMA منجر به بهبود پراکنش مونت موریلونیت در بستر PVC نیز شده است [8]. یائو و همکارانش [9] نیز برای بهبود خواص PVC، با تهیه نانوکامپوزیت های آن با گرافن، اثر گرافن عاملدار شده با زنجیرهای PVC را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزایش سازگاری گرافن عاملدار شده با بستر پلیمری منجر به امکان آرایش صفحات گرافن در جهت تنش را فراهم کرده و مدول یانگ و استحکام کششی PVC افزایش می یابد. لازم به ذکر است، مطالعاتی با مضمون تقویت خواص PMMA با نانوکرافن نیز انجام شده است [10]. از آنجا که تا کنون گزارشی مبنی بر بررسی نانوکامپوزیت های گرافن بر پایه PVC/PMMA منتشر نشده است، تحقیق

به دليل نفوذ مولکول ها به داخل لايه ها رخ دهد. در شرايط خاص، کاهش فواصل بين لايه ای به دليل خروج يا تخریب گروه های عاملی نشانده شده بر روی سطوح داخلی لايه ها نیز گزارش شده است [14]. در شکل 1 مشاهده می شود که فاصله بين لايه های گرافن در دو نمونه نانوکامپوزيت در مقایسه با پودر خالص نانوغرافن اندکی افزایش یافته است. مقالات مشابه متعددی این میزان تغییر را به نفوذ زنجیرهای ماکرومولکولی در فواصل بين لايه ای نسبت داده اند. کرامتی و همکارانش [15] معتقدند که تغییر فاصله بين لايه ای از 3.4 به 3.8 آنگستروم ناشی از نفوذ زنجیرهای پلی لاکتیک اسید در لايه های نانوغرافن است. زامان [14] نیز با مشاهده انتقال پیک مشخصه نانوغرافن خالص ( $2\theta=26.38^\circ$ ) معادل 3.37 آنگستروم به زوایای تفرق حدود 26 Å ( $d_{002}=3.42$ ) در نتایج آزمون پراش پرتو ایکس نانوکامپوزيت های اپوکسی/نانوغرافن گزارش کرد که مولکول های بستر کامپوزيت شامل زنجیرهای اپوکسی، عامل پخت اکسی آلکیلن آمین و دی گلايسیدیل اتر بیسفنل آ در فواصل بين لايه های نانوغرافن نفوذ کرده اند. با این حال، با توجه به فاصله بين لايه ای اوليه نانوغرافن و میزان تغییرات آن پس از اختلاط، احتمال نفوذ پایدار زنجیرهای ماکرومولکولی پلی وينيل کلرايد و پلی-متيل متاکريلات در فواصل بين لايه ای نانوغرافن منتهی است. از طرفی، نفوذ مولکول های دي اکتيل فتالات و برهمکنش های واندروالسی بين زنجیرهای آلکیل دي اکتيل فتالات و گروه های اصلاح کننده متداول نشانده شده بر سطح لايه های نانو خاک رس با فاصله بين لايه ای حدود 3-4 نانومتر توسط ونگ و همکارانش [16] در نانوکامپوزيت های پلی وينيل کلرايد مشاهده شده است. گر چه این پدیده با توجه به اندازه تقریبی مولکول DOP ( $\approx 9$  آنگستروم [17]) در این تحقیق منطقی به نظر نمی رسد. با توجه به شواهد موجود، افزایش اندک مشاهده شده در فاصله بين لايه ای نانوغرافن را می توان به شوک حرارتی نانوذرات در دمای اختلاط و تبخیر سریع آب و دی اکسید کربن موجود در میان لايه ها نسبت داد [11, 18].

مقایسه مقادير ضخامت متوسط ذرات پراکنده شده در بستر پلیمری نانوکامپوزيت که بر اساس رابطه دبی-شرر محاسبه شده اند، در ترکیب درصد های یکسان PVC/PMMA، ضخامت متوسط نانوذرات پراکنده شده در بستر پلیمری نانوکامپوزيت با افزایش درصد نانوغرافن افزایش یافته است. این رفتار را می توان به افزایش احتمال تراکم کلوخه های نانوغرافن در درصد های بالاتر و سهولت اختلاط و پراکنش لايه های نانوغرافن در بستر پلیمری حاوی درصد های کمتر نانوذرات نسبت داد [13, 19]. از طرفی، در درصد ثابت نانوغرافن، پراکنش نانوغرافن در نمونه های با ترکیب درصد PVC/PMMA معادل 80/20 در مقایسه با ترکیب درصد 90/10 بهتر بوده است. این رفتار را می توان به امتزاج پذیری بالاتر دو جزء پلیمری در ترکیب درصد 80/20 نسبت داد که در مطالعات مشابه گزارش شده است [20]. برای اطمینان از این موضوع، مقادير  $T_g$  اندازه گیری شده با کالریمتر روبشی تفاضلی در جدول 4 گزارش شده است. به دليل امتزاج پذیری این دو پلیمر در محدوده وسیعی از ترکیب درصد ها، مخلوط دو پلیمر همانطور که انتظار می رود یک  $T_g$  از خود نشان می دهد که مقدار آن در محدوده دمای انتقال شیشه ای پلیمرهای خالص است. مقادير  $T_g$  محاسباتی اعلام شده در این جدول نیز بر اساس قانون مخلوط ها<sup>1</sup> ( $T_g = w_1 T_{g1} + w_2 T_{g2}$ ) برآورد شده است. مقایسه مقادير تجربی و محاسباتی نشان می دهد که مقادير  $T_g$  اندازه گیری شده انحراف مثبت از قانون مخلوط ها دارند که نشان دهنده برقراری برهم کنش

ساخت شرکت BRUKER آلمان در محدوده عدد موجی  $500-4000 \text{ cm}^{-1}$  استفاده شد. خواص کششی با دستگاه کشش ساخت شرکت ایرانی کاردوتک و لودسل ساخت شرکت Bongshi کره جنوبی انجام شد. این آزمون مطابق با استاندارد ISO 527 با سرعت کشش 5 mm/min در دمای محیط انجام شد.

جدول 2 نامگذاری و ترکیب درصد نمونه های تهیه شده.

Table 2. Nomenclature and compositions.

کد نمونه	PVC	PMMA	GNP	DOP
V100M0G0	100	0	0	40
V0M100G0	0	100	0	40
V90M10G0	90	10	0	40
V80M20G0	80	20	0	40
V90M10G0.5	90	10	0.5	40
V80M20G0.5	80	20	0.5	40
V90M10G1	90	10	1	40
V80M20G1	80	20	1	40
V90M10G2	90	10	2	40
V80M20G2	80	20	2	40

### 3-نتایج و بحث

پراش پرتو ایکس- شکل 1 طیف بازتابش اشعه ایکس مربوط به آمیزه های PVC/PMMA حاوی 0.5 phr نانوغرافن را به عنوان نمونه نشان می دهد. موقعیت پیک ظاهر شده در طیف های پراش پرتو ایکس و نیز مقادير فاصله بين لايه ای و ضخامت کلوخه محاسبه شده بر اساس آن برای تمام نمونه های تهیه شده در این تحقیق در جدول 3 ارائه شده است.

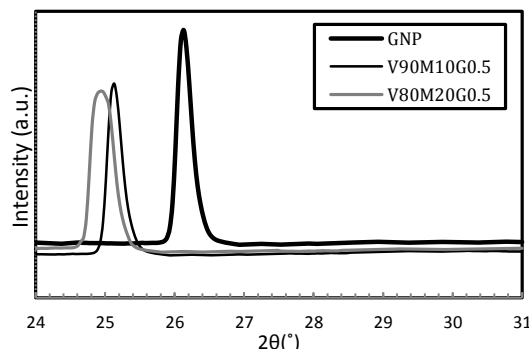


Fig 1. XRD Spectra of PVC/PMMA (80/20) and (90/10) containing 0.5 phr GNP.

شکل 1 طیف پراش پرتو ایکس نمونه های PVC/PMMA با دو ترکیب درصد 80/20 و 90/10 حاوی 0.5 phr نانوغرافن.

جدول 3 فاصله بين لايه ای و ضخامت کلوخه های نانوغرافن در نمونه ها.

Table 3. GNP Gallery spacing and agglomerate thickness in samples.

کد نمونه	$2\theta$ (°)	$d_{002}$ (Å)	t (nm)
GNP	26.12	3.41	-
V90M10G0.5	25.11	3.54	98.20
V80M20G0.5	24.88	3.57	92.51
V90M10G1	25.67	3.46	107.48
V80M20G1	25.49	3.49	102.00
V90M10G2	26.38	3.37	113.70
V80M20G2	25.93	3.43	108.99

طیف مربوط به پودر نانوغرافن، یک پیک مشخصه در زاویه بازتابش  $2\theta=26.12^\circ$  دارد که طبق قانون براگ معادل فاصله بين لايه ای 3.41 آنگستروم می باشد. طبق همین قانون، انتقال پیک به زوایای کوچک تر، بیان گر افزایش فاصله لايه های نانوغرافن از هم خواهد بود [13] که می تواند

<sup>1</sup> Additivity Rule

مدول و استحکام کششی نانوکامپوزیت در مطالعات متعددی گزارش شده است [28].

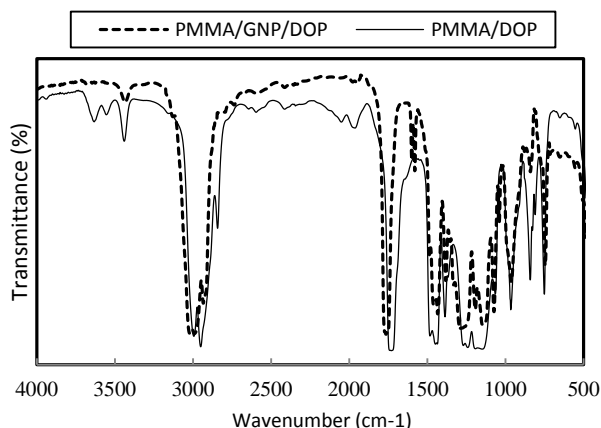


Fig 2. FTIR Spectra of PMMA/DOP and PMMA/DOP containing 1 phr GNP.

شکل 2 طیف FTIR نمونه های PMMA/DOP حاوی 1 phr و PMMA/DOP حاوی 1 phr نانوگرافن.

کاهش مشاهده شده در استحکام کششی نانوکامپوزیت ها را می توان به رفتار شکننده ماتریس پلیمری در حضور ذرات سخت نانوگرافن نسبت داد [29]. این رفتار همچنین نشان دهنده پراکنش نامناسب ذرات و حضور کلوخه های میکرومتری در بستر پلیمری به ویژه با افزایش درصد نانوگرافن می باشد. از طرفی افزایش درصد نانوگرافن با کاهش قابلیت تحرک زنجیرهای پلیمری در بستر نانوکامپوزیت باعث کاهش مقاومت ضربه و ازدیاد طول در نقطه شکست می شود. فاز پیوسته پلیمری در حضور ذرات سخت انعطاف پذیری کمتری دارد زیرا زنجیرهای پلیمری به دلیل ممانعت فضایی ایجاد شده توسط این ذرات قابلیت حرکت، چرخش و تغییر طول کمتری دارند. گرچه تغییرات متعدد مسیرهای رشد ترک با برخورد به لایه های نانوذرات گرافن که دارای نسبت منظر بالا هستند، می تواند اثر مثبتی بر مقاومت ماده در برابر رشد ترک داشته باشد [30]. البته همانطور که دیده می شود، شیب روند افزایشی مدول کششی با افزایش درصد نانوگرافن از یک تا دو درصد به صورت قابل توجهی کاهش یافته است. این رفتار به پراکنش ضعیف تر ذرات و حضور کلوخه های بزرگتر نانوگرافن در درصدهای بالاتر نسبت داده می شود که با نتایج حاصل از آزمون های پرتو ایکس و مقادیر محاسبه شده ضخامت همخوانی دارد. پرواضح است که بهبود خواص در نانوکامپوزیت به درجه پراکندگی لایه های نانوگرافن در ماتریس پلیمری نیز وابسته است [31]. از همین رو در درصدهای نانوگرافن برابر، مدول کششی نمونه های با ترکیب درصد ۸۰/۲۰ از دو فاز پلیمری به دلیل امتزاج پذیری و در نتیجه پراکنش بهتر نانوگرافن در بستر نانوکامپوزیت در مقایسه به نمونه های تهیه شده بر پایه ترکیب درصد ۹۰/۱۰ بالاتر است. این مساله با شواهد مکمل در نتایج آزمون های پرتو ایکس نیز تایید شده است.

**میکروسکوپ الکترونی روبشی** - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های دوجزئی (۸۰/۲۰) PVC/PMMA و نیز نانوکامپوزیت های تهیه شده بر پایه ترکیب درصد ۸۰/۲۰ PVC/PMMA حاوی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانوگرافن در شکل 3 مشاهده می شود. همانطور که از تصاویر قابل مشاهده است نمونه PVC/PMMA بدون حضور نانوگرافن دارای سطح شکست صاف تری نسبت به نمونه های حاوی نانوگرافن هستند و هر چقدر درصد گرافن

میان دو زوج پلیمری است [14]. این برهم کنش ها در نتیجه پیوندهای هیدروژنی که بین گروه های کربونیل (C=O) ساختار PMMA و اتم های هیدروژن گروه CHCL در ساختار PVC است. مشاهده شد که میزان انحراف مثبت در ترکیب درصد ۸۰/۲۰ بیشتر از ۹۰/۱۰ است. در واقع، برهمکنش بین دو پلیمر و اختلاف حجم منفی ناشی از آن پس از اختلاط منجر به انحراف مثبت مشاهده شده و  $T_g$  بزرگتر در نتیجه کاهش حجم آزاد می شود [21-22]. هر چه امتزاج پذیری دو فاز بالاتر باشد، کشش سطحی پایین تر و در نتیجه علاوه بر آزادی تحرک بیشتر زنجیرها در مخلوط مذاب، انتقال تنش در حین اختلاط و نهایتاً پراکنش بهتر خواهد بود. در شکل ۱ دیده می شود که پیک مشخصه مربوط به نمونه نانوکامپوزیتی با ترکیب درصد ۸۰/۲۰ پهن تر از پیک مربوط به نمونه ۹۰/۱۰ می باشد. این رفتار نیز حاکی از درجه بالاتر پراکنش نانوگرافن در بستر پلیمری PVC/PMMA در ترکیب درصد ۸۰/۲۰ است که با نتایج ضخامت متوسط نیز تایید می شود.

جدول 4 تاثیر ترکیب درصد PVC/PMMA بر دمای انتقال شیشه ای مخلوط.

Table 4. Effect of PVC/PMMA composition on the blend  $T_g$ .

کد نمونه	PVC/PMMA/DOP	$T_g$ تجربی	$T_g$ محاسباتی
V100M0G0	100/0/40	72	-
V0M100G0[23]	0/100/40	104	-
V90M10G0	90/10/40	80	75.2
V80M20G0	80/20/40	87	78.4

علاوه بر این، از آنجا که نانوگرافن استفاده شده در این تحقیق دارای گروه های اتری و الکی بر روی سطوح نانوذرات می باشد [24]، بنظر می رسد احتمال برهمکنش آن با گروه های عاملی استری پلی متیل متاکریلات وجود دارد. طیف سنجی مادون قرمز انجام شده بر روی دو نمونه (۱۰۰/۴۰) PMMA/DOP و (۱۰۰/۱/۴۰) PMMA/GNP/DOP این موضوع را تایید می نماید (شکل ۲). پیک های جذب قابل مشاهده در اعداد موجی  $cm^{-1}$  ۲۹۵۰، ۲۸۴۰، ۱۷۳۰، ۱۴۴۰، ۱۱۹۵ به ترتیب مربوط به حرکت های کششی اتصالات -CH، -CH<sub>2</sub>، C=O، -CH<sub>3</sub>، -OCH<sub>3</sub> پلی متیل متاکریلات است [25]. انتقال پیک مربوط به گروه های کربونیلی به اعداد موجی بالاتر در حضور نانوگرافن بارزترین نشانه برقراری برهمکنش از نوع هیدروژنی بین دو فاز می باشد [26]. همچنین همانند مشاهدات موداک [27] حرکت های خمشی و کششی -CH در نانوکامپوزیت غایب هستند. بر این اساس، برهمکنش های مشاهده شده بین نانوگرافن و PMMA می تواند مسئول کاهش ضخامت متوسط ذرات پراکنده در نتیجه اختلاط بهتر در ترکیب درصدهای پلیمری ۸۰/۲۰ در مقایسه با ۹۰/۱۰ باشد.

**خواص مکانیکی** - نتایج حاصل از اندازه گیری خواص مکانیکی (شامل خواص کششی و مقاومت ضربه) نمونه های نانوکامپوزیت PVC/PMMA/GNP با ترکیب درصدهای مختلف در جدول ۵ آورده شده است. در درصد ثابت نانوگرافن، با افزایش ترکیب درصد جزء PMMA از صفر به ۲۰ درصد، مدول کششی و مقاومت ضربه نمونه های دو جزئی و نانوکامپوزیتی افزایش و استحکام کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست کاهش می یابد. این مساله با توجه به برتری خواص کششی و چقرمگی PMMA به PVC و نیز امتزاج پذیری بالاتر این دو پلیمر در ترکیب درصد ۸۰/۲۰ نسبت به ۹۰/۱۰ [20] مورد انتظار بوده است. با افزایش درصد نانوگرافن مدول کششی نمونه های نانوکامپوزیت افزایش یافته است. در طی فرآیند شکل دهی نانوکامپوزیت، لایه های گرافن در اثر میدان جریان آرایش می یابند، از همین رو افزایش

ترکیب درصد ۸۰/۲۰ پراکنش بهتر و مقاومت بالاتری در برابر ضربه نشان می‌دهد. با افزایش درصد نانوکرافن به دلیل احتمال حضور کلوخه های نانوکرافن و پراکنش ضعیف تر این ذرات در بستر پلیمری روند افزایشی مدول کششی افت پیدا می‌کند. نمونه نانوکامپوزیتی (۸۰/۲۰/۰/۵) مقاومت ضربه در مقایسه با PVC/PMMA/GNP به ترتیب با ۱۴۷ و ۱۰ درصد افزایش در مدول کششی و نمونه های سه جزئی بررسی شده نشان داد.

5-مراجع

[1] Birley, A. W., Heath, R. J. and Scott, M. J., "Plastic Materials: Properties and Applications", Springer Netherlands, 2012.

[2] Chakrabarti, R., Das, M. and Chakraborty, D., "Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Pvc/Pmma Blends in Relation to Their Morphologies" Journal of applied polymer science, Vol. 93, No. 6, pp. 2721-2730, 2004.

[3] Schiller, M., "Pvc Additives: Performance, Chemistry, Developments, and Sustainability", Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2015.

[4] Wu, S., Chen, M., Wu, G. and Zhou, C., "Variation of Core-Shell Structural Particles and Their Toughening Behavior in Poly (Vinyl Chloride)(Pvc) Matrix" Journal of Polymer Research, Vol. 22, No. 5, pp. 82, 2015.

[5] Gharieh, A., Mahdavian, A. R. and Salehi-Mobarakeh, H., "Preparation of Core-Shell Impact Modifier Particles for Pvc with Nanometric Shell Thickness through Seeded Emulsion Polymerization" Iranian Polymer Journal, Vol. 23, No. 1, pp. 27-35, 2014.

[6] Chen, X., Li, C., Xu, S., Zhang, L., Shao, W. and Du, H., "Interfacial Adhesion and Mechanical Properties of Pmma-Coated Caco3 Nanoparticle Reinforced Pvc Composites" China Particuology, Vol. 4, No. 1, pp. 25-30, 2006.

[7] Chuayjuljit, S., Sukasem, N. and Boonmahitthisud, A., "Effects of Silica, Poly (Methyl Methacrylate) and Poly (Methyl Methacrylate)-Grafted-Silica Nanoparticles on the Physical Properties of Plasticized-Poly (Vinyl Chloride)" Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 53, No. 2, pp. 116-122, 2014.

[8] Pagé, D., Cunningham, N., Chan, N., Carran, G. and Kim, J., "Mechanical and Heat Deflection Properties of Pvc/Pmma/Montmorillonite Composites" Journal of Vinyl and Additive Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 91-97, 2007.

[9] Yao, K., Zhang, G., Lin, Y., Gong, J., Na, H. and Tang, T., "One-Pot Approach to Prepare High-Performance Graphene-Reinforced Poly (Vinyl Chloride) Using Lithium Alkyl as Covalent Bonding Agent" Polymer Chemistry, Vol. 6, No. 3, pp. 389-396, 2015.

[10] Lee, J.-H., Jo, J.-K., Kim, D.-A., Patel, K. D., Kim, H.-W. and Lee, H.-H., "Nano-Graphene Oxide Incorporated into Pmma Resin to Prevent Microbial Adhesion" Dental Materials, Vol. 34, No. 4, pp. e63-e72, 2018.

[11] Longo, A., Verucchi, R., Aversa, L., Tatti, R., Ambrosio, A., Orabona, E., Coscia, U., Carotenuto, G. and Maddalena, P., "Graphene Oxide Prepared by Graphene Nanoplatelets and Reduced by Laser Treatment" Nanotechnology, Vol. 28, No. 22, pp. 224002, 2017.

[12] Gao, Y., Picot, O. T., Bilotti, E. and Peijs, T., "Influence of Filler Size on the Properties of Poly (Lactic Acid)(Pla)/Graphene Nanoplatelet (Gnp) Nanocomposites" European Polymer Journal, Vol. 86, pp. 117-131, 2017.

[13] Gopakumar, T. G., Xanthos, M. and Xanthos, M., "Effect of Nanofillers on the Properties of Flexible Protective Polymer Coatings" Polymer Composites, Vol. 27, No. 4, pp. 368-380, Aug, 2006.

[14] Zaman, I., Phan, T. T., Kuan, H.-C., Meng, Q., La, L. T. B., Luong, L., Youssf, O. and Ma, J., "Epoxy/Graphene Platelets Nanocomposites with Two Levels of Interface Strength" Polymer, Vol. 52, No. 7, pp. 1603-1611, 2011.

[15] Keramati, M., Ghasemi, I., Karrabi, M., Azizi, H. and Sabzi, M., "Incorporation of Surface Modified Graphene Nanoplatelets for Development of Shape Memory Pla Nanocomposite" Fibers and Polymers, Vol. 17, No. 7, pp. 1062-1068, 2016.

بیشتر شود مساحت سطح شکست نمونه ها بیشتر شده و زیرتر به نظر می‌رسد.

جدول 5 خواص کششی نمونه های UPVC/PMMA/GNP حاوی 40 phr DOP.

Table 5. Tensile properties of UPVC/PMMA/GNP samples containing 40phr DOP.

خواص	ازداید طول %	مدول ینگ MPa	استحکام کششی MPa	مقاومت ضربه J/m
V100M0G0	360.47±8.28	28.19±1.50	19.11±1.00	25.77±1.13
V0M100G0	405.47±4.50	32.19±1.02	28.35±1.02	37.77±1.65
V90M10G0	385.47±7.03	35.19±2.22	21.23±0.98	30.77±2.05
V80M20G0	380.34±9.45	42.34±4.60	22.50±0.98	33.18±1.33
V90M10G0.5	309.54±3.17	64.38±7.76	17.45±0.76	24.81±0.97
V80M20G0.5	306.19±2.51	69.72±4.94	17.09±0.83	28.16±1.40
V90M10G1	258.50±10.00	76.82±4.94	16.53±0.48	19.26±1.08
V80M20G1	252.19±11.25	80.12±2.11	15.77±0.32	21.12±1.36
V90M10G2	190.99±1.51	83.81±4.61	14.09±0.44	15.35±1.01
V80M20G2	183.79±13.7	86.41±4.57	12.97±0.57	15.89±1.55

این اثر را می توان به افزایش پیچ و خم مسیر رشد ترک بستر پلیمری در برخورد با ذرات نانو گرافن با توجه به نسبت منظر بالای آنها نسبت داد. کلوخه های میکرومتری مشاهده شده در بخش (د) شکل ۲ نشان دهنده پراکنش ضعیف نانوکرافن در درصدهای بالا می‌باشد.

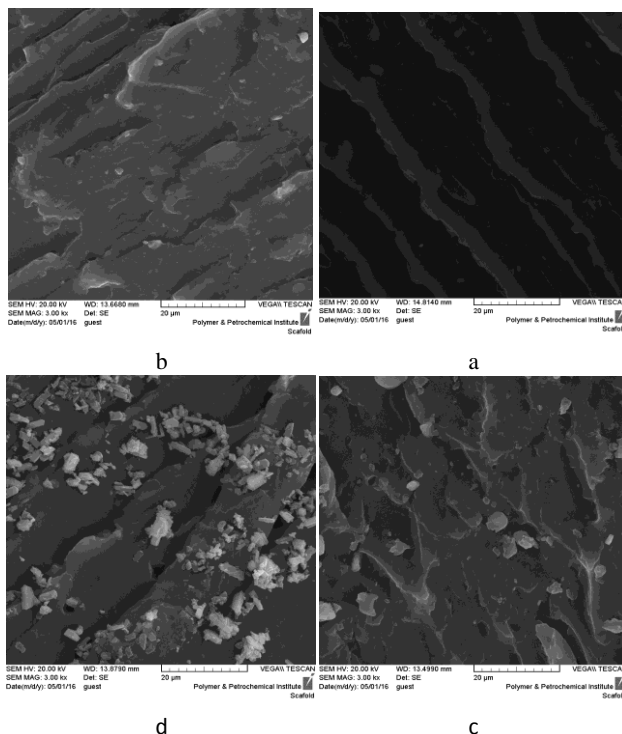


Fig 3. SEM micrographs of UPVC/PMMA(80/20) nanocomposites containing 0, 0.5, 1 and 2 phr GNP (20µm).

شکل 3 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوکامپوزیت های (۸۰/۲۰) PVC/PMMA در حضور ۰، ۰/۵ و ۱ و ۲ درصد نانو گرافن با بزرگنمایی ۲۰ میکرومتر.

4-نتیجه گیری

بررسی نمونه های نانوکامپوزیتی سه جزئی PVC/PMMA/GNP حاوی ۰/۵، ۱ و ۲ نانوکرافن با ترکیب درصد های متفاوت دو جزء پلیمری PVC/PMMA شامل ۸۰/۲۰ و ۹۰/۱۰ توسط آزمون های پراش پرتو ایکس، خواص کششی و خواص ضربه نشان داد که در درصدهای ثابت نانوکرافن،

- [16] Wang, D., Parlow, D., Yao, Q. and Wilkie, C. A., "Pvc-Clay Nanocomposites: Preparation, Thermal and Mechanical Properties" *Journal of Vinyl and Additive Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 203-213, 2001.
- [17] Shiraiwa, M., Pfrang, C., Koop, T. and Pöschl, U., "Kinetic Multi-Layer Model of Gas-Particle Interactions in Aerosols and Clouds (Km-Gap): Linking Condensation, Evaporation and Chemical Reactions of Organics, Oxidants and Water" *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 12, No. 5, pp. 2777-2794, 2012.
- [18] Duan, J., Shao, S., Wang, L., Jiang, P. and Liu, B., "Polylactide/Graphite Nanosheets/Mwcnts Nanocomposites with Enhanced Mechanical, Thermal and Electrical Properties" *Iranian Polymer Journal*, Vol. 21, No. 2, pp. 109-120, 2012.
- [19] Alipour, A., Naderi, G., Bakhshandeh, G. R., Valic, H. and Shokoohi, S., "Elastomer Nanocomposites Based on Nr/Epdm/Organoclay: Morphology and Properties" *International Polymer Processing*, Vol. 2011, No. 1, pp. 48-55, 2011.
- [20] Aouachria, K. and Belhaneche-Bensemra, N., "Miscibility of Pvc/Pmma Blends by Vicat Softening Temperature, Viscometry, Dsc and Ftir Analysis" *Polymer testing*, Vol. 25, No. 8, pp. 1101-1108, 2006.
- [21] Shen, S. and Torkelson, J. M., "Miscibility and Phase Separation in Poly (Methyl Methacrylate)/Poly (Vinyl Chloride) Blends: Study of Thermodynamics by Thermal Analysis" *Macromolecules*, Vol. 25, No. 2, pp. 721-728, 1992.
- [22] Pérez Amaro, L., Coiai, S., Conzatti, L., Manariti, A., Ciardelli, F. and Passaglia, E., "The Effect of Layered Double Hydroxides Dispersion on Thermal and Mechanical Properties of Poly (Vinyl Chloride)/Poly (Methyl Methacrylate) Blends" *Polymer International*, Vol. 62, No. 4, pp. 554-565, 2013.
- [23] Chong, H., Hinder, S. and Taylor, A., "Graphene Nanoplatelet-Modified Epoxy: Effect of Aspect Ratio and Surface Functionality on Mechanical Properties and Toughening Mechanisms" *Journal of materials science*, Vol. 51, No. 19, pp. 8764-8790, 2016.
- [24] Dul, S., Fambri, L., Merlini, C., Barra, G., Bersani, M., Vanzetti, L. and Pegoretti, A., "Effect of Graphene Nanoplatelets Structure on the Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Composites" *Polymer Composites*.
- [25] Ramesh, S., Leen, K. H., Kumutha, K. and Arof, A., "Ftir Studies of Pvc/Pmma Blend Based Polymer Electrolytes" *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 66, No. 4-5, pp. 1237-1242, 2007.
- [26] Soman, V. V. and Kelkar, D. S., "Ftir Studies of Doped Pmma-Pvc Blend System" in *Proceeding of Wiley Online Library*, pp. 152-161.
- [27] Modak, S. K., Mandal, A. and Chakrabarty, D., "Studies on Synthesis and Characterization of Poly (Methyl Methacrylate)-Bentonite Clay Composite by Emulsion Polymerization and Simultaneous in Situ Clay Incorporation" *Polymer Composites*, Vol. 34, No. 1, pp. 32-40, 2013.
- [28] Wang, Y., Zhang, H. Z. and Wu, Y., "Structure and Properties of Strain-Induced Crystallization Rubber-Clay Nanocomposites by Co-Coagulating the Rubber Latex and Clay Aqueous Suspension" *J Appl Polym Sci*, Vol. 96, pp. 318, 2005.
- [29] Unnikrishnan, L., Mohanty, S. and Nayak, S. K., "Evaluation of Flame Retardancy and Shear Resistivity Characteristics of Organoclay within Acrylate Polymer" *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 118, No. 1, pp. 405-416, 2014.
- [30] Varghese, S., Gatos, K. G., Apostolov, A. A. and Karger-Kocsis, J., "Morphology and Mechanical Properties of Layered Silicate Reinforced Natural and Polyurethane Rubber Blends Produced by Latex Compounding" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 92, No. 1, pp. 543-551, Apr 5, 2004.
- [31] Varghese, S. and Karger-Kocsis, J., "Melt-Compounded Natural Rubber Nanocomposites with Pristine and Organophilic Layered Silicates of Natural and Synthetic Origin" *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 91, pp. 813-819, 2004.



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## 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 13114-16846، پست الکترونیکی نویسنده‌دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

### چکیده (سبک عنوان چکیده)

### اطلاعات مقاله:

دریافت: .....

پذیرش: .....

کلیدواژه‌گان (استایل عنوان کلید

واژه‌گان)

حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده

کاما (استایل کلیدواژه‌گان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای

کلید واژه‌گان است و تمامی اجزای آن مانند

بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار

رفته در سرتاسر مقاله فقط تا بجز نیو

رومن است.

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 25 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور (15 درصد از مجله علمی-پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت و 10 درصد دیگر از بقیه مجلات علمی-پژوهشی) انتخاب شود.

## 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)

پس از آن با کپی و سپس چسباندن (پیست) 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، به‌طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:

Paste option → match with Destination format

1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1)

1- مقدمه (استایل عنوان سطح 1)

برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت) 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.

<sup>2</sup> Paste

<sup>3</sup> Style

<sup>1</sup> Template

است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

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، غیرایتالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک می‌آیند (توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن<sup>۲</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>۳</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 کلیه 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.

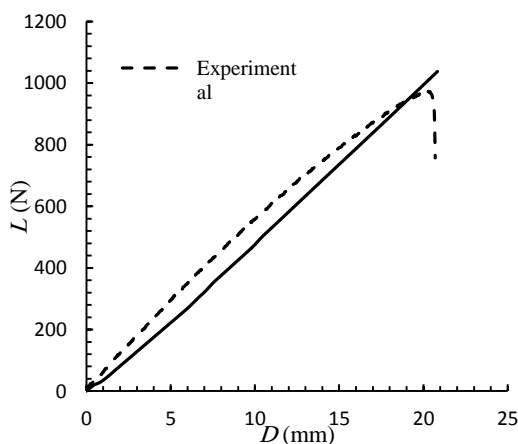


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی ۵ 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 تک‌تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,7,5].

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.

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

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی<sup>۱</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 ۱.۲ صحیح و ۱/۲ 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 دوستونی 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)

### 1-2- 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 سبک متن مقاله و بدون پرانتز

<sup>2</sup> Times New Roman

<sup>3</sup> Gridlines

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



## 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 همی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سباز 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	9	8
عناوین بخش‌های سطح 2	10	9
متن اصلی مقاله	9	8
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	---	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها <sup>(*)</sup>	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

<sup>(\*)</sup>فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مٹ 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 مٹ 9pt 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 مٹ 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 مٹ‌تایپ<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 سطری بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعداز 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  $(a \cdot b)$  به جای نقطه ضرب  $(a \cdot b)$  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 «می شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است.

در مورد «ها»ی 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 «ساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

## 4-1- 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

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 ( $Nm^{-2}$ )

$P$  نیرو ( $Nm^{-2}$ )

$T$  دما (K)

علایم یونانی

$\sigma$  تنش ( $Nm^{-2}$ )

$\epsilon$  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 کروهه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود.

نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ حداقل ۲۵ درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور (۱۵ درصد از مجله علمی-پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت و ۱۰ درصد دیگر از بقیه مجلات علمی-پژوهشی) 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 تاکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [10-2]" 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.

تذکر: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت<sup>۱</sup> در نرم‌افزار اندنوت<sup>۲</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>۳</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.

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

<sup>2</sup> EndNote

<sup>3</sup> Language