



مطالعه اثر روش سنتز پودر کامپوزیتی $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ بر مشخصات و ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی آن

مریم دلاوری¹، مهدی پورعبدلی^{2*}، حدیثه حسینی منفرد³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

2- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

3- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

* همدان، صندوق پستی 65155-579، mpourabdoli@hut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در تحقیق حاضر، پودر کامپوزیتی Co_3O_4 - 5wt. % Al_2O_3 به دو روش آسیاکاری همزمان مخلوط اکسیدها و آسیاکاری جداگانه اکسید کبالت و اکسید آلومینیوم و سپس مخلوط کردن آنها تهیه و ماده حاصل از نظر سینترشدن ذرات، اندازه متوسط ذرات، نحوه پخش ذرات اکسید آلومینیوم در فاز زمینه اکسید کبالت و رفتار احیا-اکسیداسیون آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (Fe-SEM)، طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS-map) و گرما وزنسنجی (TGA) بررسی شد. نتایج نشان داد که به طور کلی نمونه‌های تهیه شده به روش آسیاکاری همزمان مخلوط اکسیدها در زمان کوتاه (کمتر از یک ساعت آسیاکاری)، ظرفیت ذخیره انرژی بالایی (معادل حدود 2 درصد وزنی ذخیره اکسیژن) نسبت به نمونه‌های تهیه شده در زمان کوتاه با استفاده از روش دوم (1-1.5 درصد وزنی ذخیره اکسیژن) دارند. این در حالی بود که نمونه‌های تهیه شده در زمان‌های طولانی‌تر (16 ساعت آسیاکاری) با روش دوم دارای ظرفیت ذخیره بالایی (معادل 2-6 درصد وزنی ذخیره اکسیژن) نسبت به نمونه‌های تهیه شده با روش اول (حدود 2 درصد وزنی ذخیره اکسیژن) در زمان طولانی مدت آسیاکاری هستند. در بین نمونه‌های تهیه شده به روش دوم نیز نمونه‌هایی که فاز اکسید کبالت در آنها به مدت 16 ساعت آسیاکاری شده بودند رفتار احیا-اکسیداسیون بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان دادند. همچنین مشخص شد که کاهش اندازه ذرات پودر کامپوزیتی الزاما هم جهت با بهبود ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی نیست.

دریافت: 1398/07/28

پذیرش: 1399/06/25

کلیدواژگان:

ذخیره انرژی حرارتی

اکسید کبالت

اکسید آلومینیوم

آسیاکاری مکانیکی

Study of $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ Composite Powder Synthesis Method on Specification and Thermal Energy Storage Capacity

Maryam Delavari, Mehdi Pourabdoli*, Hadiseh Hosseini Monfared

Department of Metallurgy and Materials, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

* P.O.B. 65155-579, Hamedan, Iran, mpourabdoli@hut.ac.ir

Keywords

Thermal energy storage
Cobalt oxide
Aluminum oxide
Mechanical milling

Abstract

In this research, Co_3O_4 -5 wt.% Al_2O_3 composite was prepared by two different methods including milling of oxide mixtures (first method) and mixing of pre-milled cobalt oxide and iron oxide (second method). Then, particle morphology, average particle size, Al_2O_3 distribution, and thermal energy storage capacity were investigated by Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), and Thermal Gravimetric Analysis (TGA) methods. The results showed that samples prepared by first method during short milling time (less than one hour), generally showed better energy storage capacity (equivalent to 2 wt. % of O_2 storage) than the samples prepared by second method in the short milling time (equivalent to 1-1.5 wt. % of O_2 storage). It was while that samples prepared in long milling time (16 h) by second method had higher energy storage capacity (equivalent to 2-6 wt. % of O_2 storage) than samples prepared by first method (equivalent to 2 wt. % of O_2 storage) in similar ball milling time. Among the samples prepared by second method, the samples prepared by 16-h milled cobalt oxide showed better redox behavior than the other samples. It was also found that reducing the particle size of the composite powder (reducing the diffusion distance of oxygen atoms) is not necessarily accompanied by improved thermal energy storage capacity.

1- مقدمه

و ایجاد تکنولوژی‌های جدیدتری برای تولید انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر است [2 و 1]. یکی از روشهایی که می‌تواند جایگزین سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی شود، استفاده از تکنولوژی ذخیره سازی انرژی حرارتی خورشیدی است [3]. سیستم ذخیره سازی حرارت به صورت ترموشیمیایی

استفاده از سوخت‌های فسیلی سبب انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای شده و تغییرات آب و هوایی گسترده‌ای از جمله گرم شدن کره زمین و آلودگی هوا را سبب شده است. این موضوع بیان‌گر نیاز به تغییر در سیستم‌های تولید انرژی

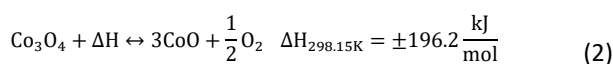
Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Delavari, M., Pourabdoli, M., and Hosseini Monfared, H., "Study of $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ Composite Powder Synthesis Method on Specification and Thermal Energy Storage Capacity", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1137-1144, 2021.

مزایای قابل توجهی در مقایسه با سایر روش‌های ذخیره سازی حرارت دارد. این روش دارای ویژگی‌هایی از قبیل چگالی بالای ذخیره‌سازی انرژی، ذخیره سازی حرارت در دمای اتاق و نگهداری آن برای زمان‌های طولانی است [5] و [4]. در ذخیره انرژی حرارتی به صورت ترموشیمیایی از یک واکنش شیمیایی برگشت‌پذیر استفاده می‌شود که در آن انرژی حرارتی به صورت شیمیایی در یک ماده به واسطه یک واکنش احیا یا اکسیداسیون ذخیره یا آزاد می‌شود. این عملیات توسط یک واکنش گاز-جامد که قادر به انجام واکنش‌های رفت و برگشت (احیا و اکسیداسیون) است، امکان‌پذیر می‌گردد [6]. واکنش 1 و 2 نمونه‌ای از این واکنش‌ها را نشان می‌دهد:

در واکنش‌های فوق، ماده C (Co₃O₄) با جذب انرژی حرارتی، به دو ماده A (CoO) و B (O₂) تبدیل می‌شود. مقدار گرمایی که در حین تولید مجدد C آزاد می‌شود نشان دهنده ظرفیت سیستم است. عوامل تاثیرگذار در انتخاب یک ماده مناسب (مثلاً اکسیدهای فلزی) به منظور ذخیره انرژی حرارتی به صورت ترموشیمیایی از طریق سیکل‌های اکسیداسیون-احیا وجود عبارتند از: شرایط ترمودینامیکی، قیمت مواد، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، سینتیک واکنش، سمی بودن ماده و رفتار مواد در حین سیکل‌های احیا و اکسیداسیون [7-9]. Co₃O₄ برای ذخیره انرژی حرارتی به صورت شیمیایی، یک گزینه‌ی بسیار امیدوارکننده به علت بالا بودن آنتالپی و نیز برگشت-پذیری واکنش احیا-اکسیداسیون است. اگر چه اکسیداسیون مجدد ماده در سیکل‌های با تعداد زیاد به دلیل سینتر شدن ماده و مشکل سینتیکی نفوذ اکسیژن بسیار آهسته و در مواردی به طور کامل متوقف می‌شود. اکسیدهای Co₃O₄ و CoO در دمای تعادلی حدود 900 °C به یکدیگر تبدیل می‌شوند که برای ذخیره سازی انرژی حرارتی خورشیدی و سیستم‌های مربوطه مناسب است. سیستم‌های متمرکز کننده انرژی خورشید دمای در حدود 900-1000 °C را فراهم می‌کنند [10, 11]. با توجه به مطالعات انجام شده طی واکنش اکسیداسیون (واکنش 1)، تمامی ذرات CoO بطور کامل به Co₃O₄ تبدیل نمی‌شوند که این امر به دلیل کاهش سرعت واکنش در اثر تشکیل لایه‌های اکسیدی Co₃O₄ به عنوان مانع برای ادامه واکنش اکسیداسیون مجدد است [12, 13]. بنابراین، استفاده از اکسیدکبالت جهت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نیازمند به تحقیق و مطالعه بیشتری است. برای همین، جهت جلوگیری از سینتر شدن ذرات و کاهش ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی در اکسیدکبالت و نیز کاهش ضخامت لایه‌های Co₃O₄ (مانع نفوذ اکسیژن هستند)، از روش‌هایی مانند آسیاکاری مکانیکی [14] و افزودن فاز ثانویه Fe₂O₃ [10, 13] و Al₂O₃ [15, 16] و نیز بهره برده‌اند. اولین بار Hutching و همکاران [11] ذخیره انرژی حرارتی در اکسیدهای کبالت (CoO و Co₃O₄) را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که اکسیدهای کبالت دارای ظرفیت مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی هستند. در سال 2011، یک تیم تحقیقاتی در وزارت انرژی آمریکا [8] رفتار اکسیدهای مختلف را از نقطه نظر ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی بررسی کردند. نتایج بررسی‌های گروه مذکور نشان داد که از میان بسیاری از اکسیدها، Co₃O₄ دارای ظرفیت مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی است و عیب عمده آن، سینتیک ضعیف



نسبت به اکسید کبالت اولیه بهتر می‌شود. همچنین آنها دریافتند که افزودن Fe₂O₃ همراه با آسیاکاری مکانیکی موجب بهبود تاثیرگذاری Fe₂O₃ می‌شود. حسوند و همکاران [15] اثر زمان آسیاکاری مکانیکی را روی کامپوزیت‌های پودری Co₃O₄ حاوی Al₂O₃ و Y₂O₃ مطالعه کردند. آنها دریافتند که تاثیرگذاری Al₂O₃ در زمان‌های کوتاه آسیاکاری بیشتر است. این درحالی بود که نتایج آنها نشان داد که افزودن Y₂O₃ در هر زمان آسیاکاری موجب افت شدید ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی در کامپوزیت‌های پودری تهیه شده نسبت به اکسیدهای کبالت اولیه می‌شود. آنها سینتر شدن شدید ذرات اکسیدکبالت را با افزودن Y₂O₃ دلیل افت شدید ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی در کامپوزیت‌ها تشخیص دادند. علاوه بر مطالعات فوق، بررسی سینتیکی احیا و اکسیداسیون مجدد در کامپوزیت‌های حاوی Al₂O₃ و Y₂O₃ [16] و در کامپوزیت حاوی Fe₂O₃ [17] انجام و انرژی اکتیواسیون فرایندهای مذکور محاسبه شده است.

2- مواد و روش‌های آزمایش

در تحقیق حاضر با هدف ادامه تحقیقات قبلی و تکمیل اطلاعات در این زمینه، روش‌های مختلف مخلوط سازی، آماده‌سازی و سنتز (مخلوط سازی ساده، آسیاکاری همزمان فازهای تشکیل دهنده پودر کامپوزیتی در زمان‌های مختلف، آسیاکاری جداگانه فازهای تشکیل دهنده کامپوزیت در زمان‌های مختلف و سپس مخلوط سازی آنها) پودرهای کامپوزیتی 5 wt.% Co₃O₄-Al₂O₃ روی سینتر شدن ذرات، پخش فاز ثانویه و ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی اکسید کبالت مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه منابع و مراجع نشان داد که تاکنون مطلبی در مورد اثر روش‌های مختلف مخلوط سازی، آماده-سازی و سنتز روی مشخصات و ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی کامپوزیت‌های اکسید کبالت حاوی Al₂O₃ منتشر نشده است و تحقیق حاضر اولین تحقیق در این مورد و از این نقطه نظر دارای نوآوری است.

برای تهیه کامپوزیت 5wt.% Al₂O₃-Co₃O₄ از مواد اولیه با مشخصات ذکر شده در جدول 1 استفاده شد. شکل 1 تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر Co₃O₄ و Al₂O₃ را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ذرات اکسید کبالت متشکل از ذرات ریز چسبیده به هم با اندازه کمتر از 10 میکرون و ذرات

برای آسیابکاری، وزن مشخصی از اکسید کبالت و اکسید آلومینیوم یا مخلوط آنها داخل محفظه آسیابکاری ریخته شد و با تنظیم سرعت چرخش rpm 300، نسبت گلوله به پودر 20 و اتمسفر هوا، تحت عملیات آسیابکاری قرار گرفت. برای جلوگیری از افزایش دمای نمونه در حین آسیابکاری، بعد از هر ساعت آسیابکاری، 15 دقیقه استراحت در نظر گرفته شد. برای آسیابکاری از یک دستگاه آسیای گلوله‌ای-سیاره‌ای (Restch PM 100) و محفظه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن (حجم 150 میلی‌لیتر و سختی حدود 30 HRC) و گلوله‌های فولادی ضد سایش کروم‌دار (قطر 10 و 20 میلی‌متر و سختی حدود 60 HRC) استفاده شد. برای اندازه‌گیری ظرفیت جذب و دفع اکسیژن (معادل ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی)، از اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرارگیری در کوره و انجام فرایند احیا-اکسیداسیون استفاده شد. برای انجام فرایند احیا-اکسیداسیون، 5 گرم از پودر کامپوزیتی، داخل بوته آلومینایی ریخته و سپس در داخل کوره قرار داده شد. سیکل‌های احیا-اکسیداسیون با اعمال دماهای مورد نیاز ($900\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$) برای احیا و $700\text{--}900$ برای اکسیداسیون مجدد، انجام و در پایان وزن نمونه اندازه‌گیری شد. هر سیکل از فرایند احیا-اکسیداسیون با نرخ گرمایش/سرمايش 10 درجه سانتیگراد بر دقیقه و نرخ دمش هوا 1.5 لیتر بر دقیقه [16 و 15] انجام شد. همانطوری که قبلاً نیز اشاره شد، ظرفیت جذب و دفع اکسیژن بر اساس وزن نمونه قبل و بعد از سیکل احیا-اکسیداسیون محاسبه شد. اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها با استفاده از یک ترازوی دیجیتال دو رقم اعشار ساخت شرکت AND ژاپن انجام شد. مقدار خطای اندازه‌گیری برای نمونه‌ها حدود 10٪ بر اساس دقت ترازو (0.01 گرم) و مقدار ماده مورد استفاده در نظر گرفته شد. باید توجه شود که تغییر وزن تئوری ماده بعد از احیا یا اکسیداسیون کامل حدود 6.64 درصد وزنی است. از میکروسکوپ الکترونی روبشی Jeol مدل JSM-840A و میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی QUANTA200 برای مطالعه سینترشدن پودرها و برای آنالیزهای EDS-map از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی TESCAN و میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی QUANTA 200 استفاده شد. برای اندازه‌گیری میانگین اندازه ذرات نمونه‌ها از تصاویر SEM و نرم افزار MIP4 بهره برده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- تاثیر روش آماده‌سازی بر متوسط اندازه ذرات و سینترشدن آنها بعد از فرایند احیا-اکسیداسیون (ردوکس)

شکل 2 متوسط اندازه ذرات نمونه‌ها را بعد از سیکل اول و سیکل سوم فرایند ردوکس برای نمونه‌هایی که با روش‌های مختلف تهیه شده‌اند، نشان می‌دهد. در شکل 2 (و شکل 9)، منظور از Xh BM ($\text{Co}_3\text{O}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) کامپوزیت تهیه شده از آسیابکاری همزمان اکسیدهای Co_3O_4 و Al_2O_3 به مدت X ساعت و منظور از (Yh BM) (Al_2O_3) + (Co_3O_4 Xh BM) کامپوزیت تهیه شده از مخلوط سازی Co_3O_4 آسیابکاری شده به مدت X ساعت و Al_2O_3 آسیابکاری شده به مدت Y ساعت است. مطابق این شکل، اکسیدکبالت اولیه بیشترین رشد اندازه ذرات در طی سیکل سوم فرایند ردوکس داشته است. همانطوری که مشخص است، اندازه متوسط ذرات این نمونه بعد از سیکل اول و سیکل سوم به ترتیب بیش از 2 و 2.5 میکرون است. مقایسه اکسیدکبالت اولیه با سایر نمونه‌ها، نشان می‌دهد که افزودن Al_2O_3 به عنوان فاز ثانویه توانسته است از رشد ذرات در طی سیکل سوم فرایند ردوکس جلوگیری کند. قابل ذکر است که اندازه متوسط ذرات Al_2O_3 بعد از 0.5 و 7 ساعت آسیابکاری

اکسید آلومینیوم به شکل اسفنجی و دارای ابعاد کمتر از 200 میکرون هستند. در این تحقیق، پودر کامپوزیتی $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt.}\% \text{Al}_2\text{O}_3$ با روش‌های ذکر شده در جدول 2 تهیه و تحت سیکل فرایند احیا و اکسیداسیون قرار گرفت. مقدار 5 درصد وزنی اکسید آلومینیوم استفاده شده در پودر کامپوزیتی، بر اساس نتایج تحقیقات قبلی [15 و 16] انتخاب شده است.

جدول 1 مشخصات مواد مورد استفاده

Table 1. Specification of used materials

ترکیب	خلوص wt. %	اندازه ذرات μm	شرکت سازنده
Co_3O_4	>99	<10	Merck
Al_2O_3	>99	<200	Fluka

جدول 2 روش مورد استفاده برای تهیه پودر کامپوزیتی $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5wt.}\% \text{Al}_2\text{O}_3$

Table 2. Methods used for synthesizing of $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5wt.}\% \text{Al}_2\text{O}_3$ composite powder

روش	شرح
اول	مخلوط سازی دستی پودرهای Co_3O_4 و Al_2O_3 به مدت 10 دقیقه
دوم	آسیابکاری همزمان پودرهای Co_3O_4 و Al_2O_3 به مدت 1 و 16 ساعت
سوم	آسیابکاری Co_3O_4 (1 و 16 ساعت) و آسیابکاری Al_2O_3 (0.5 و 7 ساعت) به صورت جداگانه و مخلوط کردن آن
چهارم	آسیابکاری Co_3O_4 (1 و 16 ساعت) و مخلوط کردن آن با Al_2O_3 اولیه مشابه روش اول
پنجم	آسیابکاری Al_2O_3 (0.5 و 7 ساعت) و مخلوط کردن آن با Co_3O_4 اولیه مشابه با روش اول

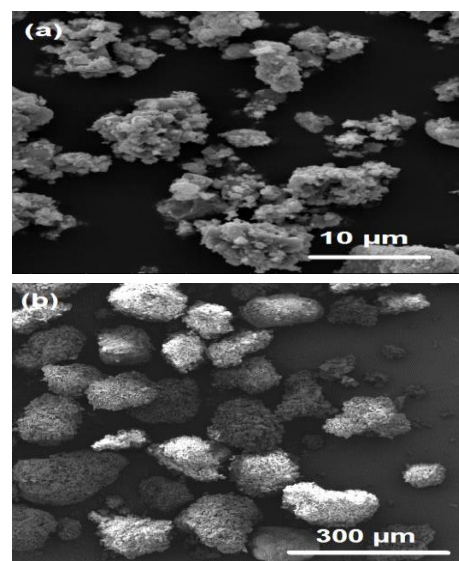


Fig. 1 SEM images of as-received a) Co_3O_4 and b) Al_2O_3

شکل 1 تصاویر میکروسکوپ الکترونی: (a) Co_3O_4 اولیه و (b) Al_2O_3 اولیه

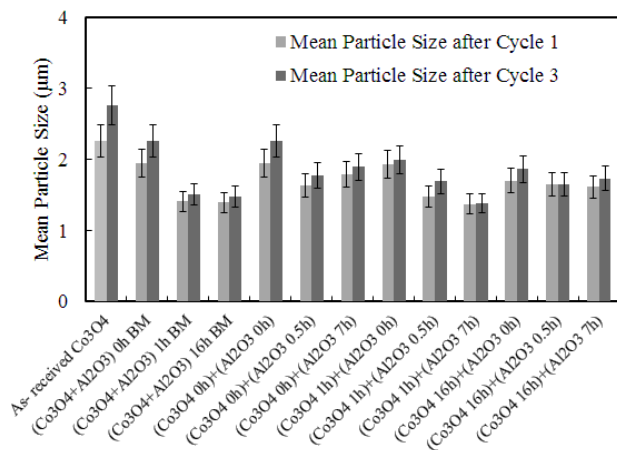


Fig.2 Mean particle size of Co_3O_4 -5 wt. % Al_2O_3 composite powder, prepared by various methods after first and third redox

شکل 2 متوسط اندازه ذرات پودر کامپوزیتی Co_3O_4 -5 wt. % Al_2O_3 تهیه شده با روش‌های مختلف بعد از سیکل اول و سوم

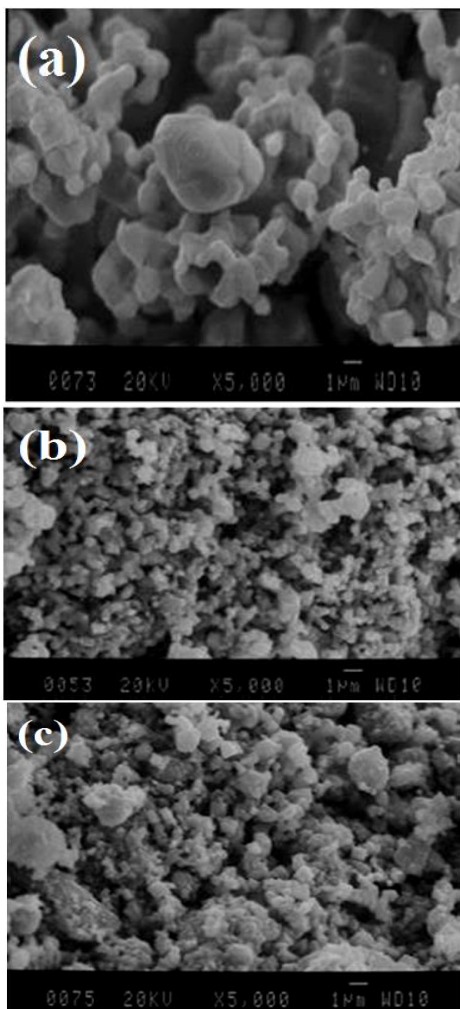


Fig. 3 SEM images of Co_3O_4 -5 wt. % Al_2O_3 powder prepared by milling of oxides during a) 0 h, b) 1 h, c) 16 h after third redox cycle

شکل 3 تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر Co_3O_4 -5 wt. % Al_2O_3 تهیه شده با آسیکاری اکسیدها به مدت (a) 0 ساعت، (b) 1 ساعت و (c) 16 ساعت بعد از سیکل سوم

مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نرم افزار MIP4 به ترتیب 6.6 و 4.3 میکرون بدست آمد. مطابق شکل 2، در نمونه‌هایی که در آنها اکسیدکبالت و اکسیدآلومینیوم به طور همزمان آسیکاری شده‌اند، افزایش زمان آسیکاری بیشترین تأثیر را در کاهش رشد اندازه متوسط ذرات در سیکل سوم داشته است. در نمونه‌هایی که اکسیدکبالت در آنها تحت عملیات آسیکاری قرار نگرفته است (Co_3O_4 0BM)، افزایش زمان آسیکاری فاز ثانویه از 0 به 0.5 و 7 ساعت تأثیر محسوسی در کاهش اندازه ذرات نمونه‌ها بعد از فرایند ردوکس داشته است. این در حالی است که افزایش زمان آسیکاری فاز ثانویه برای نمونه‌هایی که اکسیدکبالت آنها 1 ساعت تحت آسیکاری قرار گرفته است، موجب شده است که متوسط اندازه ذرات نمونه‌ها به ترتیب از حدود 2 میکرون به 1.5 و 1.4 میکرون متنظر با زمان آسیکاری فاز ثانویه برسد که نشان دهنده کاهش رشد ذرات با انجام آسیکاری فاز زمینه به مدت 1 ساعت است. دلیل این امر می‌تواند پخش بهتر ذرات آلومینا در زمینه باشد. علاوه بر این مطابق شکل مذکور، با مقایسه اندازه ذرات بعد از سیکل اول و سیکل سوم مشخص می‌شود که تقریباً در بیشتر نمونه‌ها اندازه ذرات بعد از سیکل سوم نسبت به سیکل اول افزایش یافته است. این اختلاف در مورد نمونه اکسیدکبالت اولیه و نمونه اکسید کبالت حاوی اکسیدآلومینیوم آسیکاری نشده بیش از سایر نمونه‌ها است. دلیل این امر می‌تواند عدم وجود فاز ثانویه در اکسید کبالت اولیه و پخش غیر یکنواخت ذرات فاز ثانویه در نمونه آسیکاری نشده، باشد. نمونه‌هایی که فاز ثانویه آنها آسیکاری نشده است (Al_2O_3 0h.BM)، افزایش زمان آسیکاری اکسید کبالت از 0 به 1 و 16 ساعت موجب کاهش اندازه ذرات نمونه‌ها بعد از فرایند ردوکس در حد کم شده است. اندازه ذرات کمتر نمونه اکسید کبالت 16 ساعت آسیکاری شده نسبت به نمونه‌های 0 و 1 ساعت آسیکاری می‌تواند به علت ریزدانه بودن ذرات اولیه نمونه اکسید کبالت (0.6 میکرون) در اثر زمان آسیکاری زیاد باشد. همچنین برای نمونه‌هایی که فاز افزودنی آنها به مدت 0.5 ساعت آسیکاری شده‌اند، افزایش زمان آسیکاری اکسید کبالت تأثیر محسوسی در تغییر اندازه ذرات نمونه‌ها بعد از فرایند ردوکس نداشته است. طبق تحقیقات سایر محققین [13-16]، آسیکاری در زمان‌های طولانی به دلیل ذخیره شدن انرژی در ذرات و آزادسازی آن در حین فرایندهای ردوکس، موجب تشدید سینتر شدن و رشد ذرات در حین فرایندهای ردوکس می‌شود.

3-1-1- آسیکاری همزمان مخلوط اکسید کبالت و اکسید آلومینیوم

شکل 3 تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های تهیه شده به روش آسیکاری همزمان مخلوط اکسیدکبالت و اکسیدآلومینیوم را بعد از سیکل سوم ردوکس نشان می‌دهد. مقایسه نمونه‌های آسیکاری شده به مدت 0، 1 و 16 ساعت در شکل مذکور نشان می‌دهد که نمونه آسیا کاری شده به مدت 1 ساعت دارای اندازه ذرات ریز تر و سینتر شدن کمتری نسبت به سایر نمونه‌های این گروه است. دلیل این امر را می‌توان به تأثیر مثبت زمان آسیکاری کوتاه مدت بر کاهش سینتر شدن ذرات نسبت داد [13, 14]. طبق این تصاویر، سینتر شدن در نمونه مخلوط آسیکاری نشده ($(\text{Co}_3\text{O}_4+\text{Al}_2\text{O}_3)$ 0h BM) بیش از سایر نمونه‌ها مشهود است. دلیل این امر ذرات بزرگتر اکسیدهای اولیه و نیز پخش ناهمگن ذرات اکسید آلومینیوم در زمینه اکسید کبالت می‌تواند باشد.

3-1-2- اثر زمان آسیاکاری Al_2O_3 و زمان آسیاکاری Co_3O_4

کبات نیز پخش شده است که می‌تواند دلیل کاهش سینتر شدن اکسید کبات در حین فرآیندهای احیا و اکسیداسیون باشد.

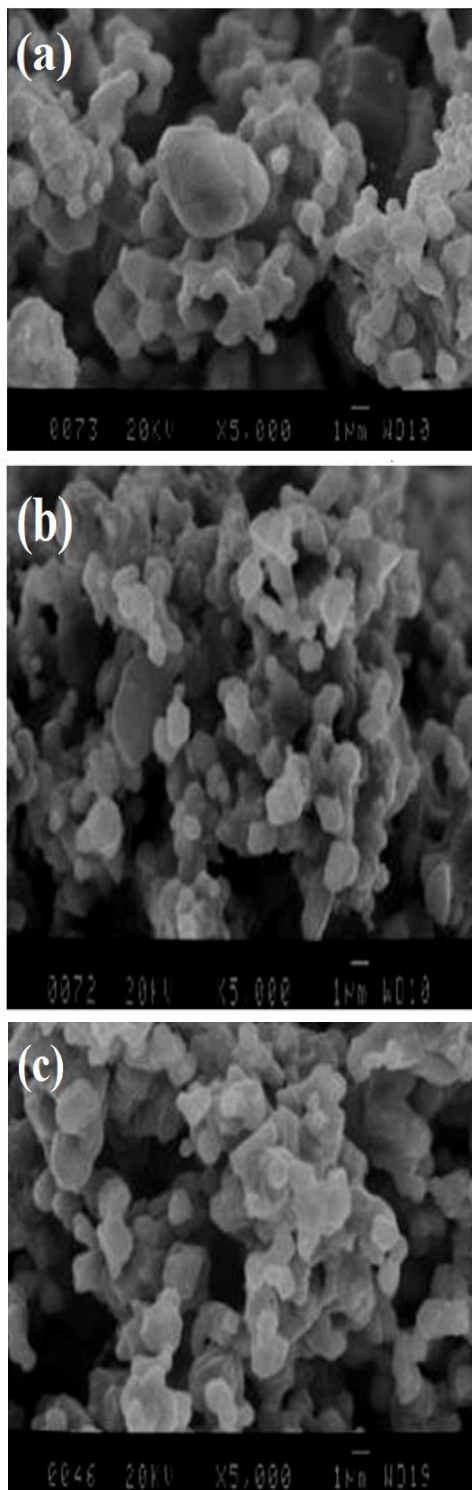


Fig 4. SEM images of $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. % Al}_2\text{O}_3$ powder prepared from as-received cobalt oxide with Aluminum oxide ball milled for a) 0 h, b) 0.5, c) 7 h after third redox cycle

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. % Al}_2\text{O}_3$ تهیه شده از اکسید کبات اولیه با اکسید آلومینیوم آسیاکاری شده به مدت (a) 0 ساعت، (b) 0.5 ساعت و (c) 7 ساعت بعد از سیکل سوم

شکل 4، 5 و 6 به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های تهیه شده از اکسید کبات آسیاکاری شده به مدت 0، 1 و 16 ساعت را بعد از سیکل سوم نشان می‌دهد. مقایسه این تصاویر نشان می‌دهد که نمونه‌هایی که از اکسیدکبات آسیاکاری شده به مدت 1 ساعت تهیه شده‌اند، دارای اندازه ذرات کوچکتری (سینتر شدن کمتر) هستند. در مورد اثر آسیاکاری فاز ثانویه نیز می‌توان گفت به طور کلی افزایش زمان آسیاکاری فاز ثانویه در زمان آسیاکاری فاز زمینه به مدت 1 ساعت، اثر مثبت بر کاهش سینتر شدن و کاهش رشد ذرات دارد در حالی که افزایش زمان آسیاکاری فاز ثانویه در زمان‌های آسیاکاری فاز زمینه به مدت 16 ساعت، اثر منفی در کاهش سینتر شدن و کاهش رشد ذرات داشته است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که زمان بیشتر آسیاکاری فاز ثانویه با زمان کمتر آسیاکاری فاز زمینه برای کاهش اندازه ذرات مطلوب تر است. مطابق شکل 4، در نمونه‌ای که فاز زمینه آن آسیاکاری نشده است، افزایش زمان آسیاکاری فاز ثانویه تاثیر محسوسی بر کاهش سینتر شدن ذرات نداشته است. از این رو، نمونه تهیه شده از اکسیدکبات آسیا نشده دارای ذرات درشت و میزان سینتر شدن بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها است. این امر به دلیل اندازه ذرات اولیه درشت‌تر (چون آسیاکاری نشده است) و عدم پخش یکنواخت فاز ثانویه نسبت به سایر نمونه ها می‌تواند باشد. طبق تحقیقات نکوکار و همکاران [13] و حسونند و همکاران [15, 16] افزایش زمان آسیاکاری فاز زمینه به دلیل افزایش سطح ویژه ذرات به شدت موجب افزایش سینتر شدن ذرات اکسیدکبات در فرایند-های احیا-اکسیداسیون می‌شود. از این رو، اگر چه افزودن اکسید آلومینیوم از سینتر شدن ذرات تا حدودی جلوگیری کرده است ولی افزودن اکسید آلومینیوم در زمان‌های آسیاکاری کمتر فاز زمینه بسیار موثرتر عمل می‌کند. به احتمال زیاد به دلیل افزایش سطح ویژه ذرات اکسیدکبات با افزایش زمان آسیاکاری، ذرات اکسید آلومینیوم امکان پوشاندن همه ذرات اکسیدکبات و جلوگیری از سینتر شدن آنها را ندارند.

3-2- اثر روش آماده سازی بر پخش ذرات Al_2O_3 در زمینه اکسید کبات

شکل‌های 7 و 8 به ترتیب تصاویر EDS-map برخی از نمونه‌های آماده شده به روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر، مشاهده می‌شود که تمرکز ذرات اکسید آلومینیوم در برخی نقاط نمونه بیشتر است. با توجه به شکل 7، اندازه ذرات اکسید آلومینیوم پخش شده در نمونه‌های حاوی آلومینیوم 0.5 ساعت و 7 ساعت آسیاکاری شده به ترتیب در حدود کمتر از 5 میکرون و کمتر از 2 میکرون هستند. اندازه ذرات اکسید آلومینیوم اولیه که حدود کمتر از 200 میکرون بوده است (شکل ب1)، موجب شده است که ذرات اکسید آلومینیوم آسیاکاری شده نیز نسبتاً درشت باشد. علاوه بر این، برخی از این نقاط می‌تواند مربوط به فاز اسپینل باشد که از نظر تئوری دارای حدود 57 درصد وزنی اکسید آلومینیوم است. به طور کلی، آنالیز EDS-map نمونه‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر تمرکز آلومینیوم در برخی نقاط، این عنصر در سایر قسمت‌های نمونه و در بین ذرات اکسید

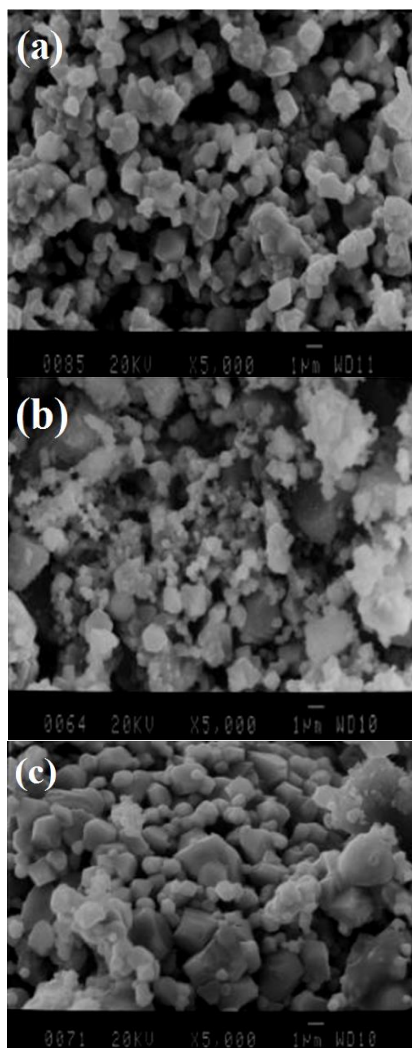


Fig 6. SEM images of $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. \% Al}_2\text{O}_3$ powder prepared from 16 h – ball milled cobalt oxide with Aluminum oxide ball milled for a) 0 h, b) 0.5, c) 7 h after third redox cycle

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. \% Al}_2\text{O}_3$ تهیه شده از اکسید کبالت آسیاکاری شده به مدت 0 ساعت، (b) 0.5 ساعت و (c) 7 ساعت بعد از سیکل سوم

3-3- اثر روش آماده سازی بر ظرفیت ذخیره اکسیژن (معادل ذخیره انرژی حرارتی)

با توجه به واکنش 2، درصد جذب و دفع اکسیژن را می توان معیاری از ذخیره انرژی حرارتی در ماده در نظر گرفت. لذا، بحث روی ذخیره اکسیژن به معنی بحث روی ظرفیت ذخیره حرارت است. شکل 9، تأثیر نوع روش آماده سازی را بر ظرفیت ذخیره نمونه ها بعد از سیکل سوم نشان می دهد با مقایسه نمودارهای شکل 9، مشاهده می شود که نمونه های تهیه شده از اکسید کبالت 1 ساعت آسیاکاری شده، کاهش ظرفیت ذخیره بیشتری از خود نشان داده اند. این در حالی است که نمونه های تهیه شده از اکسید کبالت 16 ساعت آسیاکاری شده، بیشترین ظرفیت جذب اکسیژن را دارند. همچنین از شکل 9 دیده می شود کاهش ظرفیت در نمونه هایی که با آسیاکاری مخلوط اکسید کبالت و اکسید آلومینیوم تهیه شده اند و نمونه هایی که از اکسید کبالت اولیه

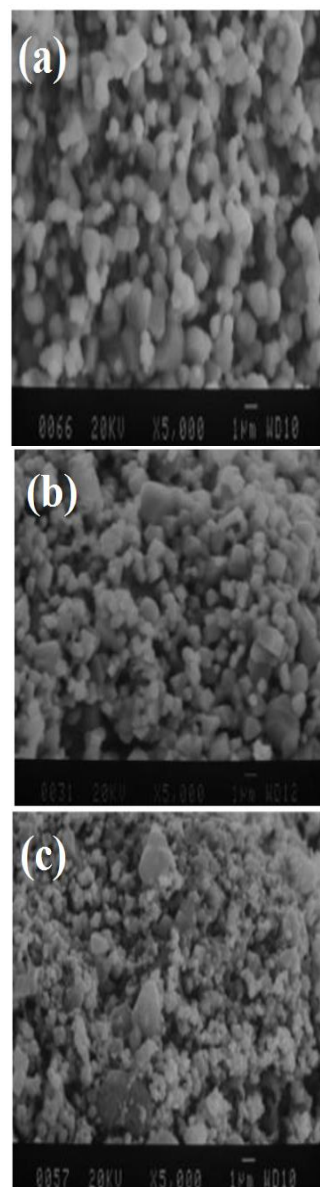


Fig 5. SEM images of $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. \% Al}_2\text{O}_3$ powder prepared from 1 h ball milled cobalt oxide with Aluminum oxide ball milled for a) 0 h, b) 0.5, c) 7 h after third redox cycle

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. \% Al}_2\text{O}_3$ تهیه شده از اکسید کبالت آسیاکاری شده به مدت 1 ساعت با اکسید آلومینیوم آسیاکاری شده به مدت 0 ساعت، (b) 0.5 ساعت و (c) 7 ساعت بعد از سیکل سوم

با توجه به شکل 8، نمونه هایی که به مدت 1 و 16 ساعت آسیاکاری شده اند، دارای ذرات اکسید آلومینیوم کوچکتری نسبت به اکسید آلومینیوم اولیه هستند و به ترتیب اندازه ذرات آلومینایی با حدود کمتر از 10 میکرون و کمتر از 5 میکرون در آنها قابل مشاهده است که نشان از خردایش ذرات آلومینا با افزایش زمان آسیاکاری و پخش بیشتر آن در زمینه اکسید کبالت است. مطالعه ساختار فازی نمونه های حاوی اکسید آلومینیوم توسط حسنوند و همکاران [15 و 16] نشان داد که فاز اسپینل (CoAl_2O_4) در نمونه های آسیاکاری شده تشکیل و وجود این فاز به علت عدم تجزیه آن در دمای واکنش (دمای تجزیه بیش از 1400°C) باعث کاهش سیکل پذیری و کاهش میزان دفع و جذب اکسیژن می شود.

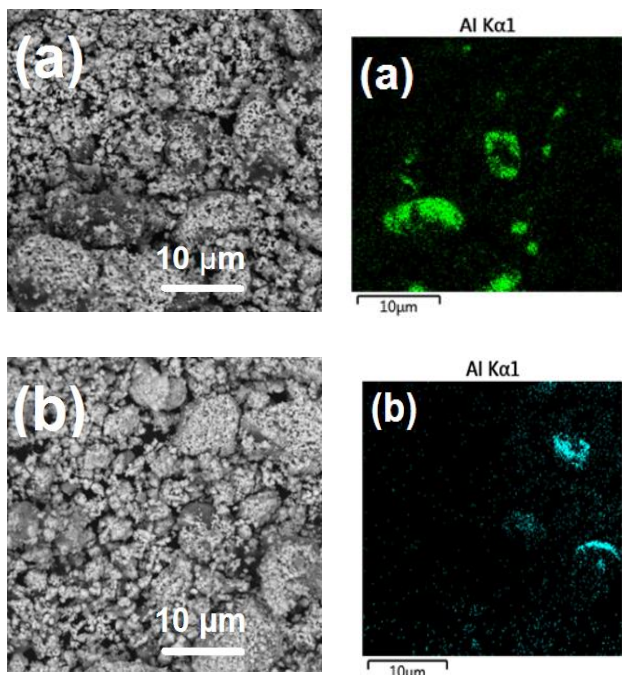


Fig. 8 EDS-map images a) (Co₃O₄ + Al₂O₃) 1 h BM and b) (Co₃O₄ + Al₂O₃) 16 h BM samples

شکل 8 تصاویر EDS-map نمونه‌های (a) (Co₃O₄ + Al₂O₃) 1 h BM و (b) (Co₃O₄ + Al₂O₃) 16 h BM

هم چنین افزایش زمان آسیاکاری فاز ثانویه در زمان 0 ساعت آسیاکاری فاز زمینه تغییری در مقدار ظرفیت ذخیره ایجاد نکرده است. این در حالی است که روی نمونه‌هایی که فاز زمینه آنها 1 ساعت آسیاکاری شده‌اند، تاثیر مثبت داشته است. به عبارتی دیگر می توان گفت که اندازه ذرات فاز ثانویه در این نمونه‌های تاثیری بر ظرفیت جذب نداشته است. این در حالی است که ظرفیت ذخیره نمونه‌هایی که در آنها اکسیدکبالت به مدت 16 ساعت آسیاکاری شده است، به طور قابل توجهی بهتر از سایر نمونه‌ها است. این مساله به احتمال زیاد به دلیل پخش بسیار مطلوب فاز ثانویه در فاز زمینه است.

(Co₃O₄ 0h) تهیه شده‌اند، تقریباً یکسان است. در ادامه تأثیر هر یک از روش‌های آماده‌سازی بر ظرفیت ذخیره نمونه‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

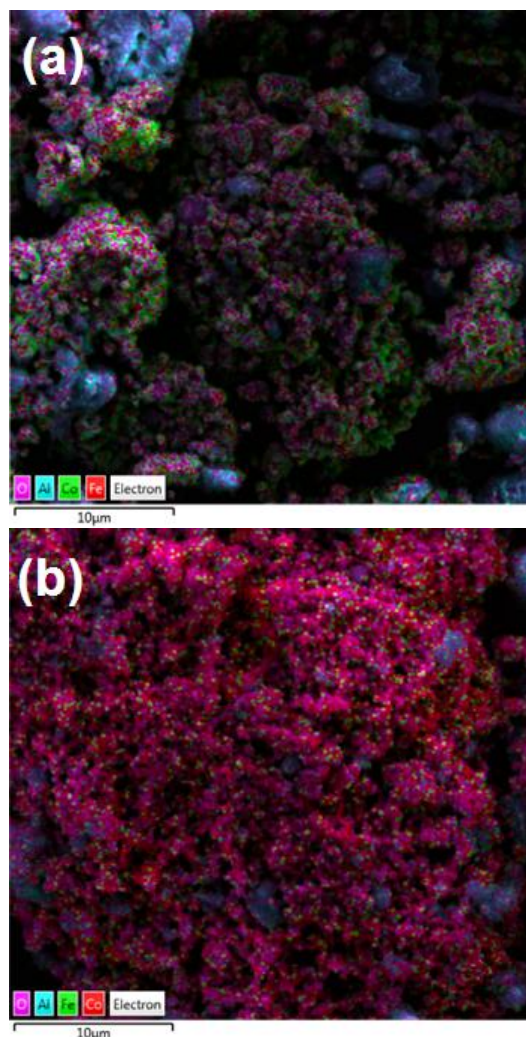


Fig. 7 EDS-map images of a) Co₃O₄ 16h.BM+ Al₂O₃ 0.5h.BM and b) Co₃O₄ 16h.BM+ Al₂O₃ 7h.BM samples

شکل 7 تصاویر EDS-map نمونه‌های (a) Co₃O₄ 16h.BM+ Al₂O₃ 0.5h.BM و (b) Co₃O₄ 16h.BM+ Al₂O₃ 7h.BM

مشاهده می‌شود که ظرفیت ذخیره نمونه‌های مخلوط آسیاکاری شده به صورت همزمان (0، 1 و 16 ساعت) مشابه می‌باشد، در حالی که با توجه به اندازه ذرات آنها در شکل 2، انتظار می‌رفت که ظرفیت ذخیره این نمونه‌ها به دلیل تفاوت در اندازه ذرات، باهم اختلاف داشته باشد. تشکیل فاز اسپینل زیاد در نمونه 16 ساعت آسیاکاری شده نسبت به نمونه‌های دیگر و نیز عدم اختلاف زیاد در اندازه ذرات سه نمونه مذکور دلیل یکسان بودن میزان کاهش ظرفیت اکسیژن است. علاوه این که زمان آسیاکاری زیاد موجب تشدید سینتر شدن می‌شود، پس می‌توان گفت که برابری این عوامل در نمونه‌های مختلف در کل میزان کاهش ظرفیت ذخیره یکسانی را نتیجه داده است.

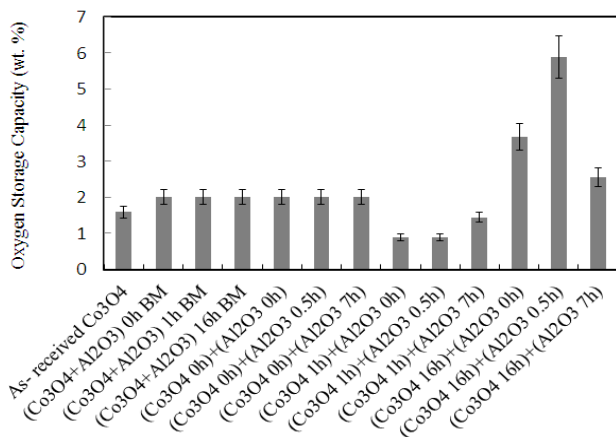


Fig. 9 Oxygen storage capacity after third cycle for various samples

شکل 9 ظرفیت ذخیره اکسیژن بعد از سیکل سوم در نمونه‌های تهیه شده به روش‌های مختلف

4- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر روش های مختلف مخلوط سازی، آماده سازی و سنتز (مخلوط سازی ساده، آسیاکاری Co_3O_4 و Al_2O_3 در زمان های مختلف، آسیاکاری جداگانه Co_3O_4 و Al_2O_3 در زمانهای مختلف و سپس مخلوط سازی آنها) پودر کامپوزیتی اکسیدکبالت حاوی 5 درصد وزنی Al_2O_3 روی سینتر شدن ذرات، پخش فاز ثانویه و ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی اکسید کبالت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر از این تحقیق حاصل شد:

1- افزودن اکسید آلومینیوم و نیز کاهش اندازه ذرات آن به عنوان فاز ثانویه موجب افزایش ظرفیت ذخیره انرژی ماده نسبت به اکسید کبالت اولیه می-شود.

2- روش آماده سازی تأثیر محسوسی بر اندازه ذرات ماده و ظرفیت ذخیره اکسیژن (ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی) دارد. نمونه هایی که اکسیدکبالت آنها 16 ساعت آسیاکاری شده و سپس با فاز ثانویه مخلوط شدند، بیشترین ظرفیت ذخیره اکسیژن را داشتند.

3- در کلیه نمونه ها اندازه متوسط ذرات بعد از سیکل سوم نسبت به سیکل اول افزایش یافت.

4- زمان بیشتر آسیاکاری فاز ثانویه (Al_2O_3) با زمان کمتر آسیاکاری فاز زمینه برای کاهش اندازه ذرات مطلوب تر است به طوری که نمونه تهیه شده از اکسیدکبالت 1 ساعت آسیاکاری شده و اکسیدآلومینیوم 7 ساعت آسیاکاری شده اندازه ذرات کمتری بعد از سیکل سوم نسبت به سایر نمونه ها داشتند.

5- اندازه ذرات کوچکتر ماده لزوماً همسو با ظرفیت ذخیره اکسیژن بیشتر در ماده نیست و سایر عوامل از جمله پخش یکنواخت فاز ثانویه، اندازه ذرات فاز ثانویه و تشکیل فاز اسپینل نیز در آن موثر هستند.

5- مراجع

- [9] Alexander, P., Andrew, J., Peter, G., "Solar Electricity via an Air Brayton Cycle with an Integrated two-step Thermochemical Cycle for Heat Storage Based on $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CoO}$ Redox Reactions II: Kinetic Analyses", *Solar Energy*, Vol.122, pp. 409-418, 2015.
- [10] Block, T., Knoblauch, N., Schmucker, M., "The Cobalt-oxide/iron-oxide Binary System for Use as High Temperature Thermochemical Energy Storage Material", *Thermochemical Acta*, Vol. 577, pp. 25-32, 2014.
- [11] Hutchings, K., Wilson, M., Larsen, P., Raymond, C., "Kinetic and Thermodynamic Considerations for Oxygen Absorption/Desorption Using Cobalt Oxide", *Solid State Ionics*, Vol. 177, pp. 45-41, 2006.
- [12] Neises, M., "Solar heated rotary kiln for thermochemical energy storage", *Solar Energy*, Vol. 86, pp.3040-3048, 2014.
- [13] Nekokar, N., Pourabdoli, M., Ghaderi Hamidi, A., "Effects of Fe_2O_3 Addition and Mechanical Activation on Thermochemical Heat Storage Properties of the $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CoO}$ System", *Journal of Particle Science and Technology*, Vol. 4, pp.13-22, 2018.
- [14] Nekokar, N., Pourabdoli, M., Ghaderi Hamidi, A., "Effect of Mechanical Activation on Thermal Energy Storage of $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CoO}$ System", *Advanced powder Technology*, Vol. 2, No. 29, pp. 333-340, 2017.
- [15] Hasanvand, A., Pourabdoli, M., Ghaderi Hamidi, A., "Thermochemical Heat Storage Properties of Mechanical Activated $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. \% Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. \% Y}_2\text{O}_3$ Composite Powders", *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 16, pp. x-x, 2020 (In press).
- [16] Hasanvand, A., Pourabdoli, M., "Theoretical Thermodynamics and Practical Studies of Oxygen Desorption from $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. \% Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-5 wt. \% Y}_2\text{O}_3$ Composites", *Journal of Particle Science and Technology*, Vol. 4, pp. x-x, 2018 (In press).
- [17] Nekokar, N., Pourabdoli, M., "Isothermal Redox Kinetics of $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Nano-Composite as a Thermochemical Heat Storage Material", *International Journal of Engineering*, Vol. 32, pp. 1200-1209, 2019.
- [1] Mahlia, T. M. I., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H., Matseelar, H.S.C., "A Review of Available Methods and Development on Energy Storage; Technology Update", *Renew Sustain Energy Rev.*; Vol.33, pp. 532-454, 2014.
- [2] Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rougé, S., Cabassud, M., Cognet, P., "A Review on High Temperature Thermochemical Heat Energy Storage", *Renew Sustain Energy Rev*; Vol. 32, pp.591-610, 2014.
- [3] Yan, T., Wang, R. Z., Li, T. X., Wang, L. W., Fred, I. T., "A Review of Promising Candidate Reactions for Chemical Heat Storage", *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 43, pp.13-31, 2015.
- [4] Abedini, H., "A Critical Review of Thermochemical Energy Storage," *The open Renewable Energy*, Vol. 4, pp. 42-46, 2011.
- [5] Aydin, D., Casey, S. P., Riffat, S., "The Latest Advancements on Thermochemical Heat Storage Systems", *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 41, pp.356-367, 2015.
- [6] Agrafiotis, C., "Exploitation of Thermochemical Cycles Based on Solid Oxide Redox Systems for Thermochemical Storage of Solar Heat", *Solar Energy*, Vol. 114, pp. 440-458, 2015.
- [7] Carrillo, A., "Thermochemical Energy Storage at High Temperature via Redox Cycles of Mn and Co Oxides", *Solar Energy & Solar Cells*, Vol. 123, pp. 47-57, 2014.
- [8] U.S.Department of Energy, "Thermochemical heat storage for concentrated solar power", General atomic project 2011; GA-C27137.



بررسی مقاومت به ضربه پانل ساندویچی با رویه بازالت و رویه هیبریدی بازالت-کولار با لحاظ نانو سیلیکا

محسن حافظی¹، مهدی یارمحمدتوسکی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران.

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران.

* تهران، صندوق پستی 11365-4435، m_yarmohammad@azad.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله تأثیر نانو سیلیکا بر مقاومت به ضربه پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت و پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی بازالت و کولار بررسی شده است. پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت شامل چهار لایه پارچه بازالت به عنوان رویه بالایی و پایینی که هسته فوم بین آن قرار دارد. پانل ساندویچی با رویه هیبریدی از چهار لایه پارچه بازالت/کولار/کولار/بازالت به عنوان رویه بالایی و پایینی ساخته شده که هسته فوم ما بین آنها قرار دارد. از پارچه‌های کولار با چگالی 200 گرم بر متر مربع، پارچه بازالت با چگالی 350 گرم بر متر مربع، فوم پلی اورتان با چگالی 140 گرم بر سانتی متر مربع، رزین اپوکسی EPR1080 و درصدهای وزنی مختلف نانو سیلیکا برای ساخت نمونه‌های پانل ساندویچی استفاده شده است. فرآیند ساخت نمونه‌های آزمایش با روش لایه‌گذاری دستی انجام گرفت. همچنین برای پخش و توزیع بهتر ذرات نانوسیلیکا در ماتریس اپوکسی از دستگاه آلتراسونیک استفاده شد. آزمایش‌های ضربه سرعت پایین با استفاده از دستگاه وزنه افتان با انرژی ضربه ثابت بر روی نمونه‌ها انجام گردید. نتایج نشان داد افزودن نانو به پانل ساندویچی سبب بهبود مقاومت به ضربه می‌شود و بیشترین نیروی تماسی ماکزیمم مربوط به پانل ساندویچی با 1/1% نانوسیلیکا می‌باشد.

دریافت: 1398/10/30

پذیرش: 1399/11/10

کلیدواژگان:

پانل ساندویچی هیبریدی
نانو سیلیکا
ضربه سرعت پایین
کولار
بازالت

An investigation of impact resistance of sandwich panel with basalt skin and basalt/Kevlar hybrid skin with nano silica

Mohsen Hafezi, Mehdi Yarmohammad Tooski*

Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 11365-4435, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords

Hybrid sandwich panel
Nano silica
Low velocity impact
Kevlar
Basalt

Abstract

In this paper, the effect of nano silica on impact resistance of sandwich panels with basalt skin and hybrid sandwich panel with basalt and kevlar skin is investigated. Sandwich panels with a basalt skin consist of four layers of basalt fabric as the top and bottom skins which the foam core is located between them. Sandwich panels with a hybrid skin consist of four layers of basalt/Kevlar/Kevlar/basalt fabric as the top and bottom skins which the foam core is located between them. Kevlar fabrics with a density of 200 g /m², basalt fabrics with a density of 350 g /m², a polyurethane foam with a density of 140 g/cm³, EPR1080 epoxy resin and different weight percentages of nano silica were used to make sandwich panels. All panels are fabricated using Hand Lay-up method. Ultrasonic device was also used for homogenization and better dispersion of nano silica in epoxy matrix. Low velocity impact tests were performed using drop weight equipment at constant impact energy on the specimens. The results showed that the addition of nano into the sandwich panel improved the impact resistance and the maximum contact force is related to the sandwich panel with 1.1% nano silica.

1- مقدمه

عین حال استحکام بالایی دارند و در واقع سازه‌هایی با نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشند. علی‌رغم سبکی فوق العاده پانل‌های ساندویچی، این سازه‌ها مقاومت فوق العاده‌ای در برابر انواع بارهای فشاری و ضربه‌ای دارند. این پانل‌ها نیروی وارده را به خوبی جذب کرده و مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. این پانل‌ها با توجه به نوع کاربردی که دارند تحت بارگذاری‌های مختلفی قرار می‌گیرند. این بارگذاری‌ها ممکن است پیش بینی شده یا پیش بینی نشده باشند.

پانل‌های ساندویچی ساختاری سبک و مرکب دارند که از دو طرف به دو رویه کامپوزیتی محدود شده است و در وسط آن یک هسته سبک و ضخیم با شکل‌ها و جنس‌های مختلف قرار دارد. در یک پانل ساندویچی تحت بارگذاری استاتیکی، خمش اعمال شده به سازه توسط رویه‌ها و برش توسط هسته تحمل می‌شود. پانل‌های ساندویچی، سازه‌هایی هستند که وزن کم و در

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Hafezi, M., Yarmohammad Tooski, M., "An investigation of impact resistance of sandwich panel with basalt skin and basalt/Kevlar hybrid skin with nano silica", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1145-1152, 2021.

بررسی تاثیر افزودن نانو لوله کربنی بر کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف بافته شده شیشه پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین افزایش استحکام تنش تسلیم به ازای 0/5 درصد نانو کربنی و بیشترین افزایش جذب انرژی نفوذ پرتابه سرکاری به ازای 1/5 درصد اتفاق افتاده است. پایگانه و همکاران [9] به تحلیل ورق ساندویچی با رویه‌های چند لایه مرکب و هسته هوشمند مگنتورئولوژیکال تحت ضربه سرعت پایین پرداختند. مشخص شد که با تغییر شدت میدان مغناطیسی هسته میانی، می‌توان مقدار سفتی، ضریب استهلاک سازه‌ای و ماکزیمم نیروی برخورد را تغییر داد و کنترل کرد. فرکانس طبیعی با افزایش شدت میدان مغناطیسی افزایش پیدا کرد. علوی نیا و همکاران [10] به بررسی تحلیلی ضربه سرعت بالا بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته فوم رویه‌های آلومینیومی پرداختند. نتایج نشان داد که چگالی هسته فومی پارامتر مهمی در تعیین سرعت باقیمانده پرتابه در برخورد با پانل ساندویچی می‌باشد به طوری که افزایش چگالی منجر به کاهش آن می‌گردد. ملک زاده فرد و همکاران [11] به تحلیل کماتش پانل کامپوزیتی ساندویچی با هسته میانی هدفمند متقارن به‌روش تئوری مرتبه بالای بهبود یافته پرداخته‌اند. نتایج عددی نشان داد که در هسته‌های ضخیم هدفمند نمی‌توان از اثرات تنش‌های صفحه‌ای روی بار بحرانی کماتش صرف نظر کرد. همچنین نوع تابع توزیع خواص و عدد توان توزیع در نظر گرفته شده در هسته هدفمند تاثیرات قابل ملاحظه ای روی بار بحرانی کماتش پانل دارد. پیرمحمدی و همکاران [12] به بررسی تحلیلی، تجربی و عددی سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری و رویه‌های کامپوزیتی تحت ضربه پرتابه پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده از روش‌های عددی و تحلیلی و مقایسه آنها با روش تجربی نشان داده شده است که اختلاف میان نتایج کم است و در نتیجه نتایج به دست آمده قابل قبول می‌باشند. حسن پور رودبند و همکاران [13] به بررسی تجربی برهم کنش رویه‌های آلومینیومی با هسته لانه زنبوری در سازه پانل ساندویچی در نفوذ شبه استاتیکی و دینامیکی پرداخته‌اند. نتایج آزمایش نفوذ شبه استاتیکی نشان می‌دهد مجموع انرژی جذب شده در دو رویه و سازه لانه زنبوری کمتر از حالتی است که این اجزا به شکل ساندویچ مورد استفاده قرار می‌گیرند در واقع انرژی جذب شده پانل ساندویچی در مقایسه با این مجموعه 42% بیشتر شده است، اما مقدار نفوذ این اجزا 30% بیشتر از پانل ساندویچی می‌باشد. در آزمایش بالستیک نیز سرعت حد بالستیک و انرژی بالستیک سازه ساندویچی از اجزا آن به میزان قابل ملاحظه ای بیشتر می‌باشد. نتایج بدست آمده از نفوذ شبه استاتیکی و نفوذ دینامیکی برتری سازه‌های ساندویچی به سازه‌های معمولی را نشان می‌دهد. بنابراین سازه ساندویچی به عنوان یک سازه جاذب انرژی مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. جباری و همکاران [14] به بررسی تاثیر نوع و ضخامت رویه بر خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی پرداختند. خواص مکانیکی (مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و مقاومت به ضربه) پانل‌های ساندویچی، با تغییر نوع رویه و افزایش ضخامت، به طور معنی داری بهبود و افزایش می‌یابد و این ویژگیها در رویه راش و ضخامت 5 میلیمتر دارای حد بهینه و بیشترین مقدار خود بوده است. همچنین، استفاده از رویه صنوبر سبب کاهش مقاومت-های مکانیکی گردید. ریس و همکاران [15] به تحلیل پاسخ ضربه کامپوزیت‌های ساندویچی با لحاظ نانو پرداختند. پانل ساندویچی تقویت شده با نانورس بیشترین ماکزیمم بار ضربه، کمترین تغییر مکان و حداکثر مقاومت خمشی باقی مانده را دارا بود. خوانساری و همکاران [16] به بررسی تجربی خواص بالستیکی هیبرید آلومینیوم و نانو کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با نانولوله کربنی پرداختند. در این بررسی پاسخ پانل‌های هیبرید و

بحث برخورد اجسام و نفوذ پرتابه در سازه‌های ساندویچی، به دلیل نسبت استحکام به وزن و قابلیت جذب انرژی بالا، مورد توجه محققان قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر، جذب انرژی و جاذب‌های انرژی در همه علوم مهندسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته است. کاهش خطرات ناشی از ضربه‌ها یک هدف مهم است که در سایه بررسی جاذب‌های انرژی به این مهم می‌توان دست یافت. جاذب‌های انرژی سیستم‌هایی هستند که کل انرژی جنبشی یا بخشی از آن را به انواع دیگر انرژی تبدیل می‌کنند. جاذب‌های انرژی در حالت کلی به دو نوع بازگشت پذیر و بازگشت ناپذیر دسته‌بندی می‌شوند. جاذب‌های انرژی انواع بسیار مختلفی را دارا می‌باشند که ساختارهای ساندویچی یکی از آنها می‌باشند.

امروزه، بحث ضربه در نانو کامپوزیت‌ها در آغاز راه است و پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثر ضربه روی نانو کامپوزیت‌ها و پاسخ آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. جعفری و همکاران [1] برخورد ضربه زنده‌های مختلف به ورق‌های ساندویچی را بررسی کردند. نتایج نشان داد در سازه کامپوزیت - فوم و در پانل آلومینیوم- فوم، با در نظر گرفتن قطر برابر برای پرتابه‌ها، بیشترین مقدار جذب انرژی، به ترتیب به پرتابه‌های سخت، سرکروی و سرمخروطی تعلق دارند. گاستین و همکاران [2] به بررسی ضربه سرعت پایین بر روی پانل‌های ساندویچی کولار/الیاف کربن پرداختند. جایگزین کردن کولار سبب بهبود 10 درصدی ماکزیمم انرژی جذب شده و ماکزیمم نیروی برخورد شده است. همچنین استفاده از رویه‌های هیبریدی باعث بهبود 5 درصدی ماکزیمم انرژی جذب شده و بهبود 14 درصدی ماکزیمم نیروی برخورد شده است. مهدیان و همکاران [3] به بررسی تحلیلی و عددی ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی با رویه فلزی و هسته فوم پلی‌پورتان پرداختند. با مقایسه نتایج مختلف مشخص شد که در محدوده مشخص سرعت پایین ضربه زنده، نتایج مدل تحلیلی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. انرژی جنبشی پرتابه یا به عبارت دیگر سرعت ضربه زنده نیز تاثیر قابل ملاحظه ای در ضربه ی وارده به پانل ساندویچی دارد و تغییر ضخامت فوم کمترین درصد مشارکت را در فرآیند ضربه و کاهش اثرات تخریبی آن داراست. جی فان و همکاران [4] پاسخ ضربه سرعت پایین را در کامپوزیت- های چند لایه الیاف - فلز و کامپوزیت های ساده مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که کامپوزیت های چند لایه الیاف - فلز نسبت به کامپوزیت‌های ساده، مقاومت در برابر سوراخ شدگی بالاتری دارند. چن و همکاران [5] بهبود مدول و چقرمگی نانو ماده مرکب اپوکسی/نانو سیلیکا را شاهد بودند، بدون اینکه افزودن نانو ذرات سیلیکا تاثیری بر دمای کاری رزین داشته باشد. نتایج آزمایش خواص مکانیکی، حاکی از بهبود 30 درصدی چقرمگی در درصد‌های پایین نانو سیلیکا بوده است. غفرانی و همکاران [6] به بررسی اثر نوع هسته و پوسته بر مقاومت‌های مکانیکی پانل ساندویچی سبک وزن پرداختند. نتایج نشان داد پانل سبک وزن ساخته شده از هسته فوم پلی اورتان به دلیل تراکم مناسب، ایجاد سطح تماس بیشتر با پوسته، توزیع مناسب بار و کاهش تنش وارد شده به سطح دارای برتری محسوسی نسبت به پانل سبک وزن ساخته شده از هسته لانه زنبوری می‌باشد. آذرافرا و همکاران [7] تست خمش سه نقطه ای روی ورق ساندویچی فلزی و کامپوزیتی با هسته مشبک را انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش دو برابری ضخامت پوسته سازه های ساندویچی مشبک کامپوزیتی، نسبت استحکام به وزن را 1/5 برابر افزایش می‌دهد. تغییر جنس رویه‌ها از پارچه با الیاف شیشه به کربن، به جای افزایش ضخامت رویه‌های الیاف شیشه، در سازه‌های ساندویچی نتیجه بهتری دارد. خوش گفتار و همکاران [8] به

بین سطحی، بهبود خصوصیات پیوند و نوع شکل اینتر کلیت/ اکسفولیت ماتریس توجیه شد. خدایی و همکاران [22] مدلی برای شبیه‌سازی تأثیر بالستیک یک پرتابه بر روی پانل ساندویچی با هسته لانه زنبوری و پوسته کامپوزیتی توسعه دادند. از مدل مادی مناسب برای هسته لانه زنبوری آلومینیومی با در نظر گرفتن خصوصیات وابسته به میزان کرنش استفاده نمودند. همچنین جهت مدلسازی آسیب در پوسته کامپوزیتی، شروع آسیب با معیار هاشین و پیشروی آسیب با مدل MLT با استفاده از کد نویسی در سابروتین VUMAT انجام شد. سرعت حد بالستیک و میزان جذب انرژی محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه شد که مدل ارائه شده تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. ویشواس و همکاران [23] اثر لاستیک به عنوان هسته در پانل ساندویچی تقویت‌شده با الیاف جوت را تحت ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از لاستیک به عنوان ماده اصلی تأثیر قابل توجهی در جذب انرژی دارد. خدایی و همکاران [24] تأثیر چگالی هسته بر روی قابلیت جذب انرژی پانل‌های ساندویچی با رویه صفحات آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش چگالی فوم مقدار تغییر شکل عرضی سطح پشتی پانل ساندویچی کمتر می‌شود ولیکن میزان جذب انرژی پانل نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی فوم علاوه بر این که تغییر شکل رویه پشتی پانل کاهش می‌یابد، پروفیل آن نیز یکنواخت‌تر می‌گردد.

هدف این تحقیق، بررسی تأثیر نانو سیلیکا در پانل ساندویچی با چهار لایه پارچه بازالت و پانل ساندویچی هیبریدی با پارچه‌های بازالت و کولار، با ترتیب لایه چینی بازالت، کولار، کولار، بازالت می‌باشد. پانل‌های ساندویچی ساخته شده تحت ضربه سرعت پایین قرار می‌گیرند و مقاومت آن‌ها در برابر ضربه مورد بررسی قرار خواهد گرفت و پاسخ نیرو تماسی-زمان و نیرو تماسی-جابجایی سازه بدست می‌آید. همچنین با بررسی آسیب وارد شده به قطعات تأثیر افزایش نانو سیلیکا و مقایسه پانل‌های هیبریدی و غیر هیبریدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

2- مواد و روش آزمایش

1-1- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های پانل ساندویچی از دو رویه کامپوزیتی در بالا و پایین ساخته شده که هسته فوم ما بین رویه‌های کامپوزیتی قرار دارد. رویه‌های کامپوزیتی جزء کامپوزیت پایه پلیمری بوده که ماتریس آن با پارچه کولار و بازالت تقویت شده است. پارچه کولار دارای چگالی سطحی 200 گرم بر متر مربع و پارچه بازالت دارای چگالی سطحی 350 گرم بر متر مربع می‌باشند. رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی و ساخت شرکت چیمکس¹ روسیه با نام تجاری EPR1080 و با سخت‌کننده EA1080 انتخاب گردید. واکنش شیمیایی و پخت این رزین طبق دستورالعمل شرکت سازنده در دمای 25 الی 80 درجه سانتیگراد انجام می‌گیرد. برای ساخت هسته نیز از فوم پلی‌یورتان با چگالی 140 گرم بر سانتی متر مربع استفاده شده است. از نانو سیلیکا پودری سفید رنگ که دارای خلوص 99/9 درصد است و ذرات آن دارای اندازه 15 نانومتر می‌باشند استفاده شده است. وزن نمونه‌ها 168 گرم و وزن رزین باید حدود 150 - 100 گرم بیشتر از وزن نمونه‌ها باشد، بدین ترتیب وزن رزین استفاده شده 300 گرم در نظر گرفته شد. در حالت بدون نانو برای

آلومینیوم و کامپوزیت ساخته شده از اپوکسی و کولار و پانل‌های هیبریدی آلومینیوم و نانو کامپوزیت اپوکسی و کولار در اثر ضربه بالستیک مورد بررسی قرار گرفت. چهار گروه از پانل‌های بالا با درصدهای 0، 0/5، 1، 1/5 نانو لوله کربنی ساخته شد. نمونه‌های هیبریدی با روش لایه چینی دستی و پرس گرم ساخته شد. آزمونهای ضربه بالستیک با استفاده از پرتاب گلوله مخروطی 7/6 گرمی و با دو سرعت میانگین 220 و 275 متر بر ثانیه توسط تفنگ گازی انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد از میان چهار نمونه مورد بررسی، پانل حاوی 1% نانو لوله کربنی بیشترین جذب انرژی و مقاومت بالستیکی را داراست. حسن پور رودبند و همکاران [17] به بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی بر روی سازه‌های ساندویچی پر شده از فوم تحت بارگذاری‌های متمرکز و گسترده پرداختند. نتایج آزمایش شبه استاتیک در هر دو نوع بارگذاری نشان می‌دهد که ماده پر کننده اثر بسزایی در افزایش انرژی جذب شده دارد. فوم پلی‌یورتان به عنوان ماده پر کننده سازه لانه زنبوری در هسته پانل ساندویچی باعث افزایش 6% و 29% انرژی جذب شده نسبت به سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی به ترتیب در بارگذاری‌های متمرکز و گسترده شده است. پایگانه و همکاران [18] به بررسی خواص استحکام ضربه‌ای نانو کامپوزیت بر پایه پلی‌پروپیلن/نانو صفحات گرافن/نانورس پرداختند. با استفاده از روش طراحی آزمایش، اثر هیبریدی نانو صفحات گرافن و نانورس و سازگار کننده پلی‌پروپیلن پیوندی با انیدرید مالئیک (PP-g-MA) بر استحکام ضربه‌ای نانو کامپوزیت‌های بر پایه پلی‌پروپیلن بررسی کردند. ساخت نانو کامپوزیت‌ها، بر اساس روش اختلاط مذاب انجام گرفت. تحلیل‌های آماری نشان دادند که با افزایش درصد نانو ذرات، استحکام ضربه کاهش می‌یابد. آنالیز حرارتی به روش گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) نشان داد که حضور گرافن تأثیر چندانی بر دمای ذوب نمونه مورد آزمایش ندارد، اما T_c نانو کامپوزیت را در مقایسه با پلی-پروپیلن خالص، حدود 4 درصد افزایش داده است. در نانو کامپوزیت فاقد گرافن، حضور نانو رس تأثیری بر دمای ذوب نداشت اما درجه تبلور، 10/73 درصد و دمای تبلور 2/23 درصد در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص افزایش یافت که نشان از اثر هسته زایی نانورس دارد. پرامانیک و همکاران [19] به بررسی جذب نیروی یک پانل ساندویچی تقویت شده با ذرات نانو در ضربه سرعت بالا و ضربه سرعت پایین پرداختند. از وینیل استر با 1/25 و 2/5 درصد حجمی نانورس و صفحات کوچک گرافیت و الیاف شیشه نوع E استفاده کردند. نتایج نشان داد که نمونه 2/5% حجمی صفحات گرافیتی تقویت شده با نانو کامپوزیت بیشترین جذب انرژی را دارد. فت و همکاران [20] به بررسی مدل دینامیکی ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی پرداختند. از مدل سیستم‌های یک و چند درجه آزادی برای پیش بینی جواب ضربه سرعت پایین پانل ساندویچی با شرایط مرزی دو سر گیردار، تکیه‌گاه ساده و چهار سر گیردار استفاده کردند. جواب تحلیلی برای پاسخ تغییر شکل گذرای پانل ساندویچی ارائه کردند. جرم‌های معادل از فرض توزیع سرعت و محاسبه انرژی جنبشی المان‌های دامنه بخش بالایی صفحه و انحراف کلی پانل به دست می‌آیند. معادل سفتی فنر و دمپر از جواب بار استاتیکی و تنظیم مواد با خواص دینامیکی رویه و هسته به دست آوردند. مقایسه پیش بینی‌های تحلیلی نیروی ضربه با نتایج تجربی تطابق خوبی داشتند. هوگو و همکاران [21] با افزودن یک درصد وزنی نانو سیلیکا به ماده مرکب شیشه/اپوکسی، سبب افزایش 44 درصدی استحکام برشی بین لایه‌های شد مقاومت خمشی و چقرمگی شکست نیز به ترتیب 24 و 23 درصد افزایش را نشان دادند. این افزایش در خواص مکانیکی، عمدتاً ناشی از افزایش ناحیه تماس

¹ ChimeX

بین لایه‌های نانو سیلیکا و در نتیجه تسهیل نفوذ رزین اپوکسی را به داخل فواصل بین لایه‌ای نانو ذرات سیلیکا موجب شده و به علت توزیع مناسب‌تر، افزایش فواصل بین لایه‌ها، پراکنش بهتر و مناسب‌تر و در نتیجه میزان برهم کنش بین سطحی بیشتری ایجاد می‌کند.



Fig. 3 Ultrasonic effect on resin

شکل 3 اثر آلتراسونیک روی رزین

در این مرحله لایه‌چینی نمونه‌های پانل ساندویچی بصورت چهار لایه بازالت در بالا و پایین و هسته فوم ما بین آنها بصورت لایه گذاری دستی انجام شد. در این قسمت از پارچه های بازالت، از هر کدام دو تکه مربعی به ابعاد 20 سانتیمتر در 20 سانتیمتر بریده شده است. سپس شیشه روی صفحه کار تمیز گردید و واکس زده شد. در این مرحله از یک لایه پارچه داکرون به عنوان جدا کننده استفاده شد، پارچه داکرون به همراه واکس باعث می شود تا نمونه به شیشه نچسبد. استفاده از پارچه داکرون امری ضروری است و در غیر این صورت قطعه به شیشه می چسبد و منجر به ایجاد مشکل در جدا کردن قطعه از آن می‌گردد. همچنین پارچه داکرون مقدار اضافی رزین را گرفته و باعث ایجاد سطح زبر روی پارچه های کولار و بازالت می‌شود. در هر مرحله از لایه چینی پارچه‌ها به رزین حاوی نانو آغشته شدند و پارچه بعدی روی آن قرار گرفته و به رزین مذکور آغشته می‌شود. بدین ترتیب رویه بالایی و پایینی پانل ساندویچی شامل چهار لایه بازالت آماده شد. در بخش مونتاژ کردن رویه‌ها و فوم، ابتدا فوم و لایه‌های آماده شده با ابعاد 10 سانتیمتر در 10 سانتیمتر برش داده شدند، سپس فوم‌ها روی پارچه داکرون گذاشته شده و سطح بالایی آن آغشته به رزین شده و رویه‌های بازالت روی سطح آغشته به رزین قرار گرفت. پس از اینکه همه نمونه‌ها روی فوم‌ها قرار گرفتند به نمونه اول بازگشته و سطح دیگر فوم به رزین آغشته شد و رویه مقابل روی آن قرار گرفت و همین فرآیند برای همه نمونه‌ها انجام گرفت. سپس نمونه‌های پانل ساندویچی آماده شده به مدت 24 ساعت در دمای اتاق قرار گرفته‌اند تا خشک شوند. نمونه‌های مورد نظر برش داده شده و برای آزمایش ضربه آماده شدند. ساخت پانل ساندویچی با رویه هیبریدی شبیه پانل ساندویچی با رویه بازالت هست فقط هنگام لایه چینی از پارچه کولار بجای پارچه بازالت استفاده می‌شود. پانل های ساندویچی ساخته شده برای انجام آزمایش در شکل 4 نشان داده شده اند. باتوجه به اینکه از چهار درصد وزنی نانو در این پژوهش استفاده شده، پانل‌های ساندویچی از لحاظ درصد نانو به چهار گروه تقسیم شده اند:

گروه اول: نمونه‌های پانل ساندویچی بدون نانو سیلیکا

گروه دوم: نمونه‌های پانل ساندویچی با 0/3% نانو سیلیکا

گروه سوم: نمونه‌های پانل ساندویچی با 0/7% نانو سیلیکا

آماده‌سازی رزین، ابتدا رزین و سخت‌کننده در نسبت وزنی تعیین شده با استفاده از همزن مکانیکی به مدت 10 دقیقه با هم مخلوط شدند. نیروی وارد شده توسط همزن مکانیکی باعث می‌شود تا رزین و سخت‌کننده به خوبی با هم ترکیب شوند. جهت تولید نانوکامپوزیت‌های اپوکسی - نانو سیلیکا، نانو ذرات سیلیکا با درصد های وزنی 0/3، 0/7 و 1/1 (نسبت به کل سیستم رزین (رزین اپوکسی + سخت‌کننده))، مطابق جدول 1 به اپوکسی اضافه شده و با همزن مکانیکی به مدت 10 دقیقه مخلوط گردید. در شکل 1 تفاوت ایجاد شده در اثر استفاده از هم زن مکانیکی نشان داده شده است.

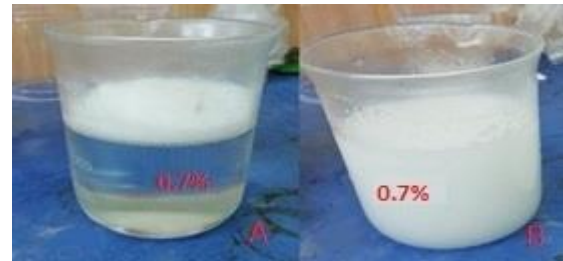


Fig. 1 (A) Before mixing with a mechanical stirrer (B) After mixing with a mechanical stirrer

شکل 1 (A) قبل از مخلوط کردن با هم زن مکانیکی، (B) پس از مخلوط کردن با هم زن مکانیکی

جدول 1 وزن نانو سیلیکا در هر نمونه

Table 1 Weight of nano silica in each sample

وزن نانو سیلیکا	نمونه
$330 \times 0.3 = 0.99 \text{ g}$	% 0.3
$330 \times 0.7 = 2.31 \text{ g}$	% 0.7
$330 \times 1.1 = 3.63 \text{ g}$	% 1.1

برای عمل آلتراسونیک از دستگاه آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه امیرکبیر، مدل سونوپالس¹ ساخت شرکت باندلین کشور آلمان استفاده شد، که در شکل 2 نشان داده شده است. مخلوط با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت 15 دقیقه تحت امواج فراصوتی قرار گرفت تا نانو ذرات سیلیکا درون پایه اپوکسی پخش شود.



Fig. 2 Ultrasonic device

شکل 2 دستگاه آلتراسونیک

همانطور که در شکل 3 مشاهده می‌شود پس از عمل آلتراسونیک، رزین از حالت شیری رنگ به حالت شفاف تبدیل می‌شود و حباب‌های موجود در رزین از بین می‌روند. عمل آلتراسونیک امکان لایه لایه شدن و افزایش فاصله

¹ SONOPULS

زمان و غیره را به دست آورد. تنظیمات دستگاه و تست به صورت تمام خودکار بوده تا از خطاهای انسانی جلوگیری شود. این دستگاه پدیده ضربه را با دادن اطلاعات در طی زمان برخورد مشخص می‌کند. در این دستگاه بار ضربه، از طریق سقوط یک وزنه که وزن آن قابل تغییر است، اعمال می‌شود. دستگاه دارای موانعی است که قابلیت تنظیم ارتفاع سقوط را به کاربر می‌دهد، در نتیجه به راحتی می‌توان انرژی اولیه ضربه را تعیین کرد. همچنین برای انتقال داده‌های ثبت شده توسط سنسور نیرو سنج نصب شده بر روی ضربه زننده (شامل یک کلاهک به جرم $2/712$ کیلوگرم، فولاد سخت کاری شده) به کامپیوتر، از یک دستگاه جمع آوری اطلاعات استفاده شده است. نمونه‌ها مطابق شکل ۶ بین دو صفحه قرار گرفته‌اند، سپس با بسته شدن چهار گیره که به شاسی دستگاه متصل هستند نمونه‌ها بین دو صفحه ثابت شده و برای آزمایش آماده شدند و تحت ضربه قرار گرفتند. پرتابه دارای قطر ۱۶ میلی‌متر با نوک کرومی و از جنس فولاد می‌باشد که در شکل ۷ نشان داده شده است. نمونه‌ها دارای شرایط مرزی گیردار- گیردار می‌باشند و ضربه‌زننده از ارتفاع $0/35$ متر بصورت عمودی به نمونه‌ها اصابت می‌کند.



Fig. 6 Fixture of sandwich panel containing Nano silica

شکل ۶ فیکسچر پانل ساندویچی حاوی نانوسیلیکا

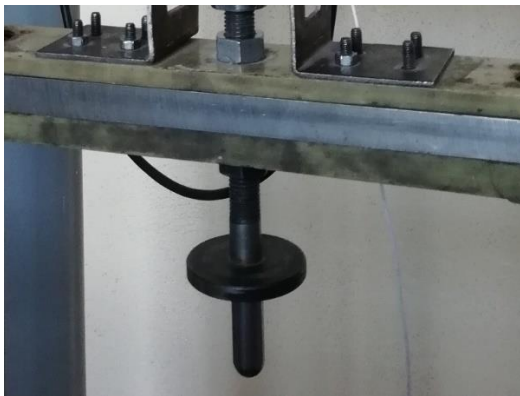


Fig. 7 Impactor

شکل ۷ ضربه‌زننده

3- نتایج

در این تحقیق تاثیر افزودن نانو سیلیکا به پانل‌های ساندویچی ساخته شده با رویه‌های بازالت و هیبریدی بازالت-کولار و هسته فوم پلی اورتان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. متغیرهای این تحقیق درصد وزنی نانو سیلیکا موجود در پانل‌های ساندویچی، لایه‌چینی پانل‌های ساندویچی و تغییر انرژی ضربه زننده در حالت هیبریدی می‌باشند.

نمودارهای نیرو-زمان و نیرو-جابجایی نمونه‌های با رویه بازالت با درصد وزنی مختلف نانو در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. مقایسه نمودارها نشان

گروه چهارم: نمونه‌های پانل ساندویچی با ۱/۱٪ نانو سیلیکا

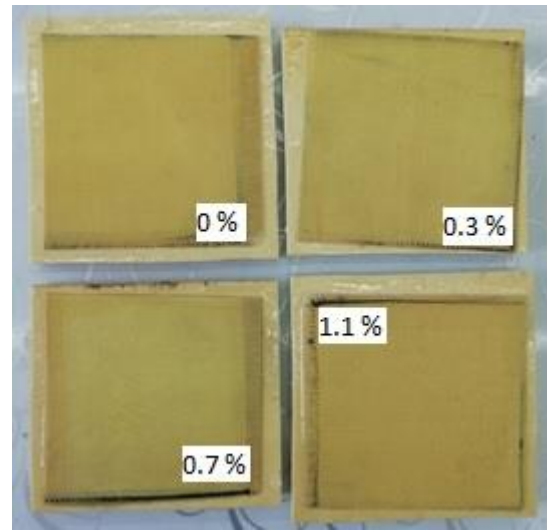


Fig. 4 Sandwich panels with Kevlar skin

شکل ۴ پانل‌های ساندویچی با رویه کولار

2-2- تست نمونه‌ها

به منظور تعیین انرژی شکست فلزات و مواد کامپوزیتی از دستگاه آزمون ضربه ثقلی یا وزنه افتان استفاده شده است. این دستگاه پدیده ضربه را نه از طریق انرژی قبل و بعد از ضربه، بلکه با دادن اطلاعات در طی زمان برخورد مشخص می‌کند. در این دستگاه، بار ضربه از طریق سقوط یک وزنه که وزن آن قابل تغییر است، اعمال می‌شود. دستگاه دارای موانعی است که قابلیت تنظیم ارتفاع سقوط را به کاربر می‌دهد، در نتیجه به راحتی می‌توان انرژی اولیه ضربه را تعیین کرده و به نمونه اعمال کرد. به منظور انجام این آزمون، از دستگاه ضربه سرعت پایین دانشگاه امیر کبیر استفاده شده است که مطابق با استاندارد آزمون ضربه می‌باشد که در شکل ۵ نشان داده شده است.



Fig. 5 Drop Weight equipment

شکل ۵ دستگاه وزنه افتان

خروجی دستگاه به صورت داده‌هایی از شتاب - زمان که به راحتی می‌توان با استفاده از روابط ریاضی، نمودارهای نیرو - جابجایی، سرعت - زمان، انرژی

کامل همانند حالت اولیه خود باقیمانده‌اند لذا در صفحات پشتی نمونه‌های بدون نانو و حاوی ذرات نانو هیچ نوع آسیبی رخ نداده است.

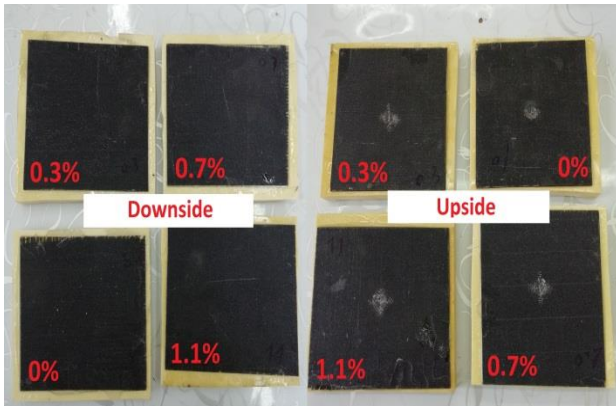


Fig. 10 Impacted and non-impacted sides of Sandwich panels with basalt skin after impact test

شکل 10 صفحات ضربه خورده شده و ضربه خورده نشده پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت بعد از آزمون ضربه

شکل 11 و 12 نمودارهای نیرو تماسی-زمان و نیروی تماسی-جابجایی را برای نمونه‌های هیبریدی با انرژی برخورد 20 ژول نشان می‌دهند. مقایسه نمودارهای نیرو تماسی - زمان حالت هیبریدی با انرژی برخورد 20 ژول که در شکل 11 مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد که بیشینه نیروی تماسی در نمونه حاوی 1/1% نانو سیلیکا می‌باشد و کمترین نیروی تماسی در نمونه بدون نانو مشاهده شده است. همچنین مقایسه نمودارهای نیرو تماسی - جابجایی که در شکل 12 نشان داده شده، دیده شد که نمونه حاوی 1/1% نانو سیلیکا کمترین جابجایی و نمونه حاوی بدون نانو بیشترین جابجایی را دارند.

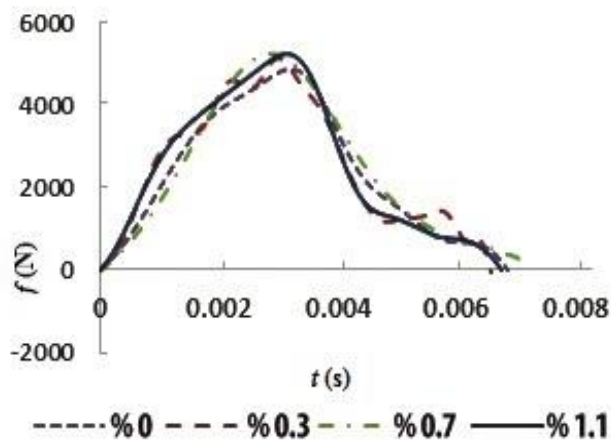


Fig. 11 Contact force-time curves of sandwich panels with hybrid skin with impact energy of 20 J

شکل 11 منحنی‌های نیروی تماسی-زمان پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی با انرژی برخورد 20 ژول

مقایسه نیروی تماسی ماکزیمم پانل ساندویچی با رویه بازالت و پانل ساندویچی با رویه هیبریدی بازالت- کولار در جدول 2 نشان داده شده است.

می‌دهد که بیشینه نیرو تماسی در نمونه 1/1% نانو سیلیکا بوده است و طبق شکل 9 که مقایسه نمودارهای نیرو - جابجایی را نشان داده است، کمترین جابجایی در نمونه 0/3% نانو سیلیکا دیده شده است و همچنین بیشترین انرژی در نمونه حاوی 1/1% نانو سیلیکا بوده است. از مقادیر بدست آمده برای این حالت می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نانو سیلیکا در این حالت باعث افزایش نیروی تماسی می‌شود ولی در نمونه 1/1% باعث افزایش جابجایی هم شده است.

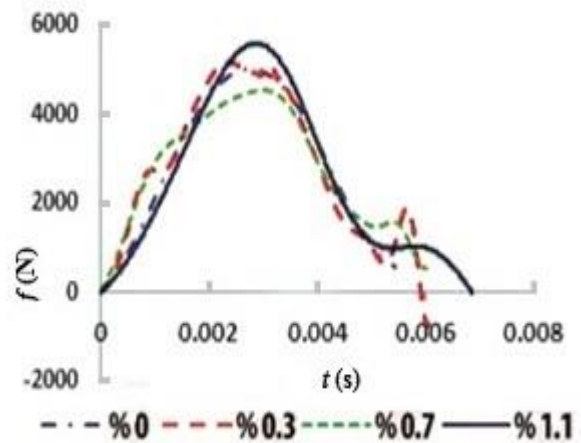


Fig. 8 Contact force-time curves of sandwich panels with basalt skin with impact energy of 20 J

شکل 8 منحنی‌های نیروی تماسی-زمان پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت با انرژی برخورد 20 ژول

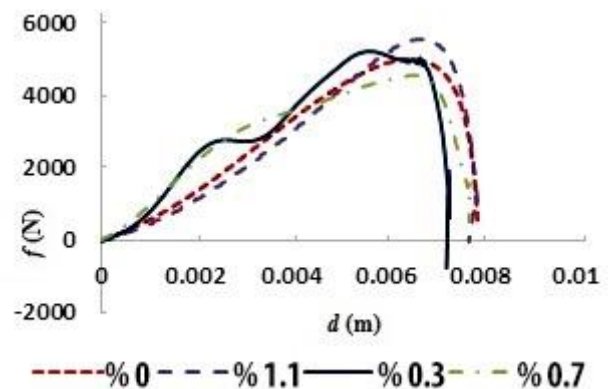


Fig. 9 Contact force-displacement curves of sandwich panels with basalt skin with impact energy of 20 J

شکل 9 منحنی‌های نیروی تماسی-جابجایی پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت با انرژی برخورد 20 ژول

سطح پشت و روی نمونه‌های پانل ساندویچی شامل چهار لایه پارچه بازالت بعد از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی آنها در شکل 10 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 10 ملاحظه می‌شود در صفحات ضربه خورده شده ترک ماتریس و شکست الیاف قابل مشاهده است. برای نمونه‌های حاوی نانو ذرات سیلیکا در محل ضربه ترک طولی دیده می‌شود اما در نمونه بدون نانو، ترک‌های محیطی در محل ضربه رخ داده است. همچنین ترک ماتریس و یا شکست الیاف در سطح پشت نمونه‌ها ایجاد نشده و آنها به طور

صفحات پشتی نمونه‌های بدون نانو و حاوی ذرات نانو هیچ نوع آسیبی رخ نداده است.

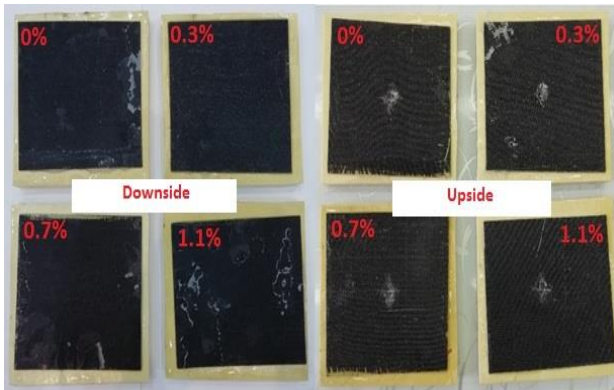


Fig. 13 Impacted and non-impacted sides of Sandwich panels with hybrid skin after impact test

شکل 13 صفحات ضربه خورده شده و ضربه خورده نشده پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی بعد از آزمون ضربه

4- نتیجه گیری

مقاومت به ضربه پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت و پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی بازالت و کولار تحت ضربه سرعت پایین با لحاظ نانوسیلیکا مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های پانل ساندویچی به روش لایه گذاری دستی ساخته شدند و به وسیله دستگاه تست وزنه افتان با انرژی ضربه ثابت و ضربه زننده سر کروی با قطر 16 میلی متر مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد افزودن نانو به پانل ساندویچی سبب بهبود مقاومت به ضربه می‌شود و بیشترین نیروی تماسی ماکزیمم مربوط به پانل ساندویچی با 1/1 نانو می‌باشد.

5- مراجع

- [1] Jafari, S.S., and Feli, S., "Analytical investigation of impact of blunt projectile with different ended into sandwich panels," in Persian, Journal of Modeling in Engineering, Vol. 3, No. 42, pp. 65-77, 2015.
- [2] Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M., Stone, J., "Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites," Composite structures, Vol. 69, No. 4, pp. 396-406, 2005.
- [3] Mahdian, M., and Ebrahimi, H., "Analytical and numerical analysis of low speed impact on sandwich panel with metal and polyurethane foam core," in Persian, The International Conference on New Research in Industry and Mechanical Engineering.
- [4] Fan, J., Cantwell, W., Guan, Z., "The low-velocity impact response of fiber-metal laminates," Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, No. 1, pp. 26-35, 2011.
- [5] Chen, C., Justice, R. S., Schaefer, D. W., Baur, J. W., "Highly dispersed nanosilica-epoxy resins with enhanced mechanical properties," Polymer, Vol. 49, pp. 3805-3815, 2008.
- [6] Ghofrani, M., Pishan, S., Talaei, A., "The effect of core type and skin on the mechanical properties of lightweight sandwich Panels," in Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, Vol. 28, No. 4, pp.720-731, 2014.
- [7] Azarafza, R., Davar, A., and Mahmoodi, A., "Three-point bending test of metal and composite sandwich panels with grid stiffened core," in Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2017.
- [8] Khoshgoftar, M., Liaghat, G., "Experimental and Numerical Investigation of Perforation Behavior of Composite Laminates

در نمونه‌های پانل ساندویچی با رویه بازالت، بیشترین مقدار نیروی تماسی مربوط به حالت 1/1 درصد نانو می‌باشد که نیروی تماسی ماکزیمم در حالت 1/1 درصد نانوسیلیکا نسبت به حالت بدون نانو ده درصد افزایش یافته است.

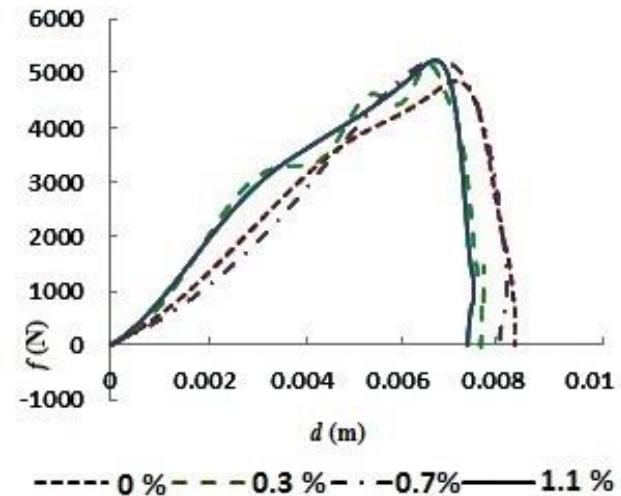


Fig. 12 Contact force-displacement curves of sandwich panels with hybrid skin with impact energy of 20 J

شکل 12 منحنی‌های نیروی تماسی - جابجایی پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی با انرژی برخورد 20 ژول

برای نمونه‌های پانل ساندویچی با رویه هیبریدی، کمترین مقدار نیروی تماسی مربوط به حالت بدون نانو است و با افزودن ذرات نانو مقدار نیروی تماسی ماکزیمم افزایش می‌یابد و در حالت 1/1 درصد نانو سیلیکا این مقدار به بیشترین مقدار می‌رسد. نیروی تماسی ماکزیمم نمونه 1/1 درصد نسبت به نمونه بدون نانو هشت درصد افزایش یافته است.

جدول ۲: مقایسه نیروی تماسی ماکزیمم پانل ساندویچی با رویه بازالت و پانل ساندویچی با رویه هیبریدی

Table 2: Comparison of maximum contact force of sandwich panel with basalt skin and sandwich panel with hybrid skin

درصد وزنی	نیروی تماسی ماکزیمم پانل ساندویچی با رویه بازالت (نیوتن)	نیروی تماسی ماکزیمم پانل ساندویچی با رویه هیبریدی (نیوتن)
بدون نانو	5028.363	4866.291
0/3 درصد نانو	5203.92	5153.347
0/7 درصد نانو	4545.566	5239.904
1/1 درصد نانو	5581.172	5257.453

سطح پشت و روی نمونه‌های هیبریدی پس از انجام آزمون ضربه سرعت پایین در شکل 13 نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، ضربه فقط سطح روی نمونه‌ها (سمت راست شکل) را تخریب کرده و هیچگونه تخریبی در سطح پشت نمونه‌ها (سمت چپ شکل) ایجاد نشده است و تخریب نمونه‌ها فقط روی سطح آنها تاثیر گذاشته است. برای نمونه - های حاوی نانو ذرات سیلیکا و بدون ذرات نانو شکل آسیب بصورت لوزی شکل بوده و ترک در ماتریس و شکست الیاف به وضوح قابل مشاهده است. همچنین هیچگونه آثاری از آسیب در سطح پشت نمونه‌ها دیده نمی‌شود و در

- Reinforced with Carbon Nanotubes,” in Persian, Tarbiat Modares University, Mechanical Engineering Department, 2010.
- [9] Payganeh, Gh., Malekzade Fard K., Rashed Saghavaz, F., and Asgari, M., “Analysis of laminated composite sandwich plates with magnetorheological fluid core under low velocity impact,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 114-124, 2016.
- [10] Alavi Nia, A., and Kazemi, M., “Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 6, pp.231-239, 2015.
- [11] Malekzadeh Fard, K., Ebrahimi, M., Nazari, A., and Irani, S., “Buckling Analysis of Composite Sandwich Panel with Symmetric FGM Core,” in Persian, Using Improved High-order Theory, Aerospace Mechanics Journal, Vol. 8, No. 1, pp. 55-70, 2012.
- [12] Pirmohammadi, N., Liaghat, Gh. H., Pol, M. H., and Sabouri, H., “Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 153-164, 2014
- [13] Hassanpour Roubeneh, F., Liaghat, Gh., Sabouri, H., Hadavinia, H., “Investigation of Interaction between Aluminum Facing and Honeycomb Structure in Quasi-static and Impact Loading,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 23-31, 2016
- [14] Jabbari, M., Tatari, A. A., and Ghafari, M., “Effect of Faces Type and Thickness on Mechanical Properties of Sandwich Panels,” in Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Industries, Vol. 5, No. 1, pp. 85-92, 2014.
- [15] Reis, P., Santos, P., J.A.M. Ferreira, M. Richardson, “Impact response of sandwich composites with nano-enhanced epoxy resin,” in Persian, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 32, No. 12, pp. 898-906, 2018.
- [16] Khansari, M., Khodarahmi H., Vaziri, A., “Experimental study of ballistic properties of hybrid aluminum and epoxy matrix composite reinforced with carbon nanotube,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 126-132, 2017.
- [17] Hassanpour Roubeneh, F., Liaghat, Gh., Sabouri, H., “Experimental Investigation of foam filled Sandwich Panels in Concentrated and Distributed Compressive loading,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 648-656, 2016.
- [18] Payganeh, Gh., Ghasemi, I., Rahmani, M., Kazemnejad, A., “An investigation on the impact properties of nanocomposite based on polypropylene/graphene nanosheets/ nano clay using response surface methodology,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 271-279, 2015.
- [19] Pramanik, B., Raju Mantena, P., “Energy Absorption of Nano-Reinforced and Sandwich Composites in Ballistic and Low-Velocity Punch-Shear,” Open Journal of Composite Materials, Vol. 2, No. 3, pp. 87-96, 2012.
- [20] Hoo Fatt, M. S., Park, K. S., “Dynamic model for low-velocity impact damage of composite sandwich panels – part A: Deformation,” Composite Structures, Vol. 52, pp. 335-351, 2001.
- [21] Haque, A., Shamsuzzoha, M., Hussain, F., Dean, D., “S2-Glass/Epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties,” Journal of Composite Materials, Vol. 37, pp. 1821-1837, 2003.
- [22] Khodaei, M., Haghghi-Yazdi, M., Safarabadi, M., “Numerical modeling of high velocity impact in sandwich panels with honeycomb core and composite skin including composite progressive damage model,” Journal of Sandwich Structures & Materials, doi.org/10.1177/1099636218817894
- [23] Vishwas, M., Joladarashi, sh.,Kulkarani SM., “Investigation on effect of using rubber as core material in sandwich composite plate subjected to low velocity normal and oblique impact loading,”Scientia Iranica, Vol. 26, No. 2, pp897-907.
- [24] Khondabi, R., Khodarahmi, H., Hosseini, R., Zia Shamami, M., “Experimental and numerical investigation into the effect of core density on the energy absorption of sandwich panels with Aluminum face sheets and Polyurethane foam core,” in Persian, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 52, No. 10, pp. 131-140, 2019.



بررسی تجربی اثر شکل ضربه‌زننده و لایه‌چینی رویه بر رفتار صفحات ساندویچی کامپوزیتی با هسته فوم آلومینیومی در ضربه با سرعت کم

محمد امین ترابی زاده

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای خراسان رضوی، مشهد
* مشهد، صندوق پستی 91735-613، torabizadeh@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله به بررسی اثر شکل ضربه‌زننده و نوع لایه‌چینی رویه صفحات ساندویچی کامپوزیتی تحت اثر ضربه وزنه‌افشان پرداخته شده است. هسته صفحه ساندویچی از نوع فوم آلومینیومی A356 تقویت‌شده با ذرات SiC تولیدشده با استفاده از روش ذوبی به کمک عامل فوم‌ساز CaCO₃ است. رویه صفحات از جنس شیشه‌اپوکسی با لایه‌چینی شبه‌همسانگرد، متعامد و نیز از لایه آلومینیومی خالص استفاده شده است. برای انجام آزمایش ضربه از دستگاه ضربه وزنه‌افشان و جهت بررسی اثر شکل ضربه‌زننده از سه نوع ضربه‌زننده کروی، سهموی و مخروطی استفاده شده است. برخی از پارامترهای موثر در ارزیابی رفتار مواد در بار ضربه شامل بیشینه نیروی برخورد، بیشینه جابجایی و مقدار انرژی ویژه جذب شده صفحه برای حالات مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بیانگر آن است که هر چه شعاع انحنا ضربه‌زننده بیشتر باشد بیشینه نیروی برخورد بیشتر خواهد بود. همچنین صفحات با رویه کامپوزیتی شبه‌همسانگرد دارای بیشترین انرژی ویژه جذب شده و صفحه با رویه آلومینیومی کمترین میزان انرژی ویژه جذب شده را به خود اختصاص داده است. در خصوص بیشینه نیروی برخورد و بیشینه جابجایی میانی صفحه، رویه متعامد عملکرد بهتری دارد. لذا بسته به کاربرد صفحات ساندویچی استفاده از رویه های کامپوزیتی (شبه‌همسانگرد یا متعامد) بجای رویه آلومینیومی در طراحی سازه‌های جاذب انرژی توصیه می‌گردد.

دریافت: 1398/11/06

پذیرش: 1399/11/27

کلیدواژگان:

ضربه سرعت پایین،
ورق ساندویچی کامپوزیت،
فوم آلومینیوم،
شکل ضربه‌زننده،
لایه‌چینی

Experimental study of the effect of impact shape and skin layout on the behavior of aluminum foam core sandwich panels at low velocity impact load

Mohammad Amin Torabizadeh

Assistant professor, Faculty of Montazeri, Technical and Vocational University (TVU), Khorasan Razavi Branch, Mashhad, Iran.
* P.O.B. 91735-613, Mashhad, Iran, torabizadeh@yahoo.com

Keywords

Low Velocity Impact,
Composite Sandwich Sheet,
Aluminum Foam,
Impactor Shape,
Layout

Abstract

In this paper, we investigated the effect of impactor shape and surface layer on composite sandwich plates under the impact of drop weight. The core material of the sandwich plate was A356 aluminum foam reinforced with SiC particles produced by the fusion method using the CaCO₃ foam-forming agent. The plates were made of E-glass / epoxy with the quasi-isotropic and orthogonal layout as well as a pure aluminum layer. For the impact test, the drop weight impact device was used and to investigate the effect of the impactor shape spherical, parabolic and cone impactor manufactured. Some of the effective parameters for evaluating the material behavior under impact loads including maximum impact force, maximum displacement, and the amount of specific absorbed energy of the plate for different states, were investigated. The results showed that the higher the radius of impactor curvature, the greater the impact force would be. Also, the plates with a quasi-isotropic composite had the highest specific energy absorbed and the aluminum plate have the lowest amount of particular energy absorbed. In terms of maximum impact force and maximum mid-plate displacement, the cross-ply layout skin layer worked better. Therefore, depending on the application of sandwich plates, the use of composite skin (quasi-isotropic or cross-ply) surfaces instead of aluminum in the design of energy-absorbing structures was recommended.

1- مقدمه

مهندسی عمران با توجه به خواص مکانیکی منحصر بفرود خود گسترش یافته است. رفتار این مواد در مقابل بارهای ضربه‌ای یکی از بزرگترین نگرانی‌ها در این خصوص می‌باشد. بارهای ضربه می‌تواند بر اثر سقوط اجسام بوجود آید و

در دهه‌های اخیر، کاربرد صفحات ساندویچی کامپوزیتی¹ با هسته فوم آلومینیومی² در صنایع هوافضا، خودرو، انرژی‌های تجدید پذیر و حوزه

¹ Sandwich Panels

² Aluminum Foam

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Torabizadeh, M.A., "Experimental study of the effect of impact shape and skin layout on the behavior of aluminum foam core sandwich panels at low velocity impact load", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1153-1162, 2021.

اثر بار ضربه پرداخته‌اند. آنها نتایج تجربی خود را با استفاده از مدل تحلیلی مقایسه نمودند. آنها در نتایج خود جدایش رویه آلومینیومی از هسته را عامل اصلی تخریب نمونه‌ها اشاره نمودند. همچنین میزان جذب انرژی توسط نمونه‌ها را وابسته به خواص مکانیکی فوم هسته صفحات ساندویچی دانستند. لونگ⁹ و همکاران [6] به مشخصه‌سازی فرآیند تخریب صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فومی تحت بار ضربه کم‌سرعت با استفاده از مدل المان-محدود پرداخته‌اند. آنها اثرات انرژی برخورد، چگالی فوم و لایه‌چینی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها دریافتند که نوع تخریب نمونه متأثر از میزان نفوذ ضربه‌زننده است. طوری که قبل از نفوذ جدایش صفحات رویه بر اساس قوانین مواد مرکب اتفاق افتاده و پس از نفوذ ناحیه تخریب به صورت حلقوی مشاهده می‌گردد. لیو¹⁰ و همکاران [7] رفتار صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و رویه کامپوزیتی فلزی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. با افزایش ضخامت فوم میزان جذب انرژی نیز افزایش یافت. همچنین با افزایش ضخامت لایه‌روی کامپوزیتی در میزان جذب انرژی به طور معناداری افزایش مشاهده گردید. همچنین انطباق خوبی میان نتایج تجربی و مدل المان‌محدود با استفاده از نرم‌افزار مشاهده نمودند. لیو و ژانگ¹¹ [8] نیز به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی با هسته فوم آلومینیومی تحت اثر ضربه با سرعت بالا پرداخته‌اند. آنها صحت نتایج تجربی خود را با استفاده از مدل المان‌محدود ارزیابی و اثر شکل ضربه‌زننده و نیز زاویه اصابت ضربه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آنها بیانگر افزایش میزان انرژی جذب‌شده در اثر افزایش ضخامت لایه رویی بوده‌است. در این حالت جدایش لایه‌روی در سطح بالایی نمونه و علی‌الخصوص در اطراف محل برخورد ضربه‌زننده مشاهده گردیده- است. آنها همچنین با افزایش ضخامت هسته فوم آلومینیومی عدم جدایش لایه‌روی سطح بالایی صفحه از هسته فومی را گزارش نمودند. کارا¹² و همکاران [9] رفتار خمشی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی با ضخامت‌های متفاوت را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها دریافتند که صفحات کامپوزیتی ساندویچی انتخاب مناسبی به منظور طراحی جاذب انرژی بوده و کارایی آنها با افزایش ضخامت فوم و تغییر نوع الیاف بکار گرفته شده در رویه نمونه‌ها متناسب می‌باشد. وانگ¹³ و همکاران [10] با استفاده از روش تجربی رفتار صفحات ساندویچی تحت بار ضربه با سرعت متوسط را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که ماده بکاررفته در هسته، نقش مهمی در تغییر شکل، مقدار انرژی جذب‌شده، مکانیزم تخریب و میزان نفوذ ضربه‌زننده در صفحه ایفا می‌کند. آنها هسته لانه‌زنبوی پلی‌پروپیلن¹⁴ را انتخاب بهینه برای میزان تغییرشکل پس از ضربه معرفی نمودند. هان¹⁵ و چو [11] با مقایسه مدل المان‌محدود با نتایج تجربی آزمون ضربه وزنه‌افتان به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و رویه فلزی پرداختند. نتایج آنها نشان‌دهنده آن بود که با انرژی برخورد 50 ژول، صرفاً رویه بالایی صفحه تخریب شد، با انرژی 70 ژول علاوه بر تخریب رویه بالایی نفوذ ضربه‌زننده مشاهده گردید و نهایتاً با انرژی 100 ژول نفوذ ضربه-زننده باعث تخریب رویه پایینی نیز شد. همچنین انطباق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی گزارش گردید. راجانیش¹⁶ و همکاران [12] صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فومی و رویه فلزی ترد و نرم را مورد بررسی و

آسیب‌های داخلی قابل توجهی را ایجاد و موجب کاهش مقاومت باقی‌مانده¹ صفحات کامپوزیتی گردند. از طرفی به منظور کاهش وزن سازه، ایجاد حفره‌های پر شده از هوا یا گازهای خنثی در داخل ماده زمینه و تولید یک ماده متخلخل² تحت عنوان "فوم" مدنظر بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. بسیاری از فلزات و آلیاژها مانند آلومینیوم، فولاد، مس، نیکل، سرب، روی، منیزیم و تیتانیوم قابلیت فومی شدن را با استفاده از فرآیندهای تولیدی مختلف دارند. در این میان استفاده از فلز آلومینیوم به عنوان ماده زمینه فوم، دلیل داشتن وزن سبک و نقطه ذوب پایین و نیز دلیل داشتن سفتی ویژه³ بالا، مقاومت خوب در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت جذب انرژی عالی، قابلیت بازیافت و همچنین قابلیت تولید ساختارهای سلولی نسبتاً همگن و همسانگرد، توجه زیادی را در سالهای اخیر به خود جلب نموده است [1-2]. وجود زیرساختار سلولی در فوم‌های فلزی و به ویژه فوم-های آلومینیومی این امکان را برای آن‌ها فراهم می‌کند که مقدار زیادی از انرژی جنبشی ناشی از برخورد را قبل از این که موجب تخریب سازه گردد، جذب نماید و لذا در مواردی که مقاومت در برابر ضربه یا نفوذ نیاز است، این دسته از مواد به عنوان جاذب انرژی عمل می‌کنند. دارا بودن ویژگی‌های مذکور سبب شده تا فوم-های آلومینیومی در کاربردهای اشاره شده مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از فوم آلومینیوم به عنوان ماده هسته در ساختارهای ساندویچی با رویه‌های متفاوت تحت بارگذاری مختلف از قبیل ضربه استفاده می‌شود.

فراحت و احمدی [1] ضمن ساخت دستگاه ضربه سقوط ثقلی کم سرعت به تحلیل رفتار فوم آلومینیومی تحت اثر بار ضربه به روش تجربی پرداخته‌اند. آنها در نتایج خود رفتار فوم آلومینیومی را شامل سه مرحله خطی، پلاتو و شکست مشاهده و افزایش انرژی جذب شده در این سه مرحله را برترتیب گزارش و همچنین انتخاب ماده سلولی فوم A356/SiC را به منظور طراحی جاذب‌های انرژی مناسب ذکر کردند. قاجار و رصاف [2] به بررسی اثر شکل ضربه‌زننده و نیز دمای محیط روی رفتار صفحات کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی تحت اثر ضربه وزنه افتان⁴ پرداخته‌اند. یافته‌های آنها بیانگر کاهش بیشینه نیروی برخورد و افزایش جابجایی بازی افزایش دمای محیط آزمایش بوده و همچنین اینکه با کاهش انحنای سر ضربه‌زننده، زمان برخورد کاهش، بیشینه نیروی برخورد افزایش و میزان آسیب سطحی نیز کاهش یافته‌است. کامینرو⁵ و همکاران [3] اثر ضخامت و لایه‌چینی روی میزان مقاومت فشاری پس از ضربه به صفحات کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاکی از کاهش سطح تخریب بازی افزایش میزان جذب انرژی بوده‌است. همچنین صفحات با ضخامت بیشتر دارای مقاومت فشاری پس از ضربه بالاتری بودند که دلیل افزایش سفتی خمشی آنها گزارش شده‌است. آنها دریافتند که صفحات با لایه چینی غیر متعامد دارای عملکرد بهتری در بارگذاری ضربه می‌باشند. چنگ⁶ و همکاران [4] رفتار صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی را تحت نفوذ شبه‌استاتیکی⁷ بررسی و رفتار نمونه‌ها را در سه مرحله الاستیک، تسلیم و شکست مشاهده نمودند. با افزایش لایه رزین اپوکسی میزان قابلیت جذب انرژی افزایش یافت. کروی⁸ و همکاران [5] به پیش‌بینی رفتار صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت

⁹ Long

¹⁰ Liu

¹¹ Zhang

¹² Kara

¹³ Wang

¹⁴ Polypropylene Honeycomb

¹⁵ Han

¹⁶ Rajaneesh

¹ Residual Resistant

² Porous Material

³ Specific Stiffness

⁴ Drop Weight

⁵ Caminero

⁶ Cheng

⁷ Quasi-static

⁸ Crupi

میانگین اندازه ذرات برابر با 11 میکرومتر به عنوان فاز تقویت‌کننده که نقش پایدارساز یا عامل ویسکوزکننده در فرآیند تولید فوم را نیز دارد تهیه شد. حرارت دهی ذرات SiC به مدت یک ساعت در دمای 951 درجه سانتیگراد و سپس به مدت 2 ساعت در دمای 651 درجه سانتیگراد به منظور حذف آلودگی‌ها و گازهای جذب شده سطحی و در نتیجه بهبود ترشوندگی ذرات SiC بوسیله مذاب آلومینیوم انجام گردید. پودر کربنات کلسیم با خلوص 99,5 درصد وزنی و اندازه متوسط 5 میکرومتر به عنوان عامل فوم‌ساز استفاده شد. این پودر نیز به منظور حذف رطوبت و آلودگی سطحی و افزایش ویژگی‌های ترشوندگی و به تبع آن توزیع بهتر این ذرات در مذاب آلومینیوم به مدت 2 ساعت در دمای 211 درجه سانتیگراد حرارت داده شد.

برای تولید محصول فومی ابتدا شمش کامپوزیتی از زمینه آلومینیومی به همراه مقادیر مشخصی از ذرات SiC با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی^۳ در دمای بین 711-651 درجه سانتیگراد تولید و ریخته‌گری شد. این شمش در مرحله بعد و پس از ذوب مجدد در دمای 651 درجه سانتیگراد و با سرعت 1411 دور بر دقیقه هم زده شد. در این مرحله مقدار 1 درصد وزنی منیزیم به مذاب افزوده و سپس با افزودن پودر کربنات کلسیم مخلوط برای مدت یک دقیقه هم زده شد. پس از چند دقیقه و بعد از تولید گاز دی‌اکسید کربن، فوم تولید شده از کوره خارج و در هوای محیط سرد می‌شود. مقدار 3 درصد وزنی از پودر کربنات کلسیم و 11 درصد حجمی ذرات SiC در این مرحله برای تولید محصولات استفاده شده است [1]. شکل 1 نمونه فوم آلومینیومی ساخته شده به روش فوق را نشان می‌دهد.

سایر خواص مکانیکی رویه آلومینیومی و فوم هسته بکار رفته در مرجع [1] قابل مشاهده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 [1]

Table 1 Chemical composition of cast aluminum alloy A356 [1]						
Mn	Zn	Ti	Cu	Fe	Mg	Si
0.01	0.02	0.07	0.09	0.19	0.35	6.81
						ترکیب درصد وزنی



Fig.1 Aluminum foam sample produced

شکل 1 نمونه فوم آلومینیومی تولید شده

برای ساخت رویه کامپوزیتی نمونه‌ها از الیاف شیشه به صورت پارچه تک-چپته استفاده شده است. هر کدام از لایه‌ها دارای ضخامت 0.2 میلی‌متر و

تحلیل قرار داده‌اند. آنها نتایج نیروی برخورد، انرژی جذب‌شده و شکل تخریب را به دو روش با یکدیگر مقایسه نمودند که انطباق خوبی مشاهده گردید. بابایی و همکاران [13-14] صفحات دایره‌ای و مستطیلی فولادی و آلیاژ آلومینیومی تحت بار ضربه با سرعت کم با استفاده از دستگاه وزنه‌افشان را مورد ارزیابی قرار دادند. همخوانی نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی آنها بیانگر روشی مناسب برای بررسی رفتار پلاستیک این صفحات تحت بارگذاری ضربه می‌باشد. جعفری و رهنما [15] به حل عددی میزان جذب انرژی در سازه‌های ساندویچی تحت بار ضربه با سرعت کم با استفاده از نرم افزار پرداخته و ضمن مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی دیگران به ارزیابی برخی پارامترهای ضربه پرداخته‌اند. فراهت [16] رفتار فوم آلومینیومی را تحت بار ضربه با سرعت پایین را با استفاده از روشهای عددی تحلیل و با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه نمودند. پاک‌نژاد و همکاران [17] به بررسی اثر شرایط مرزی دلخواه بر پاسخ ورق چندلایه کامپوزیتی تحت بار ضربه با سرعت پایین و جرم بزرگ پرداخته‌اند. آنها با استخراج معادلات حاکم بر صفحه با استفاده از تئوری مرتبه اول و استفاده از روشهای تحلیلی، به تحلیل نتایج خود پرداخته‌اند.

بر اساس مطالعات صورت گرفته در گذشته و با توجه به نوع کاربرد صفحات ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در صنایع مختلف، تا کنون به بررسی امکان جایگزینی صفحات کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی به جای رویه معمول فلزی آلومینیومی و نیز ارزیابی اثر شکل هندسی ضربه‌زننده و لایه‌چینی رویه‌های کامپوزیتی صفحات پرداخته نشده است. از آنجایی که بسته به نوع کاربرد صفحات در صنایع، شکل هندسی ضربه‌زننده (شعاع انحناء ضربه‌زننده) متغیر است، برای شناخت کامل رفتار کامپوزیت‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای لازم است پاسخ آنها در مقابل اشکال هندسی متداول نیز مورد مطالعه قرار گیرد. همانطور که در مطالعات پیشین نیز بدان اشاره گردیده است، نوع رویه صفحه ساندویچی و شکل ضربه‌زننده نقش مهم و اساسی در رفتار صفحه در این نوع بارگذاری ایفا می‌کند [17, 6, 2]. لذا بررسی اثر نوع رویه صفحه ساندویچی کامپوزیتی نیز می‌بایستی بیشتر مدنظر قرار گیرد. بر همین اساس نوآوری‌ها و اهداف اصلی این پژوهش که تا کنون بدان پرداخته نشده، عبارتند از: 1- بررسی امکان جایگزینی صفحات کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی به جای رویه معمول فلزی آلومینیومی 2- ارزیابی اثر شکل هندسی (شعاع انحناء) ضربه‌زننده 3- بررسی اثر نوع لایه‌چینی رویه‌های کامپوزیتی. بدین منظور سه نوع ضربه‌زننده مخروطی، سهموی و کروی و نیز سه نوع لایه‌چینی رویه آلومینیومی، کامپوزیتی متعامد^۱ و کامپوزیتی شبه‌همسانگرد^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیشینه نیروی برخورد، انرژی ویژه جذب شده و جابجایی نمونه برای حالات مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. هسته صفحات از جنس فوم آلومینیومی، رویه کامپوزیتی از نوع شیشه‌اپوکسی و برای انجام آزمایشات از دستگاه ضربه وزنه‌افشان استفاده می‌شود.

2- مواد، روش تولید و ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول 1، به عنوان فلز پایه انتخاب گردید. از آنجاییکه ساخت نمونه‌های فومی این پژوهش از همان دسته تولیدی مرجع [1] بوده است، لذا می‌توان از همین مشخصات شیمیایی بهره برد. ذرات SiC با خلوص 98 درصدوزنی و

¹ Cross-Ply Laminates

² Quasi-isotropic Laminates

³ Stir Casting

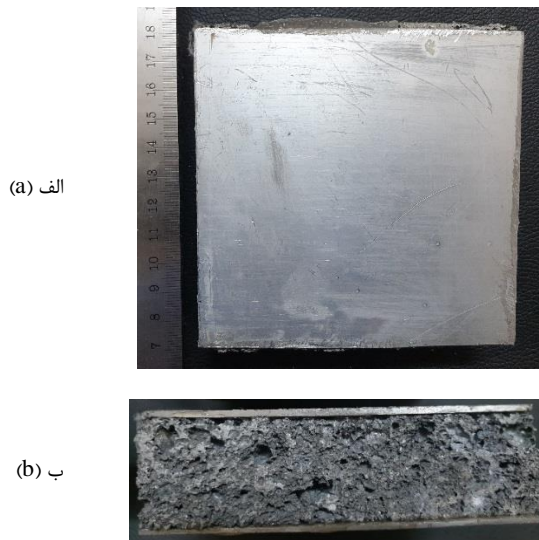


Fig. 2 Sample Sandwich Composite Plate with Aluminum Case (a) Front View (b) Side View

شکل 2 نمونه صفحه کامپوزیتی ساندویچی با رویه آلومینیومی (الف) نمای روبرو (ب) نمای جانبی

3- دستگاه آزمایش ضربه‌زننده

یکی از عوامل مهم و موثر در بررسی پدیده ضربه، انرژی اولیه پرتابه می‌باشد. در این مطالعه ضربه با سرعت پایین توسط دستگاه وزنه‌افتان انجام شده‌است؛ که ممکن است بر اثر سقوط ناگهانی ابزار کار در هنگام تعمیر و نگهداری روی سازه کامپوزیتی و یا برخورد گوله در طراحی جلیقه‌های ضدگلوله اتفاق افتد. بدین منظور از دستگاه وزنه‌افتان ساخت شرکت سایش ایران موجود در آزمایشگاه مکانیک شکست دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی استفاده شده‌است. در این دستگاه پرتابه روی یک ریل با اصطکاک بسیار کم قرار دارد که می‌تواند آزادانه سقوط نماید. در این تحقیق از میزان کم اصطکاک در ریل و تجهیزات دستگاه بنا به توصیه شرکت سازنده صرف‌نظر شده‌است. جرم کلی ضربه‌زننده و متعلقات متصل به آن (حسگر نیرو، یاتاقان‌ها و ...) 7 کیلوگرم است که می‌تواند حداکثر از ارتفاع 1 متر بر روی هدف سقوط کند. ظرفیت حسگر نیرو 10 کیلو نیوتن و با فرکانس داده‌برداری 25 کیلوهرتز است. جرم و ارتفاع پرتابه قابل تغییر بوده و لذا می‌توان انرژی‌های جنبشی متفاوتی را اعمال کرد. در این آزمایش جهت کلیه نمونه‌ها، جرم ضربه‌زننده و متعلقات با افزایش وزنه 10 کیلوگرمی، به 17 کیلوگرم تغییر کرده و از ارتفاع 70 سانتی‌متری روی نمونه هدف سقوط می‌کند. بدین ترتیب انرژی پتانسیل اولیه ضربه برای کلیه نمونه‌ها 116.7 ژول خواهد بود. شکل الف-3 نمای کلی دستگاه مورد استفاده را نشان می‌دهد. مطابق شکل نمونه‌های مربعی ساخته شده روی تکیه‌گاه مخصوص قرار گرفته و سپس توسط گیره مربعی تو خالی و به‌وسیله چهار پیچ محکم می‌شود. بدین‌صورت هر چهار لبه نمونه به پهنای 10 میلی‌متر گیردار و به ابعاد 100*100 میلی‌متر آزاد است. ضربه‌زننده دقیقاً روی نقطه‌میانی فضای آزاد نمونه سقوط می‌کند. (شکل ب-3) کلیه آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ASTM D7136 [19] انجام می‌شود.

جرم 200 گرم در مترمربع می‌باشد. این نوع الیاف در حال حاضر به‌علت کاربردهای مختلف در صنایع مورد توجه قرار گرفته‌است. همچنین از رزین اپوکسی ML503 و هاردنر HA11 که کاربرد آن در صنایع داخلی رایج می‌باشد، استفاده شده‌است. خواص مکانیکی صفحات کامپوزیتی به همراه رزین استفاده شده در جدول 2 آورده شده‌است. ساخت این نمونه‌ها از همان دسته تولیدی مرجع [18] انجام پذیرفته‌است. رزین و الیاف شیشه تولیدی کشور چین از شرکت تامین کننده مواد اولیه (راستین رزین باهر) تهیه شده‌است. در این تحقیق از روش لایه‌چینی دستی برای ساخت لایه کامپوزیتی رویه صفحات استفاده و ضخامت رویه کلیه نمونه‌ها بدون احتساب لایه چسبی اتصال دهنده، 2 میلی‌متر (مشابه ضخامت رویه آلومینیومی) در نظر گرفته شده‌است. اتصال رویه‌ها به هسته فوم آلومینیومی به منظور همخوانی شیمیایی آنها، توسط همان رزین اپوکسی دو جزئی که در تولید رویه‌های کامپوزیتی بکار گرفته شد، با ضخامت بسیار ناچیزی انجام شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی رویه کامپوزیتی استفاده شده [18]

Table 2 Mechanical Properties of Composite Procedures Used [18]

مقدار	خاصیت مکانیکی
19.94	مدول کششی طولی (GPa)
5.83	مدول کششی عرضی (GPa)
2.11	مدول برشی (GPa)
700.11	استحکام کششی طولی (MPa)
570.37	استحکام فشاری طولی (MPa)
69.85	استحکام کششی عرضی (MPa)
122.12	استحکام فشاری عرضی (MPa)
68.89	استحکام برشی (MPa)

ابعاد نمونه‌ها بر اساس فیکسچر دستگاه مورد استفاده 120*120 میلی‌متر با ضخامت 20 میلی‌متر است (جدول 3). شکل 2 نمونه صفحه کامپوزیتی ساندویچی با رویه آلومینیومی را نشان می‌دهد. کلیه مراحل ساخت نمونه‌ها توسط گروه پژوهشی مواد سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی انجام شده‌است.

جدول 3 مشخصات هندسی و وزنی نمونه‌های تولیدی

Table 3 Geometric and weight characteristics of the specimens produced

نوع رویه نمونه	ضخامت هسته فومی (میلی‌متر)	ضخامت رویه (میلی‌متر)	وزن نمونه (گرم)
آلومینیوم	20	2	388
شبه‌همسانگرد	20	2	301
متعامد	20	2	287

هر سه ضربه‌زننده با قطر 13 میلی‌متر و ارتفاع نفوذ 60 میلی‌متر از جنس فولاد CK45 سخت‌کاری شده ساخته شده‌است. شکل 4 این سه نوع ضربه‌زننده را به همراه وزن هریک از آنها نشان می‌دهد. از آنجاییکه وزن ضربه‌زننده‌های سهموی و کروی دقیقاً با هم یکسان و اختلاف قابل توجهی با نوع مخروطی ندارند (در حدود 3 درصد)، لذا اثر تفاوت وزن ضربه‌زننده در نتایج قابل صرفنظر کردن می‌باشد. لذا در تحقیق پیشرو، صرفاً شکل هندسی ضربه‌زننده به عنوان پارامتر موثر بر رفتار صفحه مورد ارزیابی قرار گرفته و از اثر وزن آن بدون ایجاد خطای معناداری در نتایج صرفنظر شده است. این فرضیه در کارهای مشابه نیز در نظر گرفته شده است. [2]



(a) الف	(b) ب	(c) ج	
136	141	141	وزن (gr)

Fig. 4 Three types of impactor shapes (a) cone (b) parabolic (c) spherical with their weight

شکل 4 سه نمونه ضربه‌زننده استفاده شده (الف) مخروطی (ب) سهموی (ج) کروی به همراه وزن آنها

علاوه بر این در مطالعه پیش‌رو، اثر نوع رویه‌های ساندویچی صفحه نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. در ارزیابی سایر مطالعات گذشته اکثراً صفحات ساندویچی را با رویه‌های فلزی و یا کامپوزیت ساده مورد مطالعه قرار داده‌اند و کمتر به بررسی اثر نوع لایه‌چینی رویه کامپوزیتی پرداخته شده‌است. لذا در این مطالعه علاوه بر ساخت نمونه‌ها با رویه آلومینیومی، رویه‌های کامپوزیتی متعامد و شبه‌همسانگرد نیز ساخته و نتایج آن مقایسه شده‌است. شکل 5 نمونه صفحه با رویه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

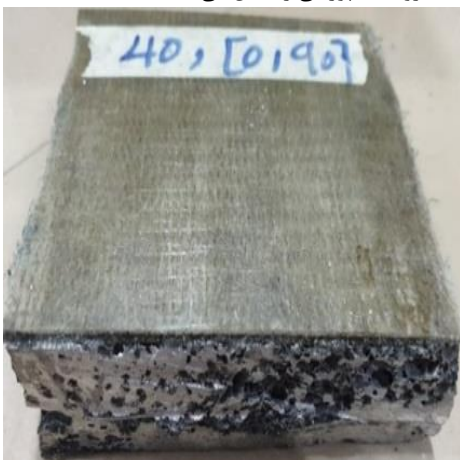


Fig. 5 sandwich composite plate with cross-ply surface

شکل 5 نمونه صفحه کامپوزیتی ساندویچی با رویه متعامد



(a) الف



(b) ب



(c) ج

Fig. 3 Drop weight device (a) General scheme (b) Moment of impact on the specimen (c) pneumatic jack equipment for secondary impact prevention

شکل 3 دستگاه ضربه وزنه‌افشان مورد استفاده (الف) شمای کلی دستگاه (ب) لحظه برخورد ضربه‌زننده روی نمونه (ج) تجهیزات جک نیوماتیک به منظور پیشگیری از ضربه ثانویه

به منظور پیشگیری از برخوردهای مجدد ضربه‌زننده روی نمونه، از یک جک نیوماتیکی استفاده شده که پس از برخورد اول به سرعت عمل کرده و ضربه‌زننده را متوقف می‌کند تا از برخوردهای ثانویه جلوگیری شود. (شکل ج-3)

4- اثر شکل ضربه‌زننده و لایه‌چینی رویه‌ها

در این پژوهش به بررسی اثر شکل ضربه‌زننده و نیز نوع رویه صفحه ساندویچی پرداخته می‌شود. از آنجایی که معمول‌ترین نوع ضربه‌زننده نیم-کروی است، در اکثر مطالعات از این نوع ضربه‌زننده استفاده شده‌است. همان‌گونه که قبلاً نیز توضیح داده شد، شکل هندسی ضربه‌زننده با توجه به کاربرد صفحات ساندویچی در صنایع مختلف، متفاوت بوده و لذا می‌تواند در پارامترهای ارزیابی بار ضربه بسیار موثر باشد. بنابراین در این تحقیق سه نوع شکل ضربه‌زننده مخروطی، سهموی و کروی مورد استفاده قرار گرفته‌است.

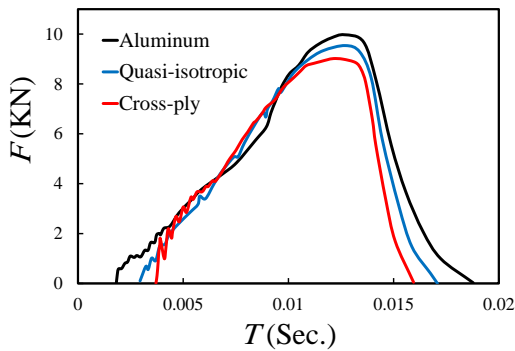


Fig. 7 Comparison of force-time diagrams for three types of skin layer with spherical impactor

شکل 7 مقایسه نمودار نیرو-زمان برای سه نوع رویه صفحه ساندویچی با ضربه‌زننده کرومی

در این نمودار مشاهده می‌شود که رویه آلومینیومی صفحه ساندویچی بیشترین مقدار نیروی برخورد و رویه کامپوزیتی متعامد کمترین نیروی برخورد را به خود اختصاص داده‌است. به علت خواص مکانیکی لایه آلومینیومی و شکل هندسه ضربه‌زننده کرومی، کمترین مقدار نفوذ پرتابه در نمونه رخ داده که نتیجه آن بیشترین نیروی برخورد و زمان اصابت می‌باشد. پس از آن رویه کامپوزیتی شبه‌همسانگرد و متعامد با بیشینه نیروی برخورد و زمان اصابت کمتر قرار دارند. لازم به ذکر است به منظور ارزیابی عملکرد رویه‌های مختلف در بار ضربه، پارامترهای مختلفی می‌بایستی مدنظر قرار گیرد که در ادامه مقاله بدان اشاره خواهد شد. لکن به دلیل کاهش تقریبی 30 درصدی وزن رویه، کاهش هزینه‌های تولید و توجیه اقتصادی و سایر خصوصیات منحصر بفرد مواد کامپوزیت، می‌توان از رویه‌های کامپوزیتی بهره برد.

در نمودارهای نیرو-زمان در اشکال 6 و 7 نوسانات متعددی در بخش ابتدایی نمودار ملاحظه می‌شود. با توجه به اینکه در اندازه‌گیری نیروی ضربه‌زننده از لودسل متصل به دستگاه داده برداری می‌شود، با شروع فرآیند برخورد و نفوذ ضربه‌زننده درون رویه صفحه و هسته فوم آلومینیومی و با عنایت به ساختار متخلخل هسته و همچنین رویه کامپوزیتی، آسیب‌های تدریجی ایجاد می‌گردد. این آسیب‌های تدریجی عامل کاهش مقاومت صفحه بوده که منجر به افت ناگهانی نمودار نیرو است. با ادامه نفوذ ضربه‌زننده و افزایش نیرو، اثر آسیب محلی از بین رفته و نمودار نیرو-زمان تا آسیب کلی صفحه و یا صفر شدن نیروی برخورد ادامه پیدا می‌کند.

از نمودار نیرو-زمان و با استفاده از رابطه (1)، شتاب ضربه‌زننده بدست می‌آید

$$F(t) = ma(t) \quad (1)$$

که در آن m جرم ضربه‌زننده است. برای بدست آوردن رابطه سرعت-زمان از رابطه زیر استفاده می‌شود

$$V(t) = V_0 - \int a(t)dt \quad (2)$$

که در آن V_0 سرعت پرتابه در لحظه برخورد با صفحه است. با انتگرال‌گیری مجدد از رابطه (2) می‌توان رابطه جابجایی بر حسب زمان برخورد ضربه‌زننده را مطابق رابطه (3) بدست آورد:

$$\delta(t) = \int V(t)dt \quad (3)$$

از طرفی میزان انرژی جذب‌شده توسط صفحه از سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بدست می‌آید. به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد نمونه‌ها در بار

5- نتایج

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، کلیه آزمایش‌ها بر حسب استاندارد ASTM D 7136 در دمای محیط انجام شده‌است. برای پیشگیری از خطای آزمایشگاهی، هر آزمایش روی سه نمونه مشابه انجام گرفته و با مقایسه پارامترهای آماری (مقدار میانگین و انحراف از معیار) از صحت و قابلیت اطمینان نتایج آزمایشگاهی اطمینان حاصل گردیده‌است. پیش از شروع آزمایش بوسیله دستگاه، فرآیند کالیبراسیون آن مطابق دستورالعمل پیشنهادی شرکت سازنده طی شده که شامل مراحل صفر کردن وزن کفی، کالیبراسیون حسگر نیرو، کالیبراسیون دما و تنظیمات اولیه دستگاه می‌باشد. شکل 6 مقایسه نمودارهای نیرو-زمان برای سه ضربه‌زننده مختلف روی صفحه کامپوزیتی ساندویچی با رویه آلومینیومی را نشان می‌دهد که توسط حسگر نیروی دستگاه داده برداری شده‌است. این نمودارها بیانگر افزایش بیشینه نیروی برخورد در مقابل افزایش شعاع انحنای ضربه‌زننده است. کمترین نیروی برخورد مربوط به ضربه‌زننده مخروطی بوده که به علت نفوذ ضربه‌زننده در داخل نمونه است. بیشترین آن متعلق به نوع کرومی ضربه‌زننده است. ضربه‌زننده کرومی به علت هندسه‌ای که دارد، توان نفوذ در نمونه را نداشته لذا در همان لحظه‌ی اول نیروی شدیدی را به نمونه وارد می‌کند. از آنجایی که انرژی اولیه برخورد در هر سه نوع ضربه‌زننده یکسان است، این پدیده به علت کاهش سطح برخورد با کاهش انحنای آن می‌باشد. نتایج مشابه آنچه در این بخش مشاهده گردید، در مطالعات پیشین نیز گزارش شده‌است. [2] از آنجاییکه با بررسی نتایج آزمایشگاهی، رفتار ضربه‌زننده‌های مختلف، به نوع لایه رویی صفحه ساندویچی وابستگی معناداری مشاهده نگردید، لذا در این بخش، صرفاً نتایج با رویه آلومینیومی ارائه گردیده است.

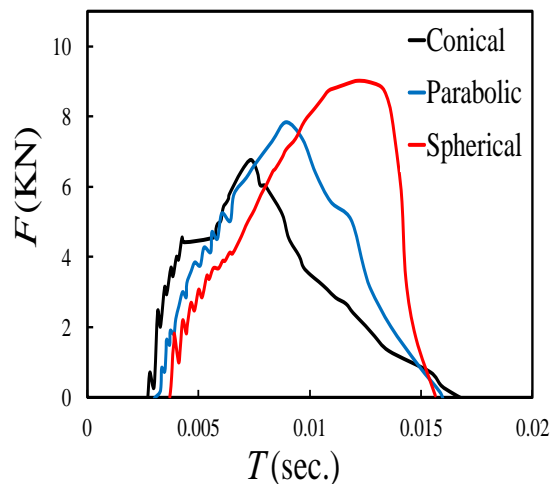


Fig. 6 Comparison of force-time diagram for three different impactor with aluminum skin layer

شکل 6 مقایسه نمودار نیرو-زمان برای سه نوع ضربه‌زننده مختلف با رویه آلومینیومی صفحه ساندویچی

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که هر چه شعاع انحنای ضربه‌زننده بیشتر باشد، بیشینه نیروی برخورد با نمونه نیز افزایش یافته و در مقابل زمان برخورد آن کاهش می‌یابد. برای ارزیابی اثر نوع رویه صفحات ساندویچی، همان‌طور که در قسمت قبل تشریح شد، آزمایش ضربه روی سه نوع رویه آلومینیومی، کامپوزیت متعامد و کامپوزیت شبه‌همسانگرد انجام شد. نتایج نمودارهای نیرو-زمان با ضربه‌زننده کرومی در شکل 7 نشان داده شده‌است.

می‌کند. این نتایج با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین [2] همخوانی دارد.

همانطور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، در این پژوهش همچنین به بررسی اثر رویه صفحه ساندویچی در رفتار مقابل بار ضربه پرداخته شده‌است. شکل 10 و 11 به ترتیب بیشینه جابجایی ضربه‌زننده، بیشینه نیروی برخورد ضربه‌زننده و میزان انرژی ویژه جذب‌شده توسط صفحه ساندویچی با سه نوع رویه متفاوت آلومینیومی، متعامد و شبه‌همسانگرد و استفاده از ضربه‌زننده کروی را نشان می‌دهد.

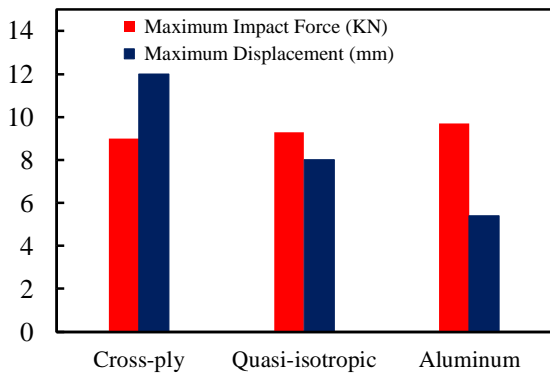


Fig. 10 Maximum Impact Force and Displacement of sandwich plate with different types of skin layer using spherical impactor

شکل 10 بیشینه نیروی برخورد و جابجایی صفحه ساندویچی با سه نوع رویه مختلف و استفاده از ضربه‌زننده کروی

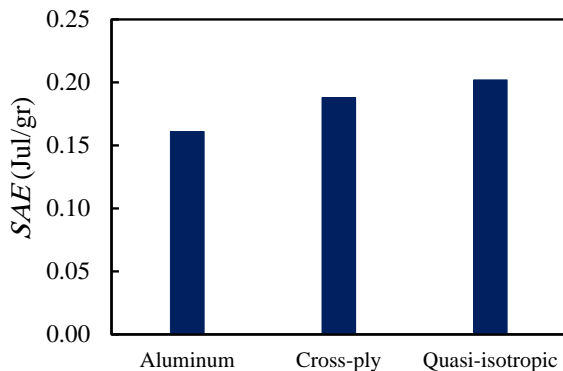


Fig. 11 specific energy absorbed of a sandwich plate with different types of skin layer using spherical impactor

شکل 11 میزان انرژی جذب ویژه صفحه ساندویچی با سه نوع رویه مختلف و استفاده از ضربه‌زننده کروی

نمودارهای فوق حاکی از آنست که بیشترین میزان جابجایی صفحه ساندویچی به رویه کامپوزیتی متعامد و کمترین آن به رویه آلومینیومی تعلق دارد. همچنین رویه آلومینیومی بیشترین نیروی برخورد ضربه‌زننده را در این حالت به خود اختصاص داده‌است. با توجه به وزن متفاوت نمونه‌های تولید شده، (مندرجات جدول 3)، بیشترین میزان جذب انرژی ویژه برخورد پرتابه به ترتیب در صفحه ساندویچی با رویه شبه‌همسانگرد، متعامد و آلومینیومی اتفاق افتاده‌است. شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی با استفاده از ضربه زننده کروی و برای دو رویه کامپوزیتی شبه همسانگرد و آلومینیومی را نشان می دهد. این نمودار با استفاده از اطلاعات نمودار نیرو-زمان و اعمال روابط (1) تا (3) بدست آمده است. همانطور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، این نمودار مربوط

ضربه و همچنین به علت عدم تاثیر ضخامت و وزن آنها در میزان انرژی جذب‌شده، در این تحقیق از انرژی جذب‌شده ویژه¹ (مطابق رابطه 4) بر حسب ژول بر گرم استفاده شده‌است.

$$(SEA) = \frac{E}{W} \quad (4)$$

که در آن E انرژی جذب‌شده بر حسب ژول و W وزن نمونه بر حسب گرم می‌باشد. شکل 8 و 9 به ترتیب به مقایسه بیشینه جابجایی ضربه‌زننده، بیشینه نیروی برخورد ضربه‌زننده و میزان انرژی ویژه جذب‌شده توسط صفحه ساندویچی با رویه آلومینیومی و برای سه نوع ضربه‌زننده کروی، سهموی و مخروطی می‌پردازد.

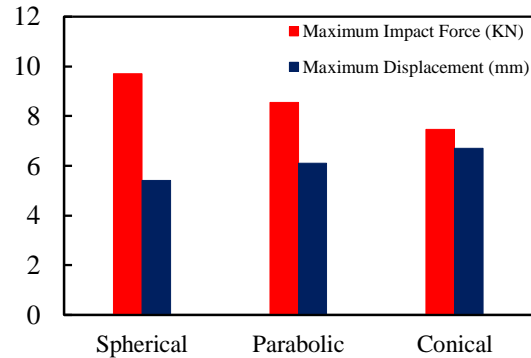


Fig.8 Maximum impact force and displacement of sandwich plate with aluminum skin layer caused by different impactor

شکل 8 بیشینه نیروی برخورد و بیشینه جابجایی صفحه ساندویچی با رویه آلومینیومی ناشی از ضربه‌زننده های مختلف

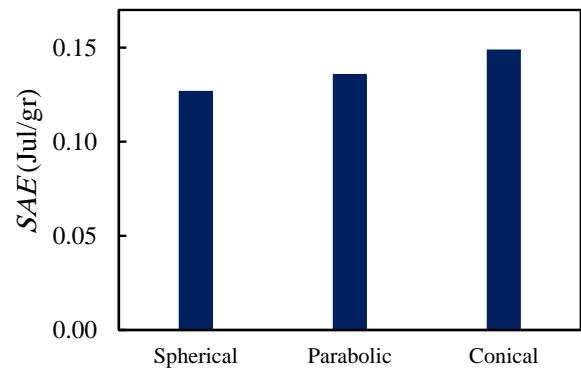


Fig. 9 specific energy absorbed of the sandwich plate with aluminum skin layer caused by different impactor

شکل 9 میزان انرژی جذب ویژه صفحه ساندویچی با رویه آلومینیومی ناشی از ضربه‌زننده های مختلف

همانگونه که مشاهده می‌شود هر چه شعاع انحنای ضربه‌زننده بیشتر باشد (سر ضربه‌زننده پهن تر باشد)، میزان جابجایی آن کمتر و در مقابل بیشینه نیروی برخورد بیشتر است. از طرفی با افزایش شعاع انحنای ضربه‌زننده، میزان جذب انرژی توسط صفحه نیز کاهش می‌یابد. این رفتار صفحه ساندویچی در برابر ضربه زننده‌های مختلف به دلیل افزایش میزان نفوذ ضربه‌زننده بازای کاهش انحنای آن می‌باشد. بدین ترتیب تمام انرژی جنبشی ناشی از سرعت برخورد ضربه‌زننده به صفحه صرف نفوذ پرتابه به داخل هسته فومی آن گردیده و لذا رویه صفحه ساندویچی کمترین میزان مقاومت را ایفا

¹ Specific Energy Absorbed (SEA)

6- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر شکل هندسی ضربه‌زننده و لایه‌چینی رویه در رفتار صفحه کامپوزیتی ساندویچی پرداخته شد. بدین منظور سه نوع شکل هندسی ضربه‌زننده مخروطی، سهموی و کروی و نیز سه نوع رویه آلومینیومی، کامپوزیتی متعامد و کامپوزیتی شبه‌همسانگرد با ضخامت 2 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. از فوم آلومینیومی به ضخامت 20 میلی‌متر به عنوان هسته صفحه ساندویچی استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در دمای اتاق و طبق استاندارد مربوطه آماده‌سازی و با استفاده از روش ضربه وزنه‌افتان انجام شد. بحث در خصوص تحلیل نتایج در بخش قبل بدان اشاره شد، موارد ذیل به عنوان جمع‌بندی نتایج قابل ذکر است:

- در صفحات ساندویچی با رویه آلومینیومی، بیشترین نیروی برخورد مربوط به ضربه‌زننده کروی و کمترین آن مربوط به ضربه‌زننده مخروطی است. به عبارتی با کاهش شعاع انحنای ضربه‌زننده، بیشینه نیروی برخورد نیز کاهش می‌یابد. لذا در کاربردهایی از جاذب‌های انرژی که شکل هندسی ضربه‌زننده از نوع کروی است، بیشینه نیروی برخورد بسیار زیاد است که می‌بایستی در طراحی سازه‌ها مورد توجه قرار گیرد.
- در صفحات ساندویچی با رویه آلومینیومی، جابجایی ضربه‌زننده مخروطی به واسطه امکان نفوذ در صفحه، از سایر انواع ضربه‌زننده بیشتر و نوع کروی دارای کمترین عمق نفوذ ضربه‌زننده است. می‌توان گفت هر چه ضربه‌زننده تیزتر باشد، جابجایی آن در اثر برخورد با صفحه افزایش می‌یابد. لذا در طراحی سازه‌های جاذب انرژی عمق نفوذ ضربه‌زننده عامل بسیار مؤثری تلقی گردیده و این پارامتر تابعی از شعاع انحنای آن می‌باشد.
- میزان جذب انرژی جنبشی ویژه ناشی از برخورد ضربه‌زننده در صفحات با رویه آلومینیومی با ضربه‌زننده مخروطی بیشترین مقدار و برای ضربه‌زننده کروی کمترین مقدار می‌باشد. لذا در طراحی سازه‌هایی که در آن میزان جذب انرژی دارای اهمیت بیشتری بوده و همچنین ضربه‌زننده دارای هندسه مخروطی است، استفاده از این نوع صفحات ساندویچی توصیه می‌گردد.

- با استفاده از ضربه‌زننده کروی، بیشینه و کمینه نیروی برخورد به ترتیب در صفحات ساندویچی با رویه آلومینیومی و کامپوزیتی متعامد مشاهده شده است. همچنین در این حالت، میزان جابجایی ضربه‌زننده در صفحه با رویه کامپوزیتی متعامد بیشترین و با رویه آلومینیومی کمترین مقدار است. لذا در صورتیکه در طراحی صفحات ساندویچی کمترین میزان جابجایی دارای اهمیت بیشتری باشد، استفاده از رویه آلومینیومی توصیه می‌گردد.

به جابجایی ضربه‌زننده بوده و اطلاعاتی در مورد جابجایی قطعه کامپوزیتی ارائه نمی‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدای نمودار، رفتار تقریباً خطی می‌باشد که با افزایش میزان نفوذ ضربه‌زننده، میزان نیرو نیز افزایش می‌یابد. از شیب این بخش خطی ابتدایی نمودار نیرو-جابجایی، می‌توان به سفتی خمشی ورق تعبیر کرد. قسمت دوم نمودار و در بخش کوچکی، با افزایش میزان نفوذ ضربه‌زننده، مقدار نیرو تقریباً ثابت است. تا اینکه در بخش پایانی که مربوط به بار برداری آزمایش است، دیگر ضربه‌زننده در نمونه نفوذ نکرده و با جدایش ضربه‌زننده از نمونه، نیروی وارده تا رسیدن به صفر به تدریج کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است میزان اختلاف بیشینه نیروی برخورد و مقدار انرژی ویژه جذب‌شده توسط صفحه ساندویچی با سه رویه مختلف حدود 4-5 درصد است. این میزان اختلاف در سه رویه بیانگر آنست که رویه‌های کامپوزیتی متعامد و شبه‌همسانگرد نسبت به رویه آلومینیومی، دارای انرژی ویژه جذب بیشتری بوده و لذا می‌تواند جایگزین مناسبی جهت ساخت صفحات ساندویچی تحت بار ضربه معرفی گردد. علاوه بر آن، کاهش وزن سازه، استحکام در برابر سایش، خستگی، مقاومت حرارتی و سایر خصوصیات متمایز مواد کامپوزیت می‌تواند مشوق طراح برای استفاده از این رویه‌ها در طراحی سازه‌های جاذب انرژی باشد.

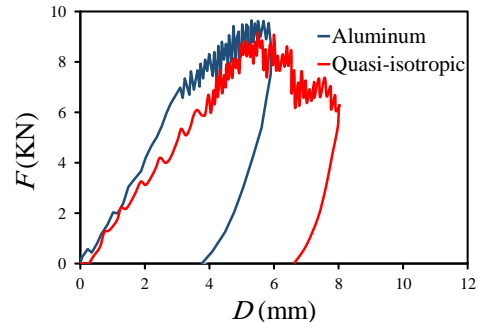


Fig. 12 Comparison of force-displacement diagrams for two types of skin layer (pure aluminum and quasi-isotropic composite) with spherical impactor

شکل 12 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی برای دو نوع رویه آلومینیومی و کامپوزیتی شبه‌همسانگرد در صفحه ساندویچی با ضربه‌زننده کروی

شکل 13 تصاویر نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های مختلف را که با استفاده از ضربه‌زننده کروی تحت آزمایش ضربه‌افتان قرار گرفته، نشان داده شده است. از آنجایی که تحلیل آسیب نمونه‌ها و مکانیزم تخریب آنها موضوع این مقاله نیست، صرفاً به گزارش نمونه‌ای از آن بسنده می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌شود، ضربه‌زننده کروی در صفحه با رویه‌های آلومینیومی و شبه‌همسانگرد از رویه بالایی وارد شده اما در هسته فومی صفحه متوقف شده است. در صورتی که در صفحه با رویه متعامد ضربه‌زننده از رویه پایینی خارج شده شده است. همانگونه که در شکل نیز مشاهده می‌شود، آسیب سطحی نمونه با رویه شبه‌همسانگرد بیشتر از آسیب سطحی نمونه مشابه با رویه متعامد است. این پدیده به علت نیروی برخورد بیشتر ضربه‌زننده در این حالت است (شکل 11). همچنین جدایش رویه از هسته در نمونه متعامد دیده می‌شود که در مورد مشابه شبه‌همسانگرد ملاحظه نشده است. همچنین در ارزیابی عمق نفوذ ضربه‌زننده در این حالت، بیشترین عمق نفوذ متعلق به صفحه با رویه متعامد و کمترین آن مربوط به صفحه با رویه آلومینیومی است که در شکل 10 نیز مشاهده می‌شود.

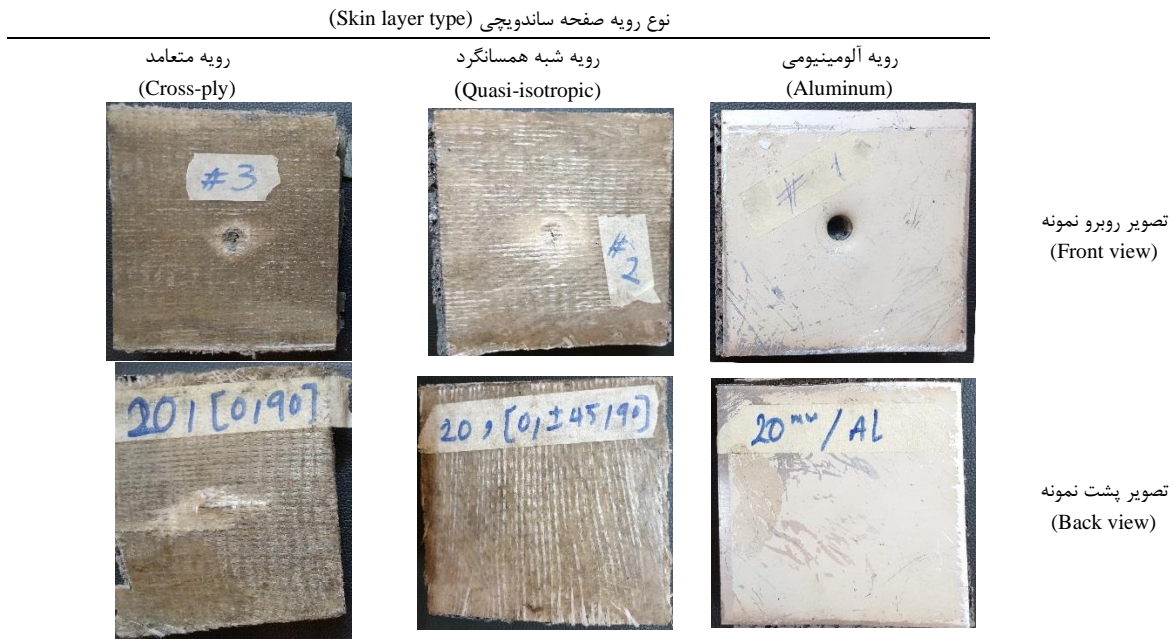


Fig. 13 Front and back view of the specimens after testing by a spherical impactor

شکل 13 نمای روبرو و پشت نمونه های پس از انجام آزمایش ضربه وزنه‌افشان بوسیله ضربه‌زننده کرومی

- با توجه به مقایسه مقدار انرژی‌های ویژه جذب‌شده در صفحات با رویه‌های آلومینیومی، متعامد و شبه‌همسانگرد، می‌توان نتیجه گرفت در صورتیکه در طراحی جاذب انرژی میزان جذب انرژی ویژه دارای اهمیت بیشتری باشد، رویه‌های کامپوزیتی می‌تواند به عنوان جایگزین رویه آلومینیومی استفاده شود. در میان رویه‌های کامپوزیتی بررسی شده در این تحقیق، رویه شبه-همسانگرد دارای عملکرد مطلوب‌تری در این خصوص می‌باشد. کاهش وزن، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش سایر خواص مکانیکی (مقاومت در برابر سایش، خوردگی و ...) نیز از سایر خصوصیات بکارگیری رویه‌های کامپوزیتی در طراحی سازه‌های ساندویچی در بار ضربه است.
- با توجه به وابستگی همزمان پارامترهای مختلف روی عملکرد صفحات ساندویچی در برابر بار ضربه، پیشنهاد می‌شود یافتن حالت بهینه جهت طراحی جاذب با بیشترین مقدار جذب انرژی در آینده مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین بررسی اثر آسیب سطحی، مکانیزم تخریب صفحات ساندویچی بر اثر ضربه و نیز میزان استحکام فشاری پس از ضربه نیز می‌بایستی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.
- 7- مراجع**
- [1] Farahat H. "design and instrumentation of low velocity drop-weight impact testing machine for estimation of energy absorption capacity in aluminum based composite foam," In Persian, Modarres Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 219-228, 2016.
 - [2] Ghajar A.R. "effect of impactor shape and temperature on the behavior of Eglass/epoxy composite laminates," In Persian, Modarres Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2014.
 - [3] Caminero MA, García I, Rodríguez, GP, "Experimental study of the influence of thickness and ply-stacking sequence on the compression after impact strength of carbon fiber reinforced epoxy laminates," Polymer Testing, Vol. 66, pp. 360-370, 2018.
 - [4] Wang H, Ramakrishnan KR, Shankar, K, "Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores," Materials & Design, Vol. 99, pp. 68-82, 2016.
 - [5] Long S, Yao X, Wang H, Zhang X, "Failure analysis and modeling of foam sandwich laminates under impact loading," Composite Structures, Vol. 197, pp. 10-20, 2016.
 - [6] Emre AH, Kadir K, Karakuzu S, Demir M, Aykul H, "Flexural Performance of the Sandwich Structures Having Aluminum Foam Core with Different Thicknesses," World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 596-601, 2015.
 - [7] Liu C, Zhang XY, Ye L, "High velocity impact responses of sandwich panels with metal fiber laminate skins and aluminum foam core," International Journal of Impact Engineering, Vol. 100, pp. 139-153, 2017.
 - [8] Liu C, Zhang YX, Li J "Impact responses of sandwich panels with fiber metal laminate skins and aluminum foam core," Composite Structures, Vol. 182, pp. 183-190, 2017.
 - [9] Crupi V, Kara E, Epasto G, Guglielmino E, Aykul H "Prediction model for the impact response of glass fiber reinforced aluminum foam sandwiches," International Journal of Impact Engineering, Vol. 77, pp. 97-107, 2017.
 - [10] Cheng SL, Zhao XY, Xin YJ, Du SY, Li HJ "Quasi-static localized indentation tests on integrated sandwich panel of aluminum foam and epoxy resin," Composite Structures, Vol. 129, pp. 157-164, 2015.
 - [11] Han MS, Cho JU, "Impact damage behavior of sandwich composite with aluminum foam core," Trans. Nonferrous Met. Soc., Vol. 24, pp. 42-46, 2014.
 - [12] Rajaneesh A, Sridhar I, Rajendran S "Impact modeling of foam cored sandwich plates with ductile or brittle faceplates," Composite Structures, Vol. 94, pp. 1745-1754, 2014.
 - [13] Babaei H., Mirzababaie T., Alitavoli M, "Study on the response of circular thin plate under low velocity impact," Geomechanics and Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 207-218, 2015.
 - [14] Babaei H., Mirzababaie T., Alitavoli M, "Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates," In Persian, Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 361-368, 2015.
 - [15] Jafari s, Rahnema S, "Numerical study of Energy Absorption in Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact," In Persian, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 1, pp. 51-64, 2017.
 - [16] Farahat H, Ahmadi SY, "Studying the Behavior of A356/SiCp Composite Foam under Low-Velocity Impact Loading," In Persian,

Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 2, pp. 129-147, 2017.

- [17] Paknejad R, Ashenai Ghasemi F, Malekzadeh Fard K, "The Effects of Arbitrary Boundary Conditions on a Laminated Composite Plate Response Subjected to Large Mass & Low Velocity Impact," In Persian, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 8, No. 1, pp. 35-49, 2018.
- [18] Torabizadeh MA, Shokrieh MM, Fereidoon A, "Dynamic failure behavior of glass/epoxy composites under low temperature using Charpy impact test method," Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 18, pp. 211-220, 2011.
- [19] Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. Annual Book of ASTM Standard, D7136, 2005.



ارائه یک روش معادل سازی جدید برای مطالعه ارتعاشات آزاد پوسته‌های ساندویچی کامپوزیتی مخروطی با هسته‌های مشبک

مهدی زارعی¹، غلامحسین رحیمی^{2*}، میلاد همت نژاد³

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

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان

* تهران، صندوق پستی 111-14115، rahimi_gh@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، یک مدل تحلیلی به منظور بررسی ارتعاشات آزاد پانل‌های ساندویچی مخروطی با هسته مشبک ارائه می‌شود. از یک روش تحلیلی-تقریبی معادل‌سازی جدید برای محاسبه پارامترهای سفتی معادل تقویت‌کننده‌ها استفاده می‌گردد. در این روش، هسته مشبک با یک پوسته مخروطی کامپوزیتی معادل‌سازی می‌شود. تقویت‌کننده‌ها (هسته) به صورت تیر در نظر گرفته می‌شوند که قابلیت تحمل ممان‌های خمشی علاوه بر بار محوری را دارا می‌باشند. برای این منظور، در ابتدا با استفاده از آنالیز نیرو و ممان بر روی یک سلول واحد، پارامترهای سفتی معادل تقویت‌کننده‌ها تعیین می‌شوند و سپس به منظور دستیابی به سفتی کل سازه، با سفتی‌های پوسته‌ها جمع می‌شوند. با استفاده از روش گالرکین و تئوری کلاسیک دائل، معادلات حاکم بر پوسته ساندویچی استخراج و فرکانس‌های طبیعی ارتعاش به دست می‌آیند. به منظور اعتبار سنجی نتایج، یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی نیز در نرم افزار آباکوس ساخته می‌شود. مقایسه نتایج توافقی خوبی را نشان داد و اثبات کرد که مدل تحلیلی، از دقت کافی برای بررسی ارتعاشات سازه‌های ساندویچی مخروطی با هسته مشبک برخوردار است. نتایج حاضر جدید بوده و می‌تواند به عنوان مبنایی برای مطالعات آتی مورد استفاده قرار گیرد.

دریافت: 1398/11/24

پذیرش: 1399/06/25

کلیدواژگان:

ارتعاشات آزاد

پوسته ساندویچی

روش معادل‌سازی

روش گالرکین

روش اجزای محدود

A novel smeared method for investigating the free vibrations of sandwich conical shells with lattice cores

Mehdi Zarei¹, Gholam Hossein Rahimi^{1*}, Milad Hemmatnezhad²

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

2- Faculty of Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, rahimi_gh@modares.ac.ir

Keywords

Free vibrations
Sandwich conical shell
Smeared method
Galerkin method
FEM

Abstract

In this study, an analytical model was presented for investigating the free vibrations of sandwich conical shells with lattice cores. A novel smeared method was employed to determine the stiffness contribution of the stiffeners. In this approach, the lattice core was approximated with an equivalent composite conical shell. The stiffeners were considered as a beam which support the shear loads and bending moments in addition to the axial loads. For this purpose, the stiffness contribution due to the stiffeners was firstly determined through the forces and moments analysis of a unit cell and then superimposed with those of the inner and outer skins in order to obtain the stiffness parameters of the whole structure. The governing equations were deduced using the classical shell theory of Donnell type and Galerkin method. In order to validate the analytical results, a 3-D finite element model was also created using ABAQUS software. Comparison of the results, revealed good agreements between the two approaches and demonstrated that the proposed analytical model is qualified enough to investigate the free vibrational behavior of sandwich conical shells with lattice cores. Results given are novel and can be used as a benchmark for future studies

1- مقدمه

اغلب تحت بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند و این سبب شده که بررسی رفتار ارتعاشی آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. همچنین، پیدایش مواد کامپوزیتی با کارایی زیاد باعث شده تا پوسته‌های مشبک کامپوزیتی جایگزین مناسبی برای سازه‌های تقویت‌شده با مواد سنتی باشند. سازه‌های تقویت‌شده کامپوزیتی متشکل از پوسته و تقویت‌کننده (به صورت تیر) که می‌تواند در

پوسته‌های مخروطی یکی از مهمترین اجزای تشکیل‌دهنده سازه‌های مورد استفاده در صنایع هوایی، عمران و هوافضا می‌باشند. سبکی وزن و قابلیت تحمل نیروی بالا این امکان را فراهم آورده که این سازه‌ها به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گیرند. پوسته‌های مخروطی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Zarei, M., Hossein Rahimi, G., and Hemmatnezhad, M., "A novel smeared method for investigating the free vibrations of sandwich conical shells with lattice cores", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1163-1170 2021.

کننده‌های متعامد را با استفاده از روش مجزا انجام دادند [12,11]. دانشجو و همکاران ارتعاشات پوسته‌های تقویت‌شده مخروطی دوار را مورد مطالعه قرار دادند و اثر پارامترهای مختلف را بر روی فرکانس بحرانی مورد مطالعه قرار دادند [13]. نادری و همکاران اثر زاویه الیاف را بر روی کمانش پوسته‌های مخروطی بررسی کردند [14]. زارعی و رحیمی ارتعاشات مخروط کامپوزیتی مشبک را مورد مطالعه قرار داده و اثر پارامترهای مهم طراحی را با مطالعه پارامتری بررسی نمودند [15]. با افزودن یک پوسته به پوسته تقویت‌شده به طوری که تقویت‌کننده ها مابین این پوسته قرار گیرند پوسته ساندویچی ایجاد می‌شود که سفتی بیشتری در کمانش و ارتعاشات نسبت به وزن سازه دارد [16]. به همین دلیل روش‌هایی به منظور استخراج سفتی جهت بررسی رفتار کمانشی و ارتعاشی این گونه سازه ها ارائه شده است [17]. در این تحقیق هدف توسعه مدلی تحلیلی به منظور استخراج ماتریس‌های سفتی تقویت‌کننده‌ها و در نتیجه کل سازه جهت تحلیل رفتار ارتعاشی پوسته‌های مخروطی ساندویچی حاوی هسته مشبک می‌باشد. فرمول‌بندی مساله براساس تئوری پوسته دانل و به کمک روش گالرکین³ استخراج شده است. سپس دقت مدل تحلیلی با مقایسه با نتایج عددی نرم‌افزار آباکوس⁴ سنجیده می‌شود. نتایج جدیدی ارائه می‌شود که می‌تواند به عنوان مبنایی جهت مطالعات آینده در نظر گرفته شوند.

2- روش معادل سازی

2-1- آنالیز سطح مشترک پوسته-تقویت‌کننده

شکل ۱ سیستم مختصات قرار گرفته بر روی تقویت‌کننده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، مجموعه پوسته‌ها و تقویت‌کننده برای آنالیز ممان و نیرو در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا فرض می‌شود که سازه تحت خمش خالص قرار می‌گیرد. به منظور به دست آوردن سطح خنثی، بایستی نیروی محوری بر روی سطح تحت خمش خالص برابر صفر باشد. بنابراین با استفاده از روابط زیر سطح خنثی بدست می‌آید

$$\int_A \sigma_1 dA = \int_{A_{f1}} \sigma_{f1} dA + \int_{A_c} \sigma_{st} dA + \int_{A_{f2}} \sigma_{f2} dA = 0$$

$$\int_{(-h_0-t_2)}^{-h_0} E_{f2} \kappa_1 z dz + \int_{-h_0}^{(h_c-h_0)} E_c \kappa_1 z dz + \int_{(h_{st}-h_0)}^{(t_1+h_c-h_0)} E_{f1} \kappa_1 z dz = 0$$

(1)

که در آن l نشان دهنده جهت طولی تقویت‌کننده‌ها و κ_1 نشان‌دهنده انحنا تقویت‌کننده می‌باشد. با ساده‌سازی معادلات بالا، مکان سطح خنثی به صورت زیر به دست می‌آید

$$h_0 = \frac{-E_{f2} t_2^2 + E_c h_c^2 + 2E_{f1} t_1 h_c + E_{f1} t_1^2}{2(E_{f1} t_2 + E_{f2} t_1 + E_c h_c)}$$

(2)

دوطرف پوسته قرار گیرد باعث افزایش چشمگیری در مقاومت و سفتی سازه می‌شود بدون اینکه افزایش قابل توجهی در وزن آن ایجاد کند. سازه‌های مشبک کامپوزیتی به طور همزمان قابلیت‌های سازه‌های کامپوزیتی ساده و سازه‌های مشبک را دارند. آنچه که باعث استفاده گسترده از این نوع سازه‌ها شده نسبت مقاومت به وزن بالا و قابلیت تحمل بار در وزن محدود می‌باشد. سازه‌های ساندویچی با اضافه کردن یک پوسته به سازه تقویت‌شده ایجاد می‌شوند به نحوی که تقویت‌کننده‌ها در بین پوسته‌ها قرار گیرند. با توجه به اهمیت این سازه‌ها و همچنین هزینه بالای تست‌های تجربی، ارائه یک مدل تحلیلی که بتواند رفتار این سازه‌ها را تحت بارگذاری‌های مختلف به ویژه دینامیکی بررسی کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. اکثر تحقیقات انجام شده بر روی رفتار مکانیکی پوسته‌های تقویت‌شده، محدود به تقویت‌کننده‌های متعامد بوده و تحقیقات کمتری به سازه‌های تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های مورب (ریب) اختصاص یافته‌اند. بر همین اساس، کیدانه و همکاران با ارائه یک مدل تحلیلی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مشبک با تقویت‌کننده‌های مورب را به دست آوردند و نتایج حاصل از تحلیل را با نتایج تجربی و عددی مقایسه کردند [۱]. یزدانی و رحیمی بررسی تجربی روی استوانه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده انجام دادند [2]. آنها همچنین تاثیر تعداد ریب و نوع شبکه روی کمانش سازه‌های استوانه‌ای مشبک مورد بررسی قرار دادند [4,3]. رحیمی و همکاران همچنین اثر تغییر سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها را روی کمانش استوانه مشبک انجام دادند [5]. رحیمی و همکاران رفتار ارتعاشی استوانه تقویت‌شده بر مبنای مدل کیدانه را مورد بررسی قرار دادند و برای شرایط تکیه‌گاهی مختلف فرکانس‌های طبیعی ارتعاش سازه به دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که زاویه ریب‌ها در فرکانس‌های بالاتر تاثیر بسزایی بر مشخصه‌های ارتعاشی دارد [6]. همت نژاد و همکاران با توسعه مدل کیدانه و در نظر گرفتن اثرات برشی خارج از صفحه و خمش، ارتعاشات آزاد استوانه تقویت‌شده کامپوزیتی را بر مبنای تئوری تنش برشی مرتبه اول مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فرکانس ارتعاشات سازه تقویت‌شده از سازه تقویت‌نشده در ضخامت‌های پایین پوسته بیشتر است و ضخامت اثر مهمی روی فرکانس طبیعی دارد. این امر به این دلیل است که در ضخامت‌های پایین، اثر افزایش سفتی سازه در اثر وجود ساختار تقویت‌کننده بیشتر است [7]. همت نژاد و همکاران آنالیز تحلیلی، تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده را مورد مطالعه قرار دادند و تغییرات ضخامت و شرایط تکیه‌گاهی مختلف را مورد بررسی قرار دادند [8]. مقایسه نتایج روش تحلیلی با نتایج روش اجزای محدود^۱ و نیز داده‌های به دست آمده از انجام آنالیز مودال تجربی بر روی نمونه‌های ساخته شده به کمک دستگاه پیچش الیاف، حاکی از دقت قابل قبول این مدل بود. قاسمی و همکاران پارامترهای موثر بر رفتار کمانشی پوسته مخروطی مشبک را بر مبنای تئوری تنش برشی مرتبه اول مورد بررسی قرار دادند [9]. زارعی و رحیمی با استفاده از روش حل دقیق به مطالعه ارتعاشات پوسته‌های کامپوزیتی تقویت‌شده دوار با تقویت‌کننده‌های مارپیچی پرداخته و اثر ضخامت پوسته را برای حالات بهینه مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. با اینکه مقالات زیادی در زمینه پوسته‌های استوانه‌ای وجود دارد، مطالعات کمتری به سازه‌های مخروطی پرداخته‌اند و در بیشتر آنها پوسته و ریب‌ها از مواد مدرج تابعی^۲ تشکیل شده و تقویت‌کننده‌ها به صورت طولی و محیطی می‌باشند. طالی توتی و همکاران ارتعاشات آزاد پوسته مخروطی مشبک با تقویت-

3 Galerkin method
4 ABAQUS

1 Finite element method
2 Functionally graded material (FGM)

کننده‌ها در راستای طولی به وسیله رابطه زیر در مختصات مخروطی بیان می شود

$$\kappa_l = \kappa_x c^2 + \kappa_{x\theta} SC + \kappa_\theta \quad (5)$$

حال فرض می شود که سازه ساندویچی تحت نیروی محوری (کششی یا فشاری) قرار گیرد، در این صورت ممان عکس العمل در تقویت‌کننده‌ها با توجه به سطح خنثی به صورت زیر محاسبه می شود

$$M_a = \int_{-h_0}^{h_{st}-h_0} b_h z \sigma_{st} dz = \int_{-h_0}^{h_{st}-h_0} E_{st} b_h \varepsilon_l^0 z dz \quad (6)$$

$$= E_{st} A_{st} \varepsilon_l^0 \left(\frac{h_{st}}{2} - h_0 \right)$$

کل ممان عکس‌العمل مربوط به تقویت‌کننده‌ها برابر است با مجموع ممان‌های ناشی از خمش خالص و نیروی محوری که به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$M = M_a + M_b = E_c I_c \kappa_l + E_c A_c \varepsilon_l^0 \frac{\Delta t}{2} + E_c A_c \kappa_l \frac{\Delta t^2}{4} \quad (7)$$

به همین ترتیب، نیروی عکس‌العمل که ناشی از بارگذاری خمشی و محوری است به صورت زیر قابل محاسبه است

$$F = \int_{-h_0}^{h_c-h_0} b_h \sigma_c dz = \int_{-h_0}^{h_c-h_0} E_c b_h (\varepsilon_l^0 + z \kappa_l) dz = \quad (8)$$

$$E_c A_c \varepsilon_l^0 + E_c A_c \kappa_l \frac{\Delta t}{2}$$

2-2- آنالیز نیرویی و گشتاوری سلول واحد

نیروها و ممان‌های مربوط به هسته در یک سلول واحد مطابق با شکل ۳ نشان داده شده است. نیروها در راستای تقویت‌کننده‌ها و ممان‌های عمود بر تقویت‌کننده‌ها به صورت زیر بدست می‌آیند

$$F_1 = K_1 \varepsilon_l^0(\varphi) + K_2 \kappa_l(\varphi)$$

$$F_2 = K_1 \varepsilon_l^0(-\varphi) + K_2 \kappa_l(-\varphi) \quad (9)$$

$$M_1 = K_2 \varepsilon_l^0(\varphi) + K_3 \kappa_l(\varphi)$$

$$M_2 = K_2 \varepsilon_l^0(-\varphi) + K_3 \kappa_l(-\varphi)$$

که در آن

$$K_1 = E_c A_c$$

$$K_2 = E_c A_c \frac{\Delta t}{2}$$

$$K_3 = E_c I_c + E_c A_c \frac{\Delta t^2}{4}$$

که در آن E_c ، E_{f1} و E_{f2} به ترتیب مدول یانگ مربوط به تقویت‌کننده‌ها، پوسته داخلی و پوسته خارجی می‌باشند.

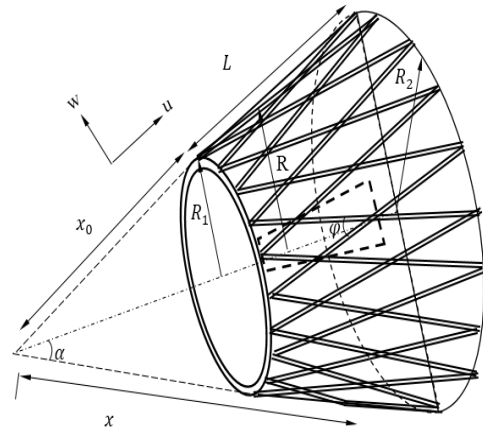


Fig. 1 sandwich conical shell with lattice core

شکل ۱ نمای از پوسته ساندویچی مخروطی با هسته مشبک

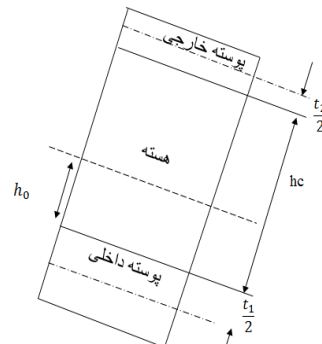


Fig. 2 Interfacing area and neutral surface

شکل 2 سطح مقطع پوسته ساندویچی و موقعیت سطح خنثی

در این تحقیق، فرض می شود که تقویت‌کننده‌ها و پوسته‌ها دارای خواص مکانیکی مشابه می‌باشند. بنابراین رابطه 2 به صورت زیر ساده می‌شود

$$h_0 = \frac{t_1 - t_2 + h_c}{2} = \frac{h_c - \Delta t}{2}, \quad \Delta t = t_2 - t_1 \quad (3)$$

که در آن t_1 و t_2 به ترتیب ضخامت پوسته‌های داخلی و خارجی است. هنگامی که سازه ساندویچی تحت خمش خالص قرار می‌گیرند، عکس‌العمل ممان مربوط به تقویت‌کننده‌ها عبارت است از:

$$M_b = \int_{-\frac{h_c - \Delta t}{2}}^{\frac{h_c + \Delta t}{2}} b_h z \sigma_l dz = \int_{-\frac{h_c - \Delta t}{2}}^{\frac{h_c + \Delta t}{2}} E_c b_h z \kappa_l z dz = \quad (4)$$

$$E_c I_c \kappa_l + E_c A_c \kappa_l \frac{\Delta t^2}{4}$$

که در آن A_c و I_c به ترتیب ارتفاع، پهنا، سطح مقطع و ممان اینرسی مرتبط به تقویت‌کننده‌ها می‌باشند. همچنین انحنای مربوط به تقویت-

$$a(x) = \frac{\pi R(x) \cos \varphi(x)}{N}$$

$$b(x) = \frac{a(x)}{\tan \varphi(x)}$$

همانطور که مشاهده می شود، رابطه ۱۲ با در نظر گرفتن شرایط خاص (پوسته داخلی با ضخامت صفر و کرنش یکنواخت در راستای عمق تقویت-کننده که معادل ممان اینرسی صفر است) به مدل کیدانه [۱] برای سفتی تقویت‌کننده‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، نیروها و ممان‌های منتجه برای پوسته‌های داخلی و خارجی بر حسب کرنش‌های مربوط به سطح خنثی به صورت زیر بیان می‌شوند

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ N_{x\theta} \\ M_x \\ M_\theta \\ M_{x\theta} \end{Bmatrix}^{f1,f2} = \begin{bmatrix} A_{11}A_{12} & 0 & B_{11}B_{12} & 0 \\ A_{12}A_{22} & 0 & B_{12}B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 \\ B_{11}B_{12} & 0 & D_{11}D_{12} & 0 \\ B_{12}B_{22} & 0 & D_{12}D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 \end{bmatrix}^{f1,f2} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{\theta\theta}^0 \\ \varepsilon_{x\theta}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{x\theta} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

که در آن سفتی‌های کششی، خمش-کشش و خمشی پوسته‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij})^{f1,f2} = \sum_{k=1}^n \int_{t^{k-1}}^{t^k} \bar{Q}_{ij}^{f1,f2}(1, z, z^2) dz, \quad (14)$$

$$k = 1, 2, \dots \quad i, j = 1, 2, 6$$

با توجه به اینکه نیروها و ممان‌های منتجه بر حسب کرنش‌های سطح خنثی محاسبه می‌شوند، می‌توانند به صورت مستقیم با هم جمع شوند. با استفاده از

جمع آثار این امر طبق رابطه زیر میسر می‌شود

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N^{f1} + N^c + N^{f2} \\ M^{f1} + M^c + M^{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (15)$$

که در آن N^{f1}, N^{f2}, N^c و به ترتیب نشان‌دهنده نیروهای منتجه ناشی از پوسته داخلی، خارجی و هسته مشبک می‌باشند. در نهایت، ماتریس‌های سفتی کل سازه به صورت زیر به دست می‌آیند

$$[A(x)] = [A(x)]^c + [A]^{f1} + [A]^{f2}$$

$$[B(x)] = [B(x)]^c + [B]^{f1} + [B]^{f2} \quad (16)$$

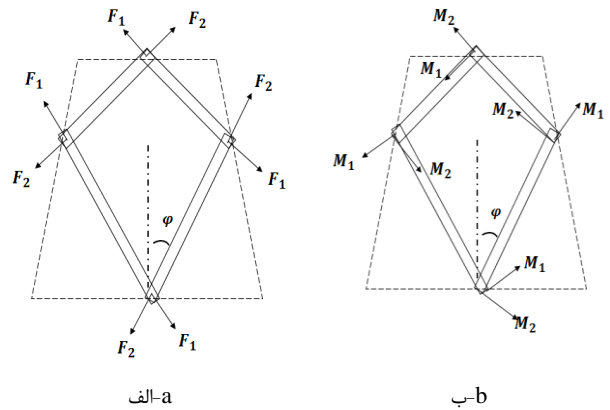


Fig. 3 Force (a) and moment (b) diagrams of a unit cell
شکل 3 دیاگرام (الف) نیروها و (ب) گشتاورهای یک سلول واحد از ساختار تقویت‌کننده

با جمع برداری نیروها و ممان‌ها بر روی یکی از اضلاع سلول واحد و در راستای مختصات مخروطی، خواهیم داشت

$$\begin{aligned} F_x &= F_1 \cos(\varphi) + F_2 \cos(\varphi) \\ F_\theta &= F_1 \sin(\varphi) + F_2 \sin(\varphi) \\ M_x &= M_1 \cos(\varphi) + M_2 \cos(\varphi) \\ M_\theta &= M_1 \sin(\varphi) + M_2 \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

نیروها و ممان‌های برشی با جمع نیرو و ممان در راستای یکی از اضلاع به دست می‌آیند

$$\begin{aligned} F_{x\theta} &= F_1 \sin(\varphi) - F_2 \cos(\varphi) \\ M_{x\theta} &= M_1 \sin(\varphi) - M_2 \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

با تقسیم نیروها و ممان‌های به دست آمده بر طول‌های مربوطه، نیروها و ممان‌های منتجه به دست می‌آیند که در قالب ماتریسی به شکل زیر است

$$\begin{bmatrix} N_x^c \\ N_\theta^c \\ N_{x\theta}^c \\ M_x^c \\ M_\theta^c \\ M_{x\theta}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]^c & [B]^c \\ [B]^c & [D]^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{x\theta} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

که در آن

$$[A(x)]^c = 2E_c A_c \begin{bmatrix} \frac{c^3}{a(x)} & \frac{cs^2}{a(x)} & 0 \\ \frac{sc^2}{b(x)} & \frac{s^3}{b(x)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{sc^2}{b(x)} \end{bmatrix}$$

$$[B]^c = E_c A_c \begin{bmatrix} \frac{c^3 \Delta t}{a(x)} & \frac{sc^2 \Delta t}{a(x)} & 0 \\ \frac{sc^2 \Delta t}{b(x)} & \frac{cs^2 \Delta t}{b(x)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t sc^2}{b(x)} \end{bmatrix}$$

$$[D]^c = E_c A_c \begin{bmatrix} \left[\frac{c^3 \Delta t^2}{2} + \frac{2l_c}{A_c} c^3 \right] & \left[\frac{sc^2 \Delta t^2}{2} + \frac{2l_c}{A_c} sc^2 \right] & 0 \\ \frac{a(x)}{sc^2 \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{2l_c}{A_c} sc^2} & \frac{a(x)}{s^3 \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{2l_c}{A_c} s^3} & 0 \\ \frac{b(x)}{0} & \frac{b(x)}{0} & \left[\frac{sc^2 \Delta t^2}{2} + \frac{2l_c}{A_c} sc^2 \right] \end{bmatrix}$$

$$\psi(x) = \alpha_1 \cosh\left(\frac{\lambda_m(x-x_0)}{L}\right) + \alpha_2 \cosh\left(\frac{\lambda_m(x-x_0)}{L}\right) - \xi_m \left(\alpha_3 \sinh\left(\frac{\lambda_m(x-x_0)}{L}\right) + \alpha_4 \sin\left(\frac{\lambda_m(x-x_0)}{L}\right) \right) \quad (22)$$

که ثابت های α_i ، λ_i و ξ_i با توجه به نوع شرایط مرزی در جدول 1 لیست شده اند.

جدول 1 پارامترهای تابع تیر برای شرایط مرزی مختلف

Table 1 Beam function constants for different boundary conditions

α_i	λ_m	ξ_m	شرط مرزی
$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$ $\alpha_3 = 0, \alpha_4 = -1$	$m\pi$	1	ساده-ساده
$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = -1$ $\alpha_3 = 1, \alpha_4 = -1$	$(m+1/2)\pi$	$\frac{\cosh\lambda_m - \cos\lambda_m}{\sinh\lambda_m - \sin\lambda_m}$	گیردار-گیردار

شرایط مرزی هندسی بر حسب تابع تیر به صورت زیر نوشته می شوند

$$\begin{aligned} \text{تکیه گاه ساده} & \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \psi = 0 \\ \text{تکیه گاه گیردار} & \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = \psi = 0 \\ \text{تکیه گاه آزاد} & \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

برای سادگی در انتگرال گیری، طرفین معادله 20 در R^i ضرب می شوند. سپس، روش گالرکین به منظور استخراج معادلات حاکم به صورت زیر استفاده می شود

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_0+L} \int_0^{2\pi} R^2 \Gamma_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} \sin(n\theta + \omega t) \, dx d\theta &= 0 \\ \int_{x_0}^{x_0+L} \int_0^{2\pi} R^2 \Gamma_2 \psi \cos(n\theta + \omega t) \, dx d\theta &= 0 \\ \int_{x_0}^{x_0+L} \int_0^{2\pi} R^3 \Gamma_3 \psi \sin(n\theta + \omega t) \, dx d\theta &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

با جایگذاری معادله 21 در 20 و سپس در 24، دستگاه معادلات همگن زیر حاصل می شود

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \\ C_m \end{bmatrix} = 0 \quad (25)$$

برای رسیدن به یک حل غیر صفر لازم است دترمینان ماتریس ضرایب فوق برابر صفر شود. با انجام این کار به یک چند جمله ای مرتبه 6 و توان های زوج می رسیم که دارای 3 مقدار ویژه است

$$C_0 \omega^6 + C_1 \omega^4 + C_2 \omega^2 + C_3 = 0 \quad (26)$$

کوچکترین ریشه معادله مشخصه فوق به عنوان فرکانس طبیعی سازه ساندویچی در نظر گرفته می شود.

$$[D(x)] = [D(x)]^c + [D]^f + [D]^f$$

3-2- ارتعاشات پوسته مخروطی ساندویچی

شکل 1 نمایی از مخروط ساندویچی با شعاع کوچک R_1 ، شعاع بزرگ R_2 ، طول L و زاویه نیم راس α را نشان می دهد. u, v و w به ترتیب مولفه های جابجایی در راستاهای x, θ و Z می باشند. روابط کرنش-جابجایی بر مبنای تئوری پوسته دائل و با فرض تغییر شکل های کوچک به صورت زیر است

$$\begin{aligned} \epsilon_x^0 &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_\theta^0 &= \frac{u \sin \alpha + w \cos \alpha}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} \\ \gamma_{x\theta}^0 &= \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v \sin \alpha}{R} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \kappa_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \kappa_\theta &= -\frac{\sin \alpha}{R} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \\ \kappa_{x\theta} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

معادلات حرکت برای یک پوسته مخروطی ناقص به صورت زیر است

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial N_{x\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{R(x)} (N_x - N_\theta) &= I_1 \ddot{u} \\ \frac{\partial N_{x\theta}}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{2 \sin \alpha}{R(x)} N_{x\theta} + \frac{\cos \alpha}{R(x)} Q_\theta &= I_1 \ddot{v} \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{R(x)} Q_x - \frac{\cos \alpha}{R(x)} N_\theta &= I_1 \ddot{w} \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن

$$I_1 = \int_{-t1/2}^{t1/2} \rho_{f1} dz + \int_{-t2/2}^{t2/2} \rho_{f2} dz + \rho_{st} \frac{2A_{st}}{a(x)} \quad (19)$$

با جایگذاری معادلات 16 و 17 در معادلات 18، معادلات حرکت بر

حسب جابجایی ها و مشتقات آنها به صورت زیر بدست می آید

$$\begin{aligned} L_{11}u + L_{12}v + L_{13}w - I_1 \ddot{u} &= \Gamma_1 = 0 \\ L_{21}u + L_{22}v + L_{23}w - I_1 \ddot{v} &= \Gamma_2 = 0 \\ L_{31}u + L_{32}v + L_{33}w - I_1 \ddot{w} &= \Gamma_3 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

برای یک پوسته مخروطی، میدان جابجایی به صورت زیر در نظر گرفته

می شوند

$$\begin{aligned} u &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_m \frac{\partial \psi_m(x)}{\partial x} \sin(n\theta + \omega t) \\ v &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_m \psi_m(x) \cos(n\theta + \omega t) \\ w &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_m \psi_m(x) \sin(n\theta + \omega t) \end{aligned} \quad (21)$$

که در آن A_m, B_m و C_m دامنه های ارتعاش و m و n به ترتیب نیم موج های طولی و محیطی و ω فرکانس طبیعی می باشد. همچنین، $\psi(x)$ تابع تیر است که شرایط مرزی را ارضا کرده و به صورت زیر بیان می شود

4- آنالیز اجزای محدود

یک مدل سه بعدی از پوسته ساندویچی با هسته مشبک با استفاده از نرم افزار آباکوس نسخه 6.14 ساخته شد (شکل 4) که در آن ساختار تقویت کننده متشکل از 24 ریب می باشد که بر مبنای مسیر ژئودزیک تحت زاویه های 40 و 40- درجه نسبت به راستای طولی قرار گرفته اند. تقویت کننده ها با استفاده از قید tie به پوسته ها مقید شدند و بنابراین تقویت کننده و پوسته ها به صورت یک سازه یکپارچه مدل می شوند. از المان S8R برای پوسته ها و المان C3D20R برای مش بندی تقویت کننده ها استفاده شد. همگرایی مش نشان داد که 12000 المان برای هر یک از پوسته ها و حدود 760 المان برای هر یک از تقویت کننده ها، دقت لازم را فراهم می کند. پوسته ها به صورت 4 لایه $[+30, -30]$ مدل گردیدند که هر لایه دارای ضخامت 0.4 میلی متر می باشد. تکیه گاه گیردار برای این آنالیز در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی و مکانیکی پوسته و تقویت کننده ها در جداول 2 و 3 داده شده اند.

جدول 2 خواص مکانیکی پوسته و تقویت کننده ها

Table 2 Material properties of the skin and lattice core

مقدار	خواص مکانیکی
5.525	مدول کششی (GPa) E_{33}, E_{22}, E_{11}
1.8, 1.8, 0.76	مدول برشی (GPa) G_{12}, G_{13}, G_{23}
0.28, 0.28, 0.076	نسبت پواسون $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$
1420	چگالی (Kg/m^3) ρ

جدول 3 مشخصات هندسی پوسته مخروطی و تقویت کننده ها

Table 3 Geometrical properties for the skins and core

100	طول مخروط (mm)
100	شعاع کوچک (mm)
30	زاویه راس ($^\circ$)
1.6	ضخامت پوسته داخلی (mm)
1.6	ضخامت پوسته خارجی (mm)
40	زاویه تقویت کننده
4×4	مقطع تقویت کننده (mm^2)
24	تعداد تقویت کننده

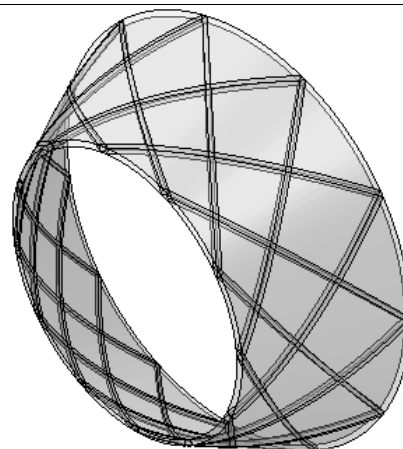


Fig. 4 3-D model built in ABAQUS 6.14 software

شکل 4 مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار آباکوس

5- نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل تحلیلی، چندین مقایسه صورت گرفته که در ادامه به آن ها اشاره می شود. در ابتدا فرض می شود که ضخامت پوسته داخلی صفر باشد بنابراین مسئله به یک مخروط مشبک ساده می شود. برای این منظور، یک مقایسه بین نتایج این مقاله و مرجع [13] انجام شده که در شکل 5 آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود توافق خوبی بین دو حل وجود دارد. جدول 4 مقایسه ای را بین نتایج حاصل از روش تحلیلی و آنالیز اجزای محدود برای 6 فرکانس طبیعی نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود خطای کمی بین دو روش حل موجود است. از طرفی مشاهده می شود که با افزایش عدد نیم موج محیطی خطای بین دو روش حل افزایش می یابد. این بدان دلیل است که در عده های موج بالا به دلیل تغییر شکل های بیشتر اثر تقویت کننده ها بر روی فرکانس طبیعی بیشتر شده و به دلیل فرضیات ساده سازی که در نظر گرفته شده این خطا بیشتر می شود. شکل 6 شکل مودهای ارتعاشی مربوط به این فرکانس ها را نشان می دهد. ممکن است در حین فرآیند ساخت پوسته های داخلی و خارجی، خطاهایی مانند ضخامت های غیر یکسان روی دهد. اثر این خطاها برای حالت متقارن محوری ($n=0$) در جدول 5 آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و عددی وجود دارد. همچنین فرکانس طبیعی در حالتی که ضخامت پوسته داخلی بیشتری دارد، بزرگتر است. در نهایت اثر لایه چینی های مختلف پوسته های درونی و بیرونی بر روی فرکانس طبیعی در حالت تقارن محوری در جدول 6 بررسی شده است. مقایسه ها نشان می دهد که مدل تحلیلی حاضر قادر است بدون صرف هزینه های تولید در روش تجربی و محاسبات در روش عددی، فرکانس های طبیعی ارتعاش سازه ساندویچی با هسته مشبک را با دقت خوبی پیش بینی کند.

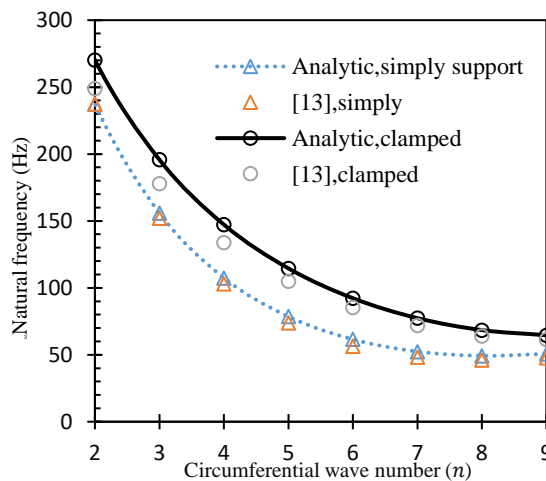


Fig. 5 comparison of the natural frequencies for grid-stiffened conical shell

شکل 5 مقایسه فرکانس طبیعی برای سازه مخروط مشبک

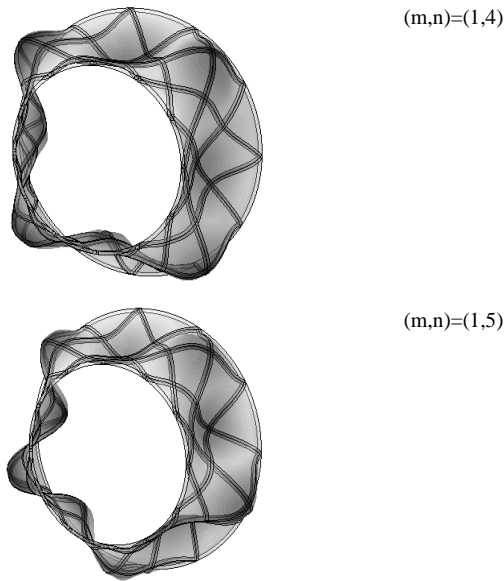


Fig. 6 Mode shapes of the sandwich conical shell under clamped-clamped end conditions

شکل 6 شکل مودهای ارتعاشی پوسته ساندویچی مخروطی با شرایط مرزی دو سر گیردار

جدول 5 مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از آنالیز تحلیلی و اجزای محدود یک مخروط ساندویچی برای ضخامت‌های متفاوت پوسته‌ها

Table 5 Comparison of the results obtained by CLT and FEM for different skin thicknesses

خطا (%)	FEM	CLT	t_2 (mm)	t_1 (mm)
2.59	2575	2510	1.8	1.6
2.62	2583	2517	1.6	1.8
2.73	2600	2531	1.6	2
2.50	2581	2518	2	1.6
2.51	2617	2553	2	2.2
2.52	2611	2547	2.2	2
2.43	2618	2556	2.4	2
2.38	2629	2568	2	2.4

جدول 6 مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از آنالیز تحلیلی و اجزای محدود یک مخروط ساندویچی برای لایه‌چینی‌های مختلف پوسته‌ها

Table 6 Comparison of the results obtained by CLT and FEM for various lamination angles

خطا (%)	FEM	CLT	لایه‌چینی	
			پوسته بیرونی	پوسته درونی
0.48	2931	2917	[30/-30/30/-30]	[0/90/0/90]
1.29	2521	2554	[0/30/0/30]	[0/30/0/30]
0.07	2912	2910	[0/30/0/30]	[0/90/0/90]
2.52	2927	2855	[0/60/0/60]	[0/60/0/60]
4.25	3364	3227	[0/90/0/90]	[0/90/0/90]
2.39	2492	2553	[30/-30/30/-30]	[30/-30/30/-30]

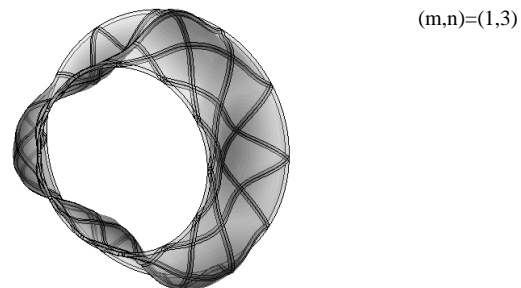
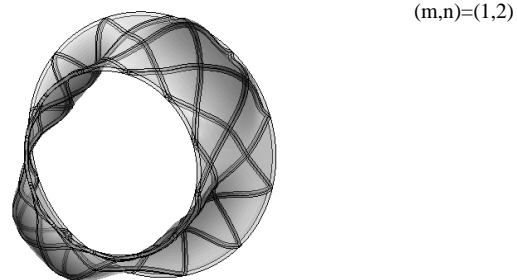
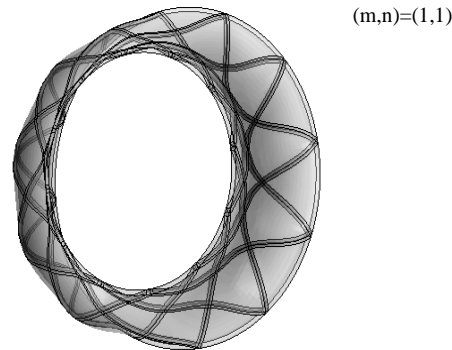
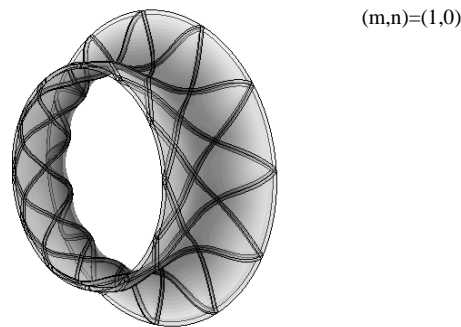
6- نتیجه گیری

در این تحقیق ارتعاشات آزاد پوسته‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، یک مدل تحلیلی جدید به منظور محاسبه پارامترهای سفتی تقویت‌کننده‌ها ارائه شد که با اضافه کردن آنها به سفتی‌های پوسته، سفتی معادل کل سازه ساندویچی مورد بررسی به دست آمد.

جدول 4 مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های عددی و تحلیلی بر مبنای تئوری کلاسیک پوسته برای شماره مودهای ارتعاشی مختلف

Table 4 Comparison of the results obtained by CLT and FEM for different mode numbers

خطا (%)	FEM	CLT	(m,n)
0.52	2492	2505	(1,0)
0.33	2434	2442	(1,1)
0.04	2280	2279	(1,2)
2.80	2132	2074	(1,3)
8.41	2036	1878	(1,4)
11.54	1924	1725	(1,5)



- Composite Structures, Vol. 16, No. 4, pp. 375-387, 2014.
- [15] Zarei, M. and Rahimi, G.H., "Free Vibration Analysis of Grid Stiffened Composite Conical Shells", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 1-8, 2017.
- [16] Zhang, H. Sun, F. Fan, H. Chen, H. Chen, L. and Fang, D., "Free vibration behaviors of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich cylinder", Composites science and technology, Vol. 100, pp. 26-33, 2014.
- [17] Sun, F. Fan, H. Zhou, C. and Fang, D., "Equivalent analysis and failure prediction of quasi-isotropic composite sandwich cylinder with lattice core under uniaxial compression", Composite Structures, Vol. 101, pp. 180-190, 2013.

برخلاف روش‌های معادل‌سازی که در اکثر مطالعات قبلی به کار رفته و در آنها هسته مشبک به صورت یک لایه پوسته ایزوتروپیک معادل می‌شود، در این روش معادل‌سازی هسته میانی به صورت یک لایه کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی نتایج، از مدل سه بعدی در نرم افزار آباکوس بهره برده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که روش تحلیلی می‌تواند با دقت خوبی فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات را پیش‌بینی کند. تفاوت‌ها در برخی از موارد بیشتر به خاطر فرضیات ساده‌سازی که در مدل تحلیلی (مانند صرفنظر کردن از اثرات پیچشی و برشی) و همچنین خطاهایی است که در جریان ساخت مدل اجزای محدود ممکن است رخ داده باشد. نتایج حاضر جدید بوده و می‌تواند به عنوان مبنایی برای مطالعات آتی مورد استفاده قرار گیرد.

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, Vol. 34, pp. 1-9, 2003.
- [2] Yazdani, M. Rahimi, G.H. Afaghi Khatibi, A. and Hamzeh, S., "An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading", Scientific Research and Essays, Vol. 4, No. 9, pp. 914-920, 2009.
- [3] Yazdani, M. and Rahimi, G.H., "The effects of helical ribs' number and grid types on the buckling of thin-walled GFRP-stiffened shells under axial loading", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 29, No. 17, pp. 2568-2575, 2010.
- [4] Yazdani, M. and Rahimi, G.H., "The behavior of GFRP-stiffened and -unstiffened shells under cyclic axial loading and unloading", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, No. 5, pp. 440-445, 2011.
- [5] Rahimi, G.H. Zandi, M. and Rasouli, S.F., "Analysis of the effect of stiffener profile on the buckling strength in composite isogrid stiffened shell under axial loading", Aerospace Science and Technology, Vol. 24, pp. 198-203, 2013.
- [6] Rahimi, G.H. Hemmatnezhad, M. and Ansari, R., "Prediction of Vibrational Behavior of Grid-Stiffened Cylindrical Shells", Advances in Acoustics and Vibration, Vol. 2014, Article ID 242573, 10 pages.
- [7] Hemmatnezhad, M. Rahimi, G.H. and Ansari, R., "On the free vibrations of grid-stiffened composite cylindrical shells", Acta Mechanica, Vol. 225, pp. 609-623, 2014.
- [8] Hemmatnezhad, M. Rahimi, G.H. Tajik, M. and Pellicano, F., "Experimental, numerical and analytical investigation of free vibrational behavior of GFRP-stiffened composite cylindrical shells", Composite Structures, Vol. 120, pp. 509-518, 2015.
- [9] Ghasemi, M.A. Yazdani, M. and Hoseini, S.M., "Analysis of effective parameters on the buckling of grid stiffened composite shells based on first order shear deformation theory", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 10, pp. 51-61, 2013.
- [10] Zarei, M. and Rahimi, G.H., "Free vibration analysis of rotating grid stiffened composite cylindrical shells", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 9, pp. 175-185, 2016.
- [11] Talebitooti, M. Ghayour, M. Ziaei-Rad, S. and Talebitooti, R., "Free vibrations of rotating composite conical shells with stringer and ring stiffeners", Archive of Applied Mechanics, Vol. 80, pp. 201-215, 2010.
- [12] Talebitooti, M. Daneshjou, K. and Talebitooti, R., "Vibration and Critical Speed of Orthogonally Stiffened Rotating FG Cylindrical Shell Under Thermo-Mechanical Loads Using Differential Quadrature Method", Journal of Thermal Stresses, Vol. 36, pp. 160-188, 2013.
- [13] Daneshjou, K. Talebitooti, M. Talebitooti, R. and Saeidi Googarchin, H., "Dynamic analysis and critical speed of rotating laminated conical shells with orthogonal stiffeners using generalized differential quadrature method", Latin American Journal of Solids and Structure, Vol. 10, pp. 349-390, 2013.
- [14] Naderi, A.A. Rahimi, G.H. and Arefi, M., "Influence of fiber paths on buckling load of tailored conical shells", Steel and



بررسی تجربی کیفیت سطح در صفحات آلومینیوم ترک خورده تقویت شده با وصله کامپوزیتی تحت بارگذاری خستگی

مهدی نجف پور ملاباشی¹، مجید صفرآبادی^{2*}، مجتبی حقیقی یزدی³

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، شهر، صندوق پستی 14155-6619، msafarabadi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

برای جلوگیری صدمات ناشی از خستگی در تجهیزات و سازه‌های ترک‌خورده، ترمیم به عنوان راهکاری مناسب شناخته شده است. از بهترین روش‌ها برای ترمیم قطعات ترک خورده، استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری و اتصال با استفاده از چسب می‌باشد. در این مقاله به بررسی اثر کیفیت سطح در عمر خستگی قطعات ترمیم شده با وصله کامپوزیتی پرداخته می‌شود. صفحه ترک خورده از آلومینیوم 1050 با ترک لبه‌ای می‌باشد و ترمیم مورد استفاده به صورت یک طرفه بوده است. از لیاف شیشه‌حصیری شکل به عنوان وصله و از چسب آرالدیت برای اتصال وصله به قطعه ترک خورده استفاده شده است. نتایج آزمایش تجربی نشان می‌دهد که ایجاد زبری کم با استفاده از کاغذ سنباده 600 می‌تواند باعث افزایش عمر 7٪ در قطعات ترمیمی شود. اما با افزایش مقدار زبری از این مقدار، عمر قطعات از حالت پایه (حالت زبر نشده) کمتر می‌گردد؛ تا جایی که قطعات زبر شده با کاغذ سنباده 40 منجر به کاهش عمر در حدود 25٪ می‌گردد.

دریافت: 1398/12/05

پذیرش: 1399/11/10

کلیدواژگان:

وصله کامپوزیتی، رشد ترک خستگی، زبری، اتصال چسبی، فاکتور شدت تنش

Experimental investigation of surface finishing in cracked aluminum plates reinforced by composite patch under fatigue loading

Mahdi Najafpour Mollabashi, Majid Safarabadi*, Mojtaba Haghighi Yazdi

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

* P.O.B. 14155-6619, Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

Keywords

Composite patch,
Fatigue crack propagation,
Roughness,
Cohesive joint,
Stress intensity factor

Abstract

To prevent fatigue damages in cracked equipment and structures, the repair is known as a proper method. One of the best practices for repairing cracked plates is using polymer composites with adhesive bonding joints. In this paper, the effects of surface finishing on fatigue life of repaired plates with the composite patch were investigated. The single edge cracked plate was made of aluminum 1050 and the repair was applied for one side of the plate. The woven fiberglass was used as a patch and it was jointed to the cracked plate by Araldite adhesive. In this case, the roughened surface by sandpaper No.40 increased the plate properties by 55%. Also, the experimental results revealed that making low roughness on the cracked plate using sandpaper No.600 increases the life cycles by 7%. However, a higher value of roughness reduced the life cycles of repaired plates compared to the base case (plates without roughness) up to 25%

1- مقدمه

اقتصادی مقرون به صرفه بوده و هم باعث کاهش زمان راه اندازی دوباره سیستم می‌شود. برای ترمیم ترک و جلوگیری از رشد ترک روش‌های متنوعی وجود دارد که استفاده از وصله‌های کامپوزیتی با اتصال چسبی از بهترین این روش‌ها محسوب می‌شود. معیار انتخاب چسب به عوامل متعددی وابسته است. اتصالات چسبی در مقایسه با روش‌های اتصال دیگر از جمله بیچ، پرچ و جوش دارای مزایا و ویژگی‌های خاصی است. به همین دلیل، در مواقعی استفاده از چسب به عنوان روش مؤثر اتصال، مطلوب‌تر می‌گردد. نوعی از اتصالات سازه‌های با وزن کم که ترکیب موادی مانند کامپوزیت‌ها و استیل

با رسیدن قطعات تجهیزات و سازه‌ها به اتمام عمر کاری خود، در اطراف سوراخ‌های بیچ و پرچ‌ها و مناطقی که با تمرکز تنش بالا، ترک‌های ناشی از خستگی ایجاد شده و رشد پیدا می‌کنند [1]. برای ادامه کارکرد این ادوات دو روش به کار برده می‌شود: الف) جایگزینی قطعه ترک خورده و ب) ترمیم قطعه. جایگزینی قطعه می‌تواند هزینه‌بر باشد و یا یافتن این قطعه به دلیل قدیمی بودن آن امکان‌پذیر نباشد. در ضمن ممکن است فقط بخش کوچکی از قطعه معیوب شده باشد، که در این صورت گزینه ترمیم هم از لحاظ

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Najafpour Mollabashi, M., Safarabadi, M., Haghighi Yazdi, M., "Experimental investigation of surface finishing in cracked aluminum plates reinforced by composite patch under fatigue loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1171-1176, 2021.

هریک از این وصله‌ها، نمودارهای فاکتور شدت تنش بر اساس طول ترک را به دست آورده‌اند. آن‌ها شکل جدیدی از این وصله‌ها را به نام وصله‌های اریب³ نیز تحلیل کرده و این شکل از وصله‌ها را به‌عنوان بهترین نوع وصله معرفی کرده‌اند. بهترین نوع وصله، گونه‌ای است که فاکتور شدت تنش⁴ پائین‌تر باشد. بعد از وصله‌های اریب نیز بهترین نوع وصله‌ها به ترتیب اشکال مستطیلی، بیضی، دایروی و مربعی می‌باشند. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بین طول و ضخامت وصله، ضخامت وصله تأثیر بیشتری بر کاهش فاکتور شدت تنش دارد. بشیر و همکاران [10]، در راستای بهینه‌سازی شکل وصله‌ها، به بررسی دو شکل مستطیلی و دوزنقه‌ای پرداخته‌اند. آن‌ها با انجام شبیه‌سازی‌های 3 بعدی با استفاده از روش اجزا محدود به این نتیجه رسیده‌اند که به ازای طول ترک‌های کوتاه (5 mm - 20)، وصله دوزنقه‌ای عملکرد بهتری نسبت به وصله‌های مستطیلی داشته و قطعات ترمیم شده، فاکتور شدت تنش پایین‌تری در نوک ترک تحمل می‌کنند. اما با بلندتر شدن طول ترک از کارایی وصله‌های دوزنقه‌ای کاسته شده و وصله مستطیلی عملکرد بهتری خواهد داشت. فکیه و همکاران [11]، برای پیدا کردن مناسب‌ترین اندازه وصله مستطیلی شکل (طول، عرض و ضخامت) پژوهشی عددی انجام داده‌اند. آن‌ها با استفاده از روش اجزا محدود 3 بعدی نمودارهایی بر اساس طول، عرض و ضخامت وصله بر اساس فاکتور شدت تنش بدست آوردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد وصله فاکتور شدت تنش کاهش خواهد یافت. وو و همکاران [12] روی صفحه استیل با ترک مرکزی مطالعه نموده که با استفاده از الیاف کربنی ترمیم شده است. در این مطالعه، صفحه لیاف کربنی با مدول 460 GPa برای افزایش استحکام استفاده شده است. آن‌ها از پنج نوع مختلف وصله با تغییر در اندازه، ضخامت و اتصال یک قطعه دوطرفه استفاده کردند. قطعات تحت بارگذاری خستگی با فرکانس 20 Hz و نسبت تنش 0.1 و تنش ماکزیمم 150 MPa استفاده شده است. نتایج نشان داد که عمر خستگی تا 8 برابر بهبود پیدا کرد. رحمانی و همکاران [13]، به بررسی عددی و تجربی ترمیم قطعات ترک خورده با استفاده از کامپوزیت‌های FML⁵ پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش اجزا محدود 3 بعدی ضریب شدت تنش در نوک ترک را محاسبه و به این نتیجه رسیدند که در صورت استفاده از این وصله‌ها، عمر قطعه با توجه به نوع لایه‌چینی 2-6 برابر افزایش می‌یابد. یو و همکاران [14] به بررسی تأثیر وصله کربنی در مراحل مختلف رشد ترک پرداخت. او یک مطالعه عددی روی صفحه استیل تقویت شده با الیاف کربنی با استفاده از روش اجزا مرزی⁶ انجام داده است. نتایج این مطالعه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و نشان داده شده است که می‌توان از روش اجزا مرزی در بررسی رشد ترک خستگی استفاده کرد. در این تحلیل اندازه وصله، ضخامت وصله، مدول وصله و مدول برشی چسب روی فاکتور شدت تنش تأثیرگذار بوده است. مشاهده شده است که مدل عددی نتایج مشابهی به مدل آزمایشگاهی داشته است. شیویا و همکاران [15] به بررسی رشد ترک صفحات آلومینیومی با وصله کامپوزیتی و محاسبه تأثیر ترمیم انجام شده است. ایشان با استفاده از روش اجزا محدود و با استفاده از صفحه میندلین انجام گرفته است که مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشت. چانگ و همکاران [16] به بررسی رشد ترک در آلومینیوم 6061 با ترمیم یک طرفه پرداختند. آنها از چهار طول مختلف وصله در آزمایش خود استفاده کردند. نتیجه حاصله از آزمایشات آنها از این قرار بود

هستند، قابل اتصال به روش جوشکاری نمی‌باشند. البته ممکن است دلایل دیگری مانند اجتناب از ایجاد گرما و یا خطر آتش‌سوزی دلیل انتخاب چسب به عنوان اتصال مناسب باشد. در اتصالات چسبی کامپوزیتی، توزیع تنش یکنواخت‌تر خواهد بود؛ زیرا که بار روی محدوده وسیع‌تری نسبت به اتصالات مکانیکی توزیع می‌شود. در این روش نیاز به هیچ سوراخی نیست، ولی در عوض به آماده‌سازی سطح همچون تمیز کردن، عملیات پرداخت و غیره نیاز است.

در یکی از اولین مطالعات تجربی انجام شده در این زمینه، چوئی و همکاران [2] پژوهشی در مورد تأثیر لایه‌چینی وصله‌های کامپوزیت در ترمیم قطعات آسیب دیده انجام دادند. در این مطالعه، بارگذاری قطعات به صورت دو محوره در نظر گرفته شده و تحلیل در محدوده الاستیک انجام گرفته است. نتایج تحقیقات این محققین نشان داد که توزیع انرژی کرنشی در مجاورت رأس ترک، تقریباً مستقل از نوع لایه‌چینی است. دنی [3] تلاش نمود تأثیر اندازه و موقعیت ناحیه جدا شده را روی کاهش عمر پنل ترمیم شده بدست بیاورد. او آزمایشات خود را روی پنل‌های آلومینیومی نازک با ضخامت 1 mm که به وسیله وصله‌هایی از جنس بور/اپوکسی¹ ترمیم شده بودند، به انجام رسانید. مطالعات او نیز نشان داد که وقتی ناحیه جدایش افزایش می‌یابد، از عمر پنل ترمیم شده کاسته خواهد شد؛ با این تفاوت که کاهش عمر در برابر افزایش عمر ناشی از ترمیم بسیار ناچیز است. توکلی‌زاده و سعادت‌مند [4] به بررسی تأثیر نوارهای پلیمری تقویت شده با الیاف کربن² در کاهش تنش در تیر آهن فولادی و افزایش تعداد چرخه رشد ترک برداشتند. در این پژوهش گزارش شده است که عمر خستگی 34 نمونه با نوارهای الیاف کربن، 3.4-2.6 برابر حالت قبل از ترمیم بوده است. خلیلی و همکاران [5] به بررسی اثر ضربه روی آلومینیوم ترک خورده ترمیم شده و ترمیم نشده پرداخته‌اند. وصله‌های ترمیم‌کننده از دو جنس شیشه و کربن انتخاب شده و ضخامت آن‌ها به صورت 3 لایه و 5 لایه بوده است. آن‌ها با انجام آزمایشات تجربی به این نتیجه رسیدند که وصله‌های کربنی عملکرد بهتری نسبت به وصله‌های شیشه‌ای دارند. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که میزان انرژی جذب شده در قطعات ترمیم شده با وصله‌های 3 لایه و 5 لایه تفاوت چندانی با هم ندارند. بشیر و همکاران [6]، به بررسی و مقایسه انواع وصله‌های کامپوزیتی نو، کهنه کربنی و آلومینیومی پرداختند. در مطالعه انجام شده از هر دو روش تجربی و عددی بهره گرفته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که پس از 90 روز قرارگیری وصله کامپوزیتی کربنی در آب، عملکرد آن کاهش یافته و با وصله آلومینیومی تقریباً برابر خواهد شد. شوبل و همکاران [7]، 4 نوع قطعه آلومینیومی 5083، 6061، 7050 و 7075 ترک‌خورده را در هوا و محیط خورنده آب و نمک بررسی کردند. همانطور که انتظار می‌رفت، نتایج نشان می‌دهد نرخ رشد ترک تمامی قطعات در محیط خورنده سریعتر از هوا می‌باشد. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داده است که برای آلومینیوم 6061، در صورت استفاده از وصله کربنی، عمر قطعه بیش از 27.85٪ نسبت به وصله بور/اپوکسی افزایش خواهد یافت. الجبار و همکاران [8]، در مطالعه‌ای تجربی اثر وصله‌های کامپوزیتی در شکست قطعات در مودهای اول و دوم را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با زاویه‌دار شدن ترک و ترکیب دو مود، شکست در تعداد سیکل کمتر رخ می‌دهد. در زمینه وصله‌های کامپوزیتی، مطالعات عددی مختلفی نیز انجام شده است. کومار و همکاران [9] به بررسی اشکال مختلف وصله پرداخته و برای

³ Skewed Pins⁴ Stress Intensity Factor⁵ Fiber Metal Laminate⁶ Boundary element method¹ Boron/Epoxy² CFRP

بوده و خشک کن¹ مورد استفاده این رزین نیز ARADUR 5052 می باشد. دلیل انتخاب این نوع رزین کاربردهای فراوان این نوع رزین در صنایع هوا و فضا است.

پس از آماده کردن وصله های کامپوزیتی، جهت چسباندن وصله ها به قطعه آلومینیومی، از چسب Araldite 2015 تولید شرکت هانتسمن² استفاده شده است. دلیل استفاده از این نوع چسب، چسبندگی خیلی خوب آن به فلزات و کامپوزیت ها است. این چسب از دو بخش تشکیل شده و از لحاظ ظاهری خمیری شکل می باشد. جهت تهیه چسب لازم است که نسبت وزنی 1:1 از دو بخش A و B با یکدیگر ترکیب شود. خواص چسب در جدول 1 آمده است.

جدول 1 خواص چسب Araldite 2015

Table 1 Properties of Araldite 2015

ρ_{12}	G (MPa)	E (MPa)
0.33	560	1850

2-2- فرآیند ساخت

در ابتدا ورق آلومینیومی با استفاده از دستگاه گیوتین به مستطیل هایی با اندازه $270 \times 60 \text{ mm}^2$ بریده شده است. دلیل بلند بودن قطعه این است که محل اعمال بار و تکیه گاه تا محل ترک فاصله مناسبی داشته باشد تا انتقال بار کاملاً یکنواخت شده باشد. پس از برش قطعات می بایست ترکی به طول 6 mm روی آن ها ایجاد شود. امکان ایجاد ترک واقعی با استفاده از هیچ روشی امکان پذیر نمی باشد؛ به این دلیل که در همه روش ها مقداری از ماده با برش قطعه از بین می رود اما در ترک واقعی در ناحیه ترک جدایش اتفاق افتاده است. به ناچار از روش برشکاری وایرکات³ برای ایجاد ترک استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش کمترین دور ریز مواد در روش وایرکات است. از طرفی کیفیت برش این روش در مقایسه با دیگر روش ها بهتر است. ضخامت ترک ایجاد شده با استفاده از این روش در حدود 0.3 mm است.

برای ایجاد زبری در قطعه می توان از روش های سنباده زنی و شات بلاست استفاده کرد. در روش سنباده زنی تنها در ظاهر قطعه تغییر ایجاد می شود؛ بدین صورت که با استفاده از براده برداری از سطح قطعه باعث ایجاد زبری در قطعه می گردد. اما در روش شات بلاست با وارد کردن ضربه روی قطعه منجر به ایجاد تنش های پسماند در داخل قطعه می شود. این تنش های پسماند در عمر خستگی قطعه تأثیرگذار خواهد بود و دیگر نمی توان پارامتر ظاهری را به تنهایی بررسی نمود. در نتیجه روش مناسب برای ایجاد زبری در قطعه، روش سنباده زنی انتخاب شده است. در این مطالعه، فرآیند سنباده زنی در عرض 6 cm و در جهت ترک انجام گرفته است. کاغذهای سنباده مورد استفاده با محدوده وسیع و گسترده ای از زبری شامل چهار شماره دانه مختلف 40، 100، 400 و 600 است. این محدوده برای بررسی اثرات خشن ترین تا صاف ترین سنباده ها مناسب می باشد. برای هر یک از این حالات 3 قطعه برای آزمایش ترمیم با وصله و I قطعه برای حالت ترمیم نشده ساخته شد.

برای ساخت وصله کامپوزیتی می بایست مراحل زیر را انجام داد. ابتدا سطحی مسطح را با استفاده از جدا کننده ای مناسب کاملاً چرب نموده تا در انتهای کار بتوان به راحتی قطعه آماده شده را از سطح جدا نمود. مقداری

که با رسیدن ترک به انتهای وصله افت ناگهانی در فاکتور شدت تنش اتفاق می افتد. اروین و همکاران [17] به بررسی عددی صفحه آلومینیومی تعمیر شده با وصله پرداختند. در این مقاله سعی بر این شده است که با استفاده از ابزارهای بهینه سازی بهترین شکل، اندازه، ضخامت و ضخامت چسب بدست بیاید. آنها به این نتیجه رسیدند که مهمترین فاکتور تأثیر گذار در کیفیت وصله بهینه سازی در اندازه عرض وصله می باشد. جیانگ بین و همکاران [18] از یک ورق آلومینیومی ضخیم با ترمیم دوطرفه استفاده کردند و نشان دادند که با ترمی ایجاد شده بهبودی در حدود 31 برابر از حالت ترمیم نشده اتفاق افتاده است و همچنین مشخص شد که در قطعات ضخیم اختلاف در فاکتور شدت تنش در ضخامت قطعه کاملاً مشخص بوده است که این اختلاف در این مقاله تا حدود 10 درصد بوده است. حسینی و همکاران [19] بر روی آلومینیوم 1050 و وصله هایی از جنس فایبر شیشه به بررسی تأثیر نسبت تنش های مختلف پرداختند. نسبت تنش مورد بررسی در این پژوهش به ترتیب 0، 0.25، 0.5، 0.75 بوده است. آنها نشان دادند هرچه میزان نسبت تنش کاهش پیدا می کند عمر قطعات نیز به شدت با کاهش روبرو می شوند به طوری که عمر قطعات در نسبت تنش صفر تا 5 برابر کاهش پیدا کرده است.

با مرور مقالات و تحقیقات منتشر شده، مشاهده می شود که ترمیم قطعات یکی از بهترین راهکارها برای افزایش عمر قطعات و به تأخیر انداختن تعویض قطعات است که منجر به کاهش هزینه ها و جلوگیری از اتلاف زمان می شود. اکثر مقالات پیشین به بررسی بهینه سازی وصله پرداخته اند و تلاش هر یک در راستای افزایش عمر قطعات ترک خورده با تغییر در لایه چینی، تغییر در ابعاد وصله، تغییر در شکل و تأثیر ضخامت چسب در عمر نهایی قطعه بوده است ولی هیچ یک به بررسی کیفیت سطح و تأثیر آن روی عمر قطعه و چسبندگی بین قطعات نپرداخته اند. لذا در این مقاله هدف بررسی اثر کیفیت سطح بر عمر قطعه ترمیم شده با وصله کامپوزیتی است. در ادامه به بررسی و معرفی مواد به کار رفته در آزمایش، فرآیند ساخت و نحوه آزمایش پرداخته شده است. در نهایت با ارائه نمودارها نتایج به تجزیه و تحلیل یافته ها پرداخته شده است.

2-روش انجام آزمایش

1-2- مواد آزمایش

برای کاربردی بودن نتایج، ماده آزمایش شده از مواد مصرفی در صنایع انتخاب شده است. متداول ترین مواد مورد استفاده در صنعت آلومینیوم های 7075، 6061، 2024 و 1050 می باشند. با توجه به هزینه کمتر آلومینیوم 1050 نسبت به سه مورد دیگر، برای ساخت قطعات از این ماده استفاده گردید. مدول الاستیسیته (GPa) و ضریب پواسون این ماده به ترتیب 71 و 0.33 GPa می باشد [20]. برای ساخت وصله از الیاف شیشه با 200 g/m^2 با مشخصات فنی T(90)/M200-E10 استفاده شده است. زاویه T90، زاویه بین الیاف های طولی و عرضی است که در این الیاف قرار دارند. همچنین حرف M اختصار کلمه MAT به معنای حصیری بودن و عدد 200 جرم واحد سطح پارچه برحسب g/m^2 را نشان می دهد. حرف E به معنی نوع الیاف شیشه است و عدد 10 معرف تعداد تارهای موجود در هر رشته از الیاف می باشد. رزین استفاده شده برای ساخت وصله ها با نام اختصاری LY 5052

¹ Hardner² Huntsman³ Wirecut

جدول 2 نتایج آزمایش زبری سنجی

Table 2 Results of roughness test

Ra(μm)	شماره سنباده	Ra(μm)	شماره سنباده
0.33	400	0.53	40
0.27	600	0.40	100

4-2- آزمایش خستگی

برای انجام آزمایش، از دستگاه Instron 8502 استفاده شده است. این دستگاه توانایی اعمال بار به میزان 30 ton به صورت استاتیکی و 10 ton به صورت خستگی و دینامیکی را دارا می‌باشد. شکل بارگذاری می‌تواند سینوسی، مربعی و یا به طور دلخواه در نظر گرفته شود. فرکانس بار نیز بین 1-200 Hz قابل تنظیم است. دستگاه دارای سه بخش اصلی سیستم کامپیوتری، سیستم هیدرولیک و سیستم بارگذاری می‌باشد. سیستم کامپیوتر وظیفه کالیبراسیون سیستم، اعمال بار و ذخیره اطلاعات آزمایش را بر عهده دارد. وظیفه سیستم هیدرولیک قفل لبه‌های قطعه در دو فک بالا و پایین و اعمال بار از طریق فک بالایی است. در این مطالعه پس از کالیبره کردن سیستم، قطعه به صورت عمودی بین دو فک قرار داده می‌شود. نحوه قرار گرفتن قطعه در دستگاه در شکل 2 نشان داده شده است. در آزمایش‌ها، تمامی قطعات با بارگذاری از نوع سینوسی با بیشینه نیروی 19 kN، نسبت تنش 0.1 و فرکانس 20 Hz انجام پذیرفت.

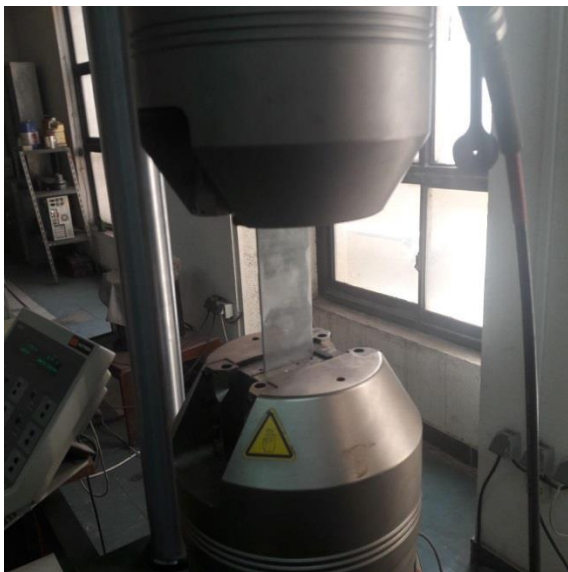


Fig. 2 Fixing test pieces in the fatigue machine

شکل 2 نحوه قرارگیری نمونه روی دستگاه

3-نتایج و بحث

3-1-- بررسی نتایج تجربی مراحل شکست

با توجه به این که ترک روی قطعه توسط هات وایر ایجاد شده است، حالت دایروی در انتهای ترک وجود دارد و با شروع اعمال بار خستگی رشد ترک اتفاق نمی‌افتد. بنابراین لازم است که در ابتدا ترک واقعی روی قطعه ایجاد شود. در واقع می‌بایست چندین سیکل طی شده تا ترک به صورت واقعی شود و پس از این مرحله رشد ترک خستگی اتفاق بیفتد. با ادامه اعمال بار

مناسب از رزین را با خشک‌کن ترکیب کرده و مواد را هم زده تا ترکیبی کاملاً یک دست بدست بیاید. الیاف شیشه را به ترتیب روی سطح واکس زده قرار داده و با استفاده از روش دستی پارچه‌ها آغشته به رزین می‌شود. پس از قرار دادن سه لایه الیاف شیشه یک لایه الیاف داکرون نیز روی سطح انتهایی قرار داده می‌شود. دلیل استفاده از داکرون این است که در انتهای کار با جدا کردن این لایه از سطح وصله، سطحی زبر برای چسبیده شدن بهتر وصله به قطعه ایجاد شود. پس از اتمام مراحل لایه‌گذاری برای بدست آوردن بهترین نتیجه و خروج رزین اضافی لایه‌ها از سیستم مکش استفاده گردید. برای این کار روی کامپوزیت ساخته شده، نایلون وکیوم قرار داده شده و با استفاده از دو درگاه متصل به سیستم مکش، رزین اضافی از قطعه خارج شده است. در انتها پس از خشک شدن قطعه در کوره و جدا کردن لایه داکرون از روی وصله‌ها، کامپوزیت به اندازه مورد نیاز برش داده می‌شود. نسبت وزنی رزین به الیاف در وصله ساخته شده در حدود 1:1 می‌باشد. در آخرین مرحله ساخت قطعات، دو بخش چسب Araldite 2015 را با نسبت وزنی مساوی ترکیب کرده و چسب حاصل روی طرف زبر وصله مالیده می‌شود. وصله روی ترک ایجاد شده در آلومینیوم قرار داده و وزنه‌ای روی وصله قرار داده می‌شود. پس از حدود 2 ساعت انتظار، چسب خشک شده و قطعه آماده می‌گردد. در شکل 1 مراحل ساخت به همراه نمونه‌ای از قطعه آماده شده برای آزمایش نشان داده شده است.

3-2- آزمون زبری سنجی

برای بدست آوردن مقدار زبری ایجاد شده از پارامتر Ra استفاده می‌شود. این پارامتر نشان دهنده معدل ارتفاع ناهمواری‌ها نسبت به خط مرکزی می‌باشد و زبری سطح میانگین نامیده می‌شود. در این روش پس از آماده‌سازی سطوح آلومینیومی سنسور دستگاه زبری سنج بر روی محل مورد نظر حرکت داده و میزان ناهمواری‌ها بر روی قطعه بدست می‌آید. نتایج حاصل در جدول 2 ارائه شده است.



Fig. 1 Manual layering (top right), Suction system (top left) and cracked piece with composite patch (down)

شکل 1 نحوه لایه‌چینی به روش دستی (تصویر بالا راست)، اجرای سیستم مکش (تصویر بالا چپ) و قطعه ترک خورده ترمیم شده با وصله کامپوزیتی (تصویر پایین)

می‌توان زیاد بودن عمق زبری‌ها دانست که چسب به این منافذ وارد نمی‌شود و در نتیجه سطح چسبندگی بین قطعات کمتر شده و عمر قطعات کاهش پیدا می‌کند.

با توجه به شکل 14 این روند کاهشی با افزایش زبری مشهودتر است، به طوری که با افزایش زبری تا شماره سنباده 40، چسبندگی آنقدر کاهش یافته که جدایش بین وصله و ورق آلومینیومی اتفاق می‌افتد، اما در مابقی قطعات مورد بررسی جدایش کامل بین وصله و ورق اتفاق نیافتاده است. همچنین با مقایسه نتایج جدول 7 و جدول 8 مشاهده می‌شود که عمر قطعه ترمیم شده در حدود 3 برابر عمر قطعه ترمیم نشده است.

جدول 7 نتایج تجربی عمر آزمون خستگی قطعه ترمیم نشده

Table 7 Experimental results of lifetime of unrepaired samples in the fatigue test

شماره سنباده	عمر (چرخه)	شماره سنباده	عمر (چرخه)
40	2300	600	2900
100	2710	-----	2950
400	2780		

جدول 8 نتایج تجربی عمر آزمون خستگی قطعه ترمیم شده

Table 8 Experimental results of lifetime of repaired samples in the fatigue test

شماره سنباده	نتایج آزمون عمر (چرخه)	میانگین
40	8140	7983±140
100	8700	8230±435
400	8580	9201±468
600	9815	11495±1520
-----	10890	10686±171

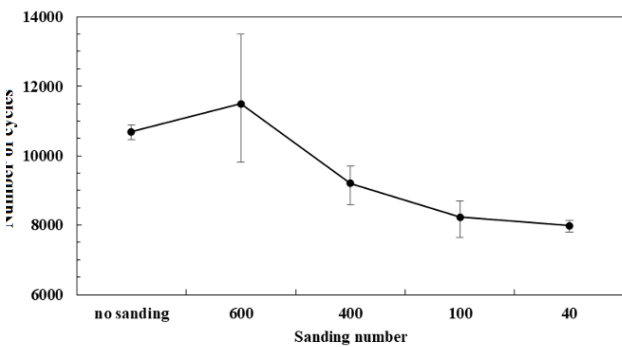
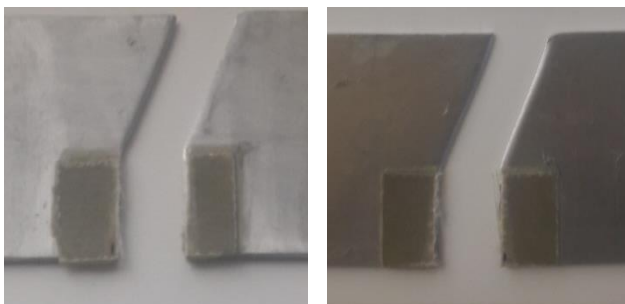


Fig. 13 Experimental results of effects of adhesive properties on lifetime of repaired samples

شکل 13 نتایج تجربی تأثیر زبری بر عمر قطعات ترمیم شده



خستگی ترک رشد پیدا می‌کند تا زمانی که طول ترک به طول ترک بحرانی برسد. در این صورت حالت مویی شکل در ادامه قطعه بوجود آمده و در نهایت قطعه شکست می‌خورد. در شکل 12 مراحل شکست قطعه به صورت مرحله‌ای در طول آزمون خستگی نشان داده شده است. در شکل 12 (تصویر پایین) مقطع شکست قطعه در نمونه بدون وصله دیده می‌شود. بخش اول ترک ایجاد شده بوسیله دستگاه هات وایر ایجاد شده و بخش دوم ترک رشد کرده به وسیله خستگی است. در بخش سوم نیز شکست نهایی قطعه اتفاق افتاده است.

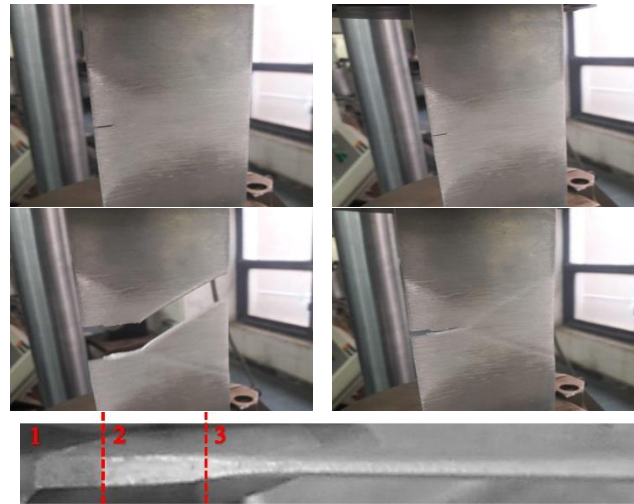


Fig. 12 Fracture steps in the fatigue test-the beginning of the test (top right), the actual cracks (top left), the growth of the cracks and the end of piece thinning (middle right), the final failure and separation (middle left) and fatigue fracture breakdown section in the simple sample (down)

شکل 12 مراحل شکست قطعه در آزمون خستگی - شروع آزمایش (بالا راست)، ایجاد ترک واقعی (بالا چپ)، رشد ترک و مویی شدن انتهای قطعه (وسط راست)، شکست نهایی و جدایش (وسط چپ) و مقطع شکست خستگی در نمونه بدون وصله (پایین)

2-3- بررسی نتایج تجربی تأثیر زبری بر چسبندگی و عمر خستگی

در ابتدا ورق آلومینیوم ترک خورده را پس از ایجاد زبری به وسیله سنباده، آزمایش خستگی کرده و برای تمامی انواع سنباده این آزمایش یک بار انجام پذیرفته است. نتایج عمر هر یک از این حالات در جدول 7 نشان داده شده است. در صورتی که حالت عدم وجود زبری را به عنوان حالت مرجع قرار داده شود، از نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با ایجاد زبری و کاهش کیفیت سطح، عمر قطعات کاهش پیدا کرده است. البته این کاهش عمر را می‌توان در زبری با شماره سنباده 600 صرف‌نظر کرد. در قطعه با شماره سنباده 40 این مقدار کاهش عمر قابل توجه بوده و تأثیر منفی آن در عمر قطعه مشهود است.

در حالت قطعه ترمیم شده، قطعه برای تمامی انواع سنباده، سه مرتبه مورد آزمایش قرار داده شده که نتایج حاصل در جدول 7 و شکل 13 آمده است. همان طور که نتایج جدول نشان می‌دهد، قطعاتی که با سنباده 600 زبر شده‌اند، افزایش عمر در قطعه اتفاق افتاده است که به دلیل افزایش سطح تماس بین قطعه و وصله می‌باشد.

از طرف دیگر در زبری‌های بالاتر عمر قطعه شروع به کمتر شدن کرده است، که دلیل اول کمتر شدن کیفیت سطح است و همچنین با وجود افزایش زبری چسبندگی بین قطعات کمتر شده است. دلیل این اتفاق را

- Patches" Composite Structures, Vol. 89, No. 2, pp. 270-274, 2009.
- [6] Bouiadjra, B. B., Benyahia, F., Albedah, A., Bouiadjra, B. A. B. and Khan, S. M., "Comparison between Composite and Metallic Patches for Repairing Aircraft Structures of Aluminum Alloy 7075 T6" International Journal of Fatigue, Vol. 80, pp. 128-135, 2015.
- [7] Schubbe, J. J., Bolstad, S. H. and Reyes, S., "Fatigue Crack Growth Behavior of Aerospace and Ship-Grade Aluminum Repaired with Composite Patches in a Corrosive Environment" Composite Structures, Vol. 144, pp. 44-56, 2016.
- [8] Aljabar, N., Zhao, X., Al-Mahaidi, R., Ghafoori, E., Motavalli, M. and Powers, N., "Effect of Crack Orientation on Fatigue Behavior of Cfrp-Strengthened Steel Plates" Composite Structures, Vol. 152, pp. 295-305, 2016.
- [9] Kumar, A. M. and Hakeem, S., "Optimum Design of Symmetric Composite Patch Repair to Centre Cracked Metallic Sheet" Composite Structures, Vol. 49, No. 3, pp. 285-292, 2000.
- [10] Bouiadjra, B. B., Bouanani, M. F., Albedah, A., Benyahia, F. and Es-Saheb, M., "Comparison between Rectangular and Trapezoidal Bonded Composite Repairs in Aircraft Structures: A Numerical Analysis" Materials & Design, Vol. 32, No. 6, pp. 3161-3166, 2011.
- [11] Fekih, S., Albedah, A., Benyahia, F., Belhouari, M., Bouiadjra, B. B. and Miloudi, A., "Optimisation of the Sizes of Bonded Composite Repair in Aircraft Structures" Materials & Design, Vol. 41, pp. 171-176, 2012.
- [12] Wu, C., Zhao, X., Duan, W., Emdad, M. R. and Al-Mahaidi, R., "Fatigue of Center Cracked Steel Plates with Uhm Cfrp Plate Strengthening" in Proceeding.
- [13] Rahmani Kalestan, M., Moayeri Kashani, H., Pourkamali Anaraki, A. and Ashena Ghasemi, F., "Experimental and Numerical Investigation of Fatigue Crack Growth in Aluminum Plates Repaired by Fml Composite Patch" International Journal of Structural Integrity, Vol. 5, No. 4, pp. 242-252, 2014.
- [14] Yu, Q., Zhao, X., Chen, T., Gu, X. and Xiao, Z., "Crack Propagation Prediction of Cfrp Retrofitted Steel Plates with Different Degrees of Damage Using Bem" Thin-Walled Structures, Vol. 82, pp. 145-158, 2014.
- [15] Shibuya, Y., Fujimoto, S., Aoki, D., Sato, M., Shirahata, H., Fukunaga, H. and Sekine, H., "Evaluation of Crack Growth in Cracked Aluminum Panels Repaired with a Bonded Composite Patch under Cyclic Loading" Advanced Composite Materials, Vol. 10, No. 4, pp. 287-297, 2001.
- [16] Chung, K.-H. and Yang, W.-H., "A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior of Thick Aluminum Panels Repaired with a Composite Patch" Composite Structures, Vol. 60, No. 1, pp. 1-7, 2003.
- [17] Errouane, H., Sereir, Z. and Chateaufneuf, A., "Numerical Model for Optimal Design of Composite Patch Repair of Cracked Aluminum Plates under Tension" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 49, pp. 64-72, 2014.
- [18] Jian-Bin, H., Xu-Dong, L. and Zhi-Tao, M., "Fatigue Behavior of Thick Center Cracked Aluminum Plates Repaired by Two-Sided Composite Patching" Materials & Design, Vol. 88, pp. 331-335, 2015.
- [19] Hosseini, K., Safarabadi, M., Ganjiani, M., Mohammadi, E. and Hosseini, A., "Experimental and Numerical Fatigue Life Study of Cracked Al Plates Reinforced by Glass/Epoxy Composite Patches in Different Stress Ratios" Mechanics Based Design of Structures and Machines, pp. 1-17, 2020.
- [20] AZOM, 2018.

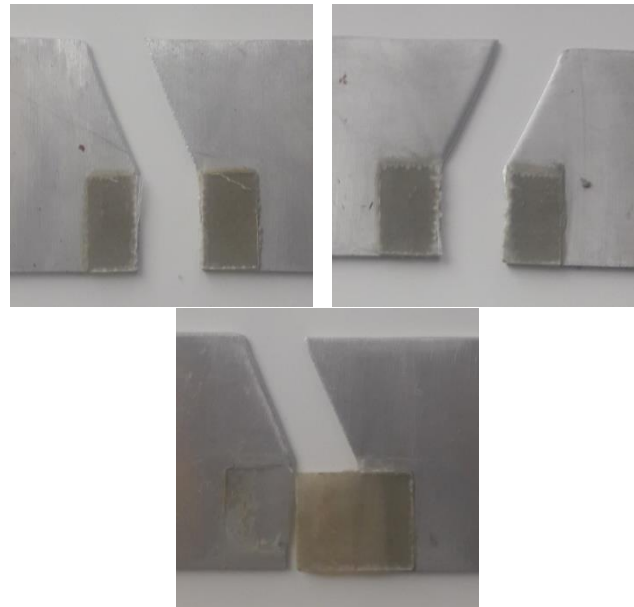


Fig. 14 Experimental results of fracture in repaired samples- sample without roughness (top right), sample with sanding number 600 (top left), sample with sanding number 400 (middle right), sample with sanding number 100 (middle left) and sample with sanding number 40 (down)

شکل 14 نتایج تجربی شکست قطعات ترمیمی زبر شده- قطعه بدون زبری (بالا راست)، قطعه زبر شده با سنباده 600 (بالا چپ)، قطعه زبر شده با سنباده 400 (وسط راست)، قطعه زبر شده با سنباده 100 (وسط چپ) و قطعه زبر شده با سنباده 40 (پایین)

4-جمع بندی

در این مقاله به منظور افزایش عمر قطعات ترک خورده به بررسی راهکاری برای افزایش عمر قطعات ترمیم شده با استفاده از وصله کامپوزیتی و اتصال چسبی پرداخته شد. بدین منظور با انجام آزمایش خستگی روند افزایش عمر مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج مشاهده گردید که ایجاد زبری با استفاده از سنباده 600 در حدود 7.6٪ افزایش عمر ایجاد نموده که این افزایش نشان دهنده افزایش سطح تماس بین قطعات بوده است. البته ایجاد زبری های بالاتر نتیجه عکس داده و در قطعات زبر شده با سنباده 40، عمر در حدود 25٪ کاهش پیدا کرده و نوع شکست قطعه از حالت شکست وصله به حالت شکست چسب تبدیل شده است.

5- مراجع

- [1] Duong, C. N. and Wang, C. H., "Composite Repair: Theory and Design", Elsevier, 2010.
- [2] Chue, C.-H. and Liu, T. J.-C., "The Effects of Laminated Composite Patch with Different Stacking Sequences on Bonded Repair" Composites Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 223-230, 1995.
- [3] Denney, J. J., "Fatigue Response of Cracked Aluminum Panel with Partially Bonded Composite Patch", Air Force Inst Of Tech Wright-Patterson Afb Oh, pp. 1995.
- [4] Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., "Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch" Journal of structural engineering, Vol. 129, No. 2, pp. 186-196, 2003.
- [5] Khalili, S., Ghadjar, R., Sadeghinia, M. and Mittal, R., "An Experimental Study on the Charpy Impact Response of Cracked Aluminum Plates Repaired with Gfrp or Cfrp Composite



مطالعه پارامتریک تیرهای با حرکات طولی و دورانی تحت بارمحوری متشکل از مواد ویسکوالاستیک هدفمند محوری

علی فروغی¹، محمدرضا قضاوی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115143، ghazavim@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله، باهدف بهبود عملکرد سیستم‌های بیژیروسکوپی، ارتعاشات و پایداری یک تیر مدرج محوری با جفت حرکات‌های محوری و دورانی تحت بارمحوری مطالعه شده است. همچنین، یک مطالعه پارامتریک مفصل به منظور توضیح اثر فاکتورهای کلیدی مختلف مانند نرخ درجه‌بندی محوری مواد، نوع توزیع مواد، ضریب ویسکوزیته، چرخش و حرکت عبوری کوپل بر مشخصات دینامیکی سیستم انجام شده است. فرض شده است مشخصات مادی سیستم در راستای طولی به صورت خطی یا نمایی تغییر می‌کنند. با استفاده از تکنیک گسسته سازی گالرکین و تحلیل مقدار ویژه، سرعت‌های محوری و چرخشی بحرانی سیستم به دست می‌آیند. یک روش تحلیلی نیز برای شناسایی آستانه‌های ناپایداری سیستم به کار برده شده است. نقشه‌های پایداری سیستم آزموده شدند و برای اولین بار در این مقاله نشان داده شده است که با تنظیم صحیح درجه‌بندی محوری مواد می‌توان روند تکامل پایداری سیستم را تغییر داد. نتیجه شده است که تغییرات پارامترهای گرادیان چگالی و مدول الاستیک اثرهای متضاد بر محدوده‌های دایورژنس و فلاتر سیستم دارند. همچنین نتایج نشان داده‌اند که با تعیین هم‌زمان گرادیان چگالی و مدول الاستیک در راستای طولی می‌توان اثرات ناپایدارکننده نیروی محوری فشاری را تقلیل داد

دریافت: 1398/12/15

پذیرش: 1399/06/25

کلیدواژه‌ها:

تیر متحرک محوری و چرخان
مواد مدرج تابعی محوری
تحلیل دایورژنس و فلاتر
نقشه پایداری
ارتعاشات کوپل

Parametric investigation of dynamics of beams made of FG material with longitudinal and whirling movements exposed to axial forces

Ali Forooghi¹, Mohammad Reza Ghazavi^{2*}

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

2- School of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115143, Tehran, Iran, ghazavim@modares.ac.ir

Keywords

Axially moving and rotational beam
Axially functionally graded material
Coupled vibrations
Divergence and flutter
Stability map

Abstract

To improve the performance of the bi-gyroscopic systems, vibration and stability of an axially graded beam with both axial and rotational motion subjected to axial load have been studied. In addition, a detailed parametric study was performed to explain the effect of various key factors such as range of axial graded of materials, type of material distribution, viscosity coefficient, rotation and axial motion on the dynamic of the system. It was assumed that the material properties of the system change linearly or exponentially in the longitudinal direction. The critical axial and rotational speeds of the system were obtained by using the Galerkin discretization technique and eigenvalue analysis. An analytical method was used to identify system instability thresholds. The stability graphs were inspected. For the first time in this paper, it was verified that the stability evolution of the structure could be changed by properly regulating the axial graded of the material. It was concluded that changes in density gradient parameters and elastic modulus have opposite effects on the divergence and flutter boundaries of the system. Also, the destabilizing influences of compressive axial load can be reduced by determining the density gradient and elastic modulus in the longitudinal direction, simultaneously

1- مقدمه

مختلف، توسط پژوهشگران بی‌شماری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [2]. در این راستا، اثر فاکتورهای مختلفی بر پاسخ دینامیکی و مشخصه‌های دینامیکی سیستم‌های چرخان گزارش شده‌اند، مانند تغییرات دمایی [3]، راستای محور دوران [4]، هندسه نامتقارن [5]، نوسانات سرعت دوران [6] و جاذب غیرخطی [7].

دینامیک سازه‌های متحرک محوری، موضوع شمار زیادی از پژوهش‌های علمی در طول سال‌های گذشته بوده است. مرورهای جامع بر روی رفتار ارتعاشاتی و پایداری سیستم‌های متحرک محوری صورت گرفته است [1]. همچنین، سازه‌های چرخان به دلیل کاربردهای گسترده در صنایع مهندسی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Forooghi A, and Ghazavi. M. R "Parametric investigation of dynamics of beams made of FG material with longitudinal and whirling movements exposed to axial forces", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1177-1188, 2021.

هندسی بر این رفتار را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که فرکانس‌های طبیعی تحت بار آیزوتروم الاستیک کاهش می‌یابند. لیرسکیو همکاران [23] ارتعاشات تیرهای جدار نازک مدرج را در محیط‌های حرارتی مدل کردند. آن‌ها فهمیدند که گرادیان دما بعلاوه تغییرات خواص مواد نقش اساسی در تعیین سرعت‌های بحرانی کماتش سیستم دارند. تیرهای متحرک چرخان، یکی از اصلی‌ترین المان‌ها در سازه‌های مکانیکی هستند [24]. به دلیل داشتن هم‌زمان حرکت محوری و حرکت چرخشی، این سیستم‌های بایژروسکوپی، دارای پویایی دینامیکی غنی بین سیستم‌های ژيروسکوپی هستند؛ اما علیرغم اهمیت بالای این سازه‌های کاربردی، مطالعات محدودی در زمینه مدل‌سازی ریاضی و تحلیل دینامیکی آن‌ها انجام شده است [25]. در این زمینه، یوه و یانگ [26] مدل‌سازی دینامیکی یک تیر چرخان متحرک محوری را به‌صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اثر نیروی اینرسی در تیرهای چرخان در سرعت‌های بالا قابل توجه است درحالی‌که در سرعت‌های پایین قابل صرف‌نظر است. پاسخ‌های دینامیکی پیش‌پیچش تیر چرخان متحرک محوری یکسرگردار بر اساس تئوری تیر اویلر-برنولی توسط لی [27] مطالعه شده است. او نشان داد که تغییرات جابه‌جایی سر تیر به ازای حرکت‌های نسبتاً سریع طولی و چرخشی، دارای نوسان کمتری است. ژو و چانگ [28] پاسخ ارتعاشی و پایداری یک تیر چرخان متحرک محوری را بر اساس تئوری تیر رابلی مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ممان اینرسی سیستم، نواحی پایداری سیستم کوچک می‌شوند. یانگ و همکاران [29] دینامیک تیر چرخان متحرک محوری را بررسی کردند. آن‌ها فرکانس‌های طبیعی و نقاط انشعاب سیستم را به ازای تغییرات سرعت محوری و سرعت دورانی به دست آوردند. برخلاف سازه‌های چرخان متحرک ایزوتروپیک، ادبیات فنی موجود بر روی تحلیل ارتعاشاتی سیستم‌های چرخان متحرک کامپوزیتی محدودتر است. قایش و همکاران [30] تحلیل ارتعاشات غیرخطی یک روتور همراه با حرکت محوری را انجام دادند. آن‌ها به‌کارگیری روش مقیاس چندگانه، فرکانس‌های غیرخطی و محدوده‌های پایداری پاسخ حالت ماندگار را به دست آوردند. صاحبکار و همکاران [31] ارتعاشات غیرخطی یک رشته حفاری متحرک محوری در یک چاه اریب را بررسی کردند. آن‌ها اثرات جرم نامتوازن و نیروی غیرخطی سیال بر پاسخ دینامیکی و مودهای غیرخطی سیستم را مطالعه کردند. اخیراً لی و همکاران [32] مشخصه‌های کوپل شده ارتعاشاتی یک تیر کامپوزیتی جدار نازک چرخان متحرک محوری را مطالعه کردند. آن‌ها اثرات مشخصه‌های هندسی همچون نسبت‌های طول و ضخامت به شعاع و خواص مواد نظیر زاویه جهت بندی الیاف را بر روی رفتار دینامیکی سیستم بررسی کردند. بر طبق اطلاعات نویسندگان، تحلیل ارتعاشاتی تیرهای مدرج محوری با جفت حرکت محوری و دورانی تا به حال مطالعه نشده است. همچنین اثر به‌کارگیری مواد ویسکوالاستیک، مواد مدرج طولی (تغییرات مدول الاستیک و چگالی جداگانه و هم‌زمان با توابع توزیع مختلف) و همچنین اثر نیروهای محوری فشاری و کششی بر رفتار ارتعاشاتی و پایداری دینامیکی سیستم‌های بایژروسکوپی تاکنون گزارش نشده است. هدف اصلی این مقاله ارزیابی استفاده از مواد مدرج محوری، مواد ویسکوالاستیک و همچنین بررسی اثر نیروهای محوری فشاری و کششی در بهبود عملکرد سازه‌هایی که هم‌زمان تحت حرکت محوری و چرخشی هستند، است. ابتدا در بخش 2، معادلات دینامیکی سیستم استخراج می‌شوند. سپس در بخش 3، برای استخراج معادلات کاهش مرتبه یافته، تکنیک گسسته‌سازی گالرکین استفاده می‌شود. در ادامه، مسئله مقدار ویژه در بخش 4 انجام می‌شود. برای اطمینان از

مواد مدرج نوع خاصی از مواد مرکب هستند که خواص ترمومکانیکی آن‌ها در راستای مشخصی از جسم، به‌صورت نرم و پیوسته تغییر می‌کنند [8]. در مقایسه با مواد ایزوتروپیک و لایه‌ای مرسوم، مواد مدرج ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند چقرمگی شکست بالاتر، تمرکز تنش کمتر، مقاومت خوردگی و دمایی بهتر را نمایش می‌دهند [9]. به همین دلیل، به‌کارگیری مواد مدرج در سازه‌های متحرک محوری می‌تواند منجر به نتایج برجسته شود [10]. در این زمینه، ارتعاشات تیر متحرک محوری منعطف ساخته‌شده از مواد مدرج بر اساس روش المان محدود توسط پیوان و سامپایو [11] مطالعه شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از فلز به‌عنوان جزء اصلی تیر در مقایسه با سرامیک، منجر به نوسان فرکانسی کمتری در سیستم می‌شود. سویی و همکاران [12] ارتعاش آزاد عرضی تیر متحرک محوری مدرج را با استفاده از تئوری تیر تیموشنکو مطالعه کردند. آن‌ها اثر پارامترهای مختلفی همچون سرعت حرکت محوری و شاخص قانون توانی را بر روی فرکانس‌های طبیعی بررسی کردند. پایداری تیر متحرک محوری مدرج با سرعت وابسته به زمان توسط یان و همکاران [13] بررسی شد. آن‌ها برای به دست آوردن محدوده‌های پایداری سیستم از روش چندمقیاسی مستقیم استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که آستانه پایداری سیستم با افزایش سرعت محوری و پارامتر سختی تکیه‌گاه به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. همچنین، ترکیب مواد مدرج و سازه‌های چرخان توسط محققین متعددی مطالعه شده است [14]. به‌طور مثال، لی و ژانگ [15] پاسخ‌های دینامیکی تیرهای مخروطی مدرج تابعی محوری چرخان را بر اساس روش بی-اسپلاین مطالعه کردند. آن‌ها اثرات نسبت مخروطی، ناهمگنی ماده، سرعت دورانی و شعاع توپی را بر روی دینامیک سیستم بررسی کردند. بهالدینی و سعیدی [16] به تحلیل آبروالاستیک تیغه‌های مدرج تابعی چرخان تقویت‌شده با نانوصفحات گرافن در جریان فراصوت پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش گالرکین تعمیم‌یافته به حل مسئله پرداختند و نشان دادند که افزودن مقدار کمی از صفحات گرافنی به ماتریس پلیمر منجر به افزایش فرکانس‌های طبیعی می‌شود. ابراهیمی و مختاری [17] رفتارهای ارتعاش آزاد عرضی تیر تیموشنکو چرخان مدرج تابعی که از مواد متخلخل ساخته‌شده را با استفاده از روش نیمه‌تحلیلی تبدیل دیفرانسیلی مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که به ازای مقادیر مناسب شاخص قانون توانی، رفتار ارتعاشاتی تیرهای چرخان مدرج بهبود می‌یابد، درحالی‌که نسبت لاغری اثر ناچیزی بر رفتار ارتعاشی سیستم دارد. زرین زاده و همکاران [18] ارتعاشات آزاد تیرهای مخروطی چرخان مدرج محوری را با بکارگیری روش اجزا محدود برای شرایط مرزی مختلف بررسی کردند. آن‌ها اثرات ناهمگنی مواد، نسبت مخروطیت، شعاع هاب و پارامتر سرعت چرخش را بر دینامیک سیستم بررسی کردند. اوه و همکاران [19] پایداری ترموالاستیک تیرهای دایروی جدار نازک مدرج چرخان را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات شاخص توانی می‌تواند مرزهای پایداری سیستم را به‌طور قابل‌توجهی جابجا کند. رامش و راثو [20] فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات تیرهای چرخان یکسرگردار مدرج محوری پیش‌تاب را مطالعه کردند. آن‌ها اثرات کوپلینگ مودهای طولی و عرضی را بر پاسخ دینامیکی سیستم به ازای گرادیان‌های مختلف مواد بررسی کردند. اوه و همکاران [21] ارتعاشات پره‌های چرخان توربومشین‌ها را که از مواد مدرج تابعی ساخته‌شده‌اند و در میدان‌های دما بالا عملیات می‌کنند، در نظر گرفتند. آن‌ها خواص مؤثر مواد را با فرض روش اختلاط و موری تاناکا به دست آوردند. فاضل زاده و حسینی [22] رفتار آیزوتروم الاستیک تیرهای جدار نازک ساخته‌شده از مواد مدرج تابعی را در جریان‌های فراصوت و تأثیر پارامترهای

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - y \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (7)$$

$$\sigma_x = E(x)\varepsilon_x + \beta \frac{D}{Dt} \varepsilon_x \quad (8)$$

که در آن v و w به ترتیب جابجایی عرضی سیستم در راستای محورهای y و z هستند. ضمناً β ضریب ویسکوزیته، ε_x کرنش طولی و σ_x تنش محوری است. سپس انرژی پتانسیل سیستم این چنین محاسبه می‌شود [35]:

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L \sigma_x \varepsilon_x A dx \quad (9)$$

انرژی جنبشی سیستم این چنین بیان می‌شود [29]:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \rho(x) A \left(u^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} - \Omega w \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + \Omega v \right)^2 \right) dx \quad (10)$$

انرژی جنبشی سیستم ترکیبی از انرژی جنبشی ناشی از حرکات طولی و دورانی سیستم است که در سیستم‌های بایزبروسکوپیک به کار گرفته می‌شود [36]. کار انجام شده توسط نیروی محوری فشاری نیز به دلیلی چرخش در سیستم این چنین به دست می‌آید [37]:

$$W_p = \frac{1}{2} \int_0^L P \left(\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) dx \quad (11)$$

برای استخراج معادلات دینامیکی سیستم از اصل همپلتون استفاده می‌شود [38]:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T + W_p - V) dt = 0 \quad (12)$$

با جایگذاری معادلات (9-11) در معادله (12)، معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم طبق روابط (13) و (14) استخراج می‌شوند.

$$\begin{aligned} \rho(x)A(\ddot{v} + 2u\dot{v}' - 2\Omega\dot{w} + u^2v'' - 2u\Omega w' - \Omega^2v) \\ + \rho'(x)Au(\dot{v} + uv' - \Omega w) \\ + P\dot{v}'' + E(x)Iv'''' \\ + 2E'(x)Iv'''' + E''(x)Iv'' \\ + \beta I(\dot{v}'''' + uv''''') = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \rho(x)A(\ddot{w} + 2u\dot{w}' + 2\Omega\dot{v} + u^2w'' + 2u\Omega v' - \Omega^2w) \\ + \rho'(x)Au(\dot{w} + uw' + \Omega v) \\ + P\dot{w}'' + E(x)Iw'''' \\ + 2E'(x)Iw'''' + E''(x)Iw'' \\ + \beta I(\dot{w}'''' + uw''''') = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

که علامت پریم و دات به ترتیب بیانگر مشتق نسبت به x و t هستند. برای استخراج روابط بی‌بعد، پارامترهای بی‌بعد زیر تعریف می‌شوند:

درستی روش مورد استفاده در پژوهش حاضر، در زیربخش 1-5، نتایج به دست آمده با نتایج موجود در ادبیات مقایسه می‌شوند. در ادامه، اثر گرادیان مواد، توزیع‌های مختلف مواد، خاصیت ویسکوالاستیک، نیروی محوری، سرعت محوری و حرکت دورانی بر مرزهای پایداری و مشخصات دینامیکی سیستم با جزئیات بحث و بررسی می‌شوند. ضمناً برای اولین بار نشان داده خواهد شد که روند تکامل تیرهای متحرک محوری دورانی چرخشی را می‌توان با درجه‌بندی محوری مواد و مواد ویسکوالاستیک تغییر داد. همچنین، مرزهای دایورژنس سیستم به صورت تحلیلی و عددی به دست می‌آیند و مقایسه می‌شوند. در نهایت، نیز بعضی از نتایج مهم بیان خواهند شد.

2- مدل سازی ریاضی

شکل 1 شماتیک یک تیر دو سر مفصل با حرکات طولی و دورانی را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که تیر نسبت به محور طولی متقارن است و یک نیروی محوری فشاری P در دو انتهای تیر به آن وارد می‌شود. تیر به صورت هم‌زمان با سرعت u در راستای محوری حرکت می‌کند و با سرعت دورانی Ω می‌چرخد. طول تیر L ، ممان اینرسی آن I و سطح مقطع آن نیز A است [33].

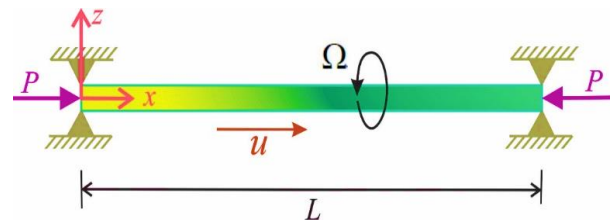


Fig. 1 Schematic of the axially graded beam with both axial and rotational motions

شکل 1 شماتیک تیر مدرج محوری با حرکت محوری و دورانی مشخصات مادی تیر یعنی مدول الاستیک $E(x)$ و چگالی $\rho(x)$ به ترتیب طبق معادلات (1) و (2)، در راستای طولی تیر طبق قانون خطی یا نمایی تغییر می‌کنند:

$$E(x) = E_0 f(x) \quad (1)$$

$$\rho(x) = \rho_0 g(x) \quad (2)$$

که در آن ρ_0 و E_0 چگالی و مدول الاستیک در ابتدای تیر هستند و

$$g(x) = 1 + \frac{x}{L}(\alpha_\rho - 1) \quad \text{or} \quad g(x) = e^{\frac{x \ln(\alpha_\rho)}{L}} \quad (3)$$

$$f(x) = 1 + \frac{x}{L}(\alpha_E - 1) \quad \text{or} \quad f(x) = e^{\frac{x \ln(\alpha_E)}{L}} \quad (4)$$

در روابط (3) و (4)، α_E و α_ρ به ترتیب پارامترهای گرادیان چگالی و مدول الاستیک هستند و چنین تعریف می‌شوند:

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_L}{\rho_0} \quad (5)$$

$$\alpha_E = \frac{E_L}{E_0} \quad (6)$$

در روابط (5) و (6) ρ_L و E_L چگالی و مدول الاستیک در انتهای تیر هستند. با در نظرگیری رابطه خطی کرنش-جابجایی و معادله ترکیبی اساسی ماده ویسکوالاستیک بر اساس مدل کلونین-وویت، می‌توان نوشت [34]:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{Q} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 & G_2 \\ -G_2 & G_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{Q} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ -K_2 & K_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

که در آن:

$$\mathbf{Q} = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{P} = [p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)]^T \quad (23)$$

$$(\mathbf{M}_1)_{sr} = \int_0^1 g(x) \phi_s(x) \phi_r(x) dx \quad (24)$$

$$(\mathbf{G}_1)_{sr} = u \int_0^1 2g(x) \phi_s(x) \phi_r'(x) dx + u \int_0^1 \lambda(\xi) \phi_s(x) \phi_r(x) dx + \eta \int_0^1 \phi_s(x) \phi_r''''(x) dx \quad (25)$$

$$(\mathbf{G}_2)_{sr} = -2u \int_0^1 2g(x) \phi_s(x) \phi_r(x) dx \quad (26)$$

$$(\mathbf{K}_1)_{sr} = u^2 \int_0^1 g(x) \phi_s(x) \phi_r''(x) dx - \Omega^2 \int_0^1 g(x) \phi_s(x) \phi_r(x) dx$$

$$+ u^2 \int_0^1 \lambda(x) \phi_s(x) \phi_r'(x) dx + P \int_0^1 \phi_s(x) \phi_r''(x) dx + \int_0^1 f(x) \phi_s(x) \phi_r''''(x) dx + 2 \int_0^1 \gamma(x) \phi_s(x) \phi_r''''(x) dx + \int_0^1 \mu(x) \phi_s(x) \phi_r''(x) dx + \eta u \int_0^1 \phi_s(x) \phi_r''''(x) dx \quad (27)$$

$$(\mathbf{K}_2)_{sr} = -2u\Omega \int_0^1 g(x) \phi_s(x) \phi_r'(x) dx - u\Omega \int_0^1 \lambda(x) \phi_s(x) \phi_r(x) dx \quad (28)$$

4- تحلیل پایداری

معادله ماتریسی مرتبه دوم حرکت سیستم را می‌توان به فرم مرتبه اول زیر کاهش داد:

$$\mathbf{B}\dot{\mathbf{Z}}(\tau) + \mathbf{E}\mathbf{Z}(\tau) = \mathbf{0} \quad (29)$$

که در آن

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_1 & G_2 \\ -G_2 & G_1 \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_1 \end{bmatrix} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ -K_2 & K_1 \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z}(\tau) = \begin{bmatrix} Q \\ P \\ \dot{Q} \\ \dot{P} \end{bmatrix} \quad (30)$$

حال با فرض راه حل $\mathbf{Z} = \mathbf{A}e^{\lambda t}$ معادله مرتبه کاهش یافته (29) منجر به مسئله مقدار ویژه زیر می‌شود:

$$\mathbf{Y}\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I} = \mathbf{0} \quad (31)$$

$$x^* = \frac{x}{L}, \quad v^* = \frac{v}{L}, \quad w^* = \frac{w}{L}, \quad t^* = t \sqrt{\frac{E_0 L^2}{\rho_0 A}}$$

$$u^* = \frac{u}{L^2} \sqrt{\frac{\rho_0 A}{E_0}}, \quad \Omega^* = \frac{\Omega}{L} \sqrt{\frac{\rho_0 A}{E_0}} \quad (15)$$

$$P^* = \pm \frac{PL^2}{EI}, \quad \eta = \frac{\beta L}{\sqrt{\rho_0 A E_0}}, \quad \lambda(x^*) = g'(x)L$$

$$\gamma(x^*) = f'(x)L, \quad \mu(x^*) = f''(x)L^2$$

لازم به ذکر است که در نیروی محوری (P^*)، علامت‌های مثبت و منفی، به ترتیب به نیروهای فشاری و کششی ارجاع داده می‌شوند. با جایگذاری پارامترهای بی‌بعد رابطه (15) در معادلات دینامیکی سیستم و حذف ستاره از پارامترهای بی‌بعد، معادلات دینامیکی بدون بعد سیستم به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$g(x)(\ddot{v} + 2u\dot{v}' - 2\Omega\dot{w} + u^2v'' - 2u\Omega w' - \Omega^2v) + \lambda(x)u(\dot{v} + uv' - \Omega w) + Pv'' + f(x)v'''' + 2\gamma(x)v'''' + \mu(x)v'' + \eta(\dot{v}'''' + uv''''') = 0 \quad (16)$$

$$g(x)(\ddot{w} + 2u\dot{w}' + 2\Omega\dot{v} + u^2w'' + 2u\Omega v' - \Omega^2w) + \lambda(x)u(\dot{w} + uw' + \Omega v) + Pw'' + f(x)w'''' + 2\gamma(x)w'''' + \mu(x)w'' + \eta(\dot{w}'''' + uw''''') = 0 \quad (17)$$

3- روش گسسته سازی

برای گسسته سازی معادلات و به دست آوردن معادله مرتبه کاهش یافته، از روش گالرکین استفاده می‌شود. به همین دلیل جابجایی‌های عرضی سیستم طبق روابط زیر تخمین زده می‌شوند [39]:

$$v(x, t) = \sum_{j=1}^n q_j(t) \phi_j(x) \quad (18)$$

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^n p_j(t) \phi_j(x) \quad (19)$$

که در آن n تعداد مودهای در نظر گرفته شده، q و p به ترتیب مختصات تعمیم یافته وابسته به زمان در راستای محورهای y و z هستند. همچنین، ϕ تابع تخمینی برای جابجایی عرضی سیستم در راستای محورهای y و z هستند و چنین بیان می‌شوند [29]:

$$\phi_j(x) = \sqrt{2} \sin(j\pi x) \quad (20)$$

با جایگذاری روابط (18-19) در معادلات (16) و (17) و به کارگیری روش گالرکین، فرم عمومی بدون بعد معادلات گسسته سیستم به شکل زیر نوشته می‌شود:

که در شکل 3-الف مشاهده می‌شود، در نبود سرعت دورانی در سیستم $(\Omega=0)$ ، فرکانس پایه‌ای سیستم یک شاخه دارد. در این حالت، با افزایش سرعت محوری، فرکانس پایه‌ای سیستم به‌طور یکنوا کاهش می‌یابد تا در سرعت محوری دایورژنس (u_d) ، فرکانس پایه‌ای سیستم صفر می‌شود و بعدازآن سیستم در یک محدوده مشخصی از سرعت محوری متحمل پدیده دایورژنس می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک، فرکانس پایه‌ای بعلاوه سرعت محوری دایورژنس سیستم افزایش می‌یابد. این روند را می‌توان با این حقیقت توجیه کرد که از آنجایی‌که پارامتر گرادیان مدول الاستیک تنها در ماتریس سختی سیستم نقش دارد، بنابراین می‌توان گفت افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک، اثر افزایش سختی بر سیستم القا می‌کند. در نتیجه، با افزایش α_E ، مقاومت سیستم به دایورژنس افزایش پیدا می‌کند و سیستم در سرعت‌های بالاتر متحمل پدیده دایورژنس می‌شود.

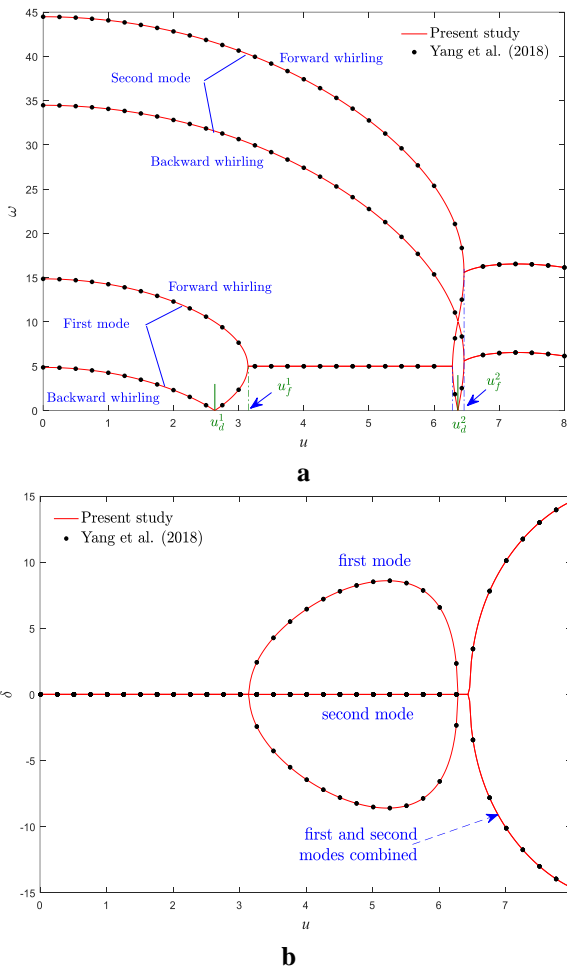


Fig.2 (a) Imaginary and (b) real parts of the first two eigenvalues of the isotropic beam for $\zeta=0, P=0, \Omega=5$

شکل 2 (الف) قسمت موهومی و (ب) حقیقی دو جفت مقدار ویژه اول تیر ایزوتروپیک به ازای $\zeta=0, \Omega=5, P=0$

به‌بیان دیگر، افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک منجر به ساختار سفت‌تر سیستم می‌شود. هنگامی‌که سیستم ترکیبی از حرکت محوری و دورانی دارد (شکل‌های 3 ب-د)، به دلیل اثر ژيروسکوپیک کوریولیس، یک انشعاب در

که I ماتریس همانی است، λ مقدار ویژه مختلط است و $\mathbf{Y}=-\mathbf{B}^{-1}\mathbf{E}$. قسمت موهومی مقدار ویژه سیستم $(\omega=\text{Image}(\lambda))$ به فرکانس طبیعی ارتعاشات سیستم مربوط است و قسمت حقیقی آن $(\delta=\text{Real}(\lambda))$ به دمپینگ سیستم مربوط می‌شود. هنگامی‌که $\omega=0$ سیستم دچار دایورژنس می‌شود. همچنین هنگامی‌که $\delta>0$ است، در سیستم ناپایداری فلاتر رخ خواهد داد.

5- نتایج عددی و بحث

در این بخش ابتدا برای اطمینان از درستی روش حل مورد استفاده، فرکانس‌های طبیعی سیستم با نادیده گرفتن گرادیان محوری مشخصات مواد استخراج می‌شوند و با نتایج موجود در ادبیات مقایسه می‌شوند. سپس، اثر گرادیان محوری چگالی و مدول الاستیک بر رفتار دینامیکی سیستم تحلیل می‌شود. در نهایت نیز تأثیر توزیع‌های مختلف مواد در راستای طولی و تغییرات هم‌زمان مشخصات مادی سیستم بر نواحی پایداری توضیح داده می‌شود.

5-1- صحنه سازی مدل

قسمت موهومی و حقیقی چهار مقدار ویژه اول تیر ایزوتروپیک (شامل دو جفت فرکانس طبیعی پسر و پیشرو) هنگامی‌که $\Omega=5$ است، به ترتیب در شکل 2 (الف) و (ب) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج پژوهش حاضر با نتایج یانگ و همکاران [29] تطابق خوبی دارد. لازم به ذکر است همان‌طور که در شکل 2-الف مشاهده می‌شود، در مقایسه با تیرهای متحرک محوری و تیرهای چرخان، تیرهایی که هم‌زمان حرکت محوری و چرخشی دارند، روند تکامل پایداری "پایدار-مود اول دایورژنس-پایدار-ترکیب مودفلاتر-پایدار-مود اول دایورژنس-پایدار-ترکیب مودفلاتر" را تجربه می‌کنند. به‌بیان دیگر، مطابق شکل 2-الف، در مقایسه با سیستم‌های مونوزیروسکوپیک، سیستم‌های باژیروسکوپیک در یک سرعت دورانی ثابت با افزایش سرعت محوری، می‌توانند دو سرعت مختلف دایورژنس $(u_d^1$ و u_d^2) و دو سرعت مختلف فلاتر $(u_f^1$ و $u_f^2)$ را تجربه کنند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، بخش‌هایی از نمودار که دارای شیب منفی هستند اشاره به فرکانس طبیعی پسر و یا مد فرکانسی فرد و قسمت‌های دارای شیب مثبت مربوط به فرکانس طبیعی پیشرو¹ یا مود فرکانسی زوج می‌باشد. لازم به ذکر است برای استخراج صحیح نتایج و مطابقت قابل قبول با نتایج ارائه شده توسط یانگ و همکاران [29]، از شش مود ارتعاشاتی در روش گالرکین استفاده شده است.

5-2- اثر پارامتر گرادیان مدول الاستیک

در این بخش فرض می‌شود که مدول الاستیک سیستم به‌طور خطی در راستای طولی تیر درجه‌بندی شده است. در شکل‌های 3 (الف-د) تغییرات فرکانس پایه‌ای سیستم برحسب تغییرات سرعت محوری سیستم به ازای سرعت‌های دورانی مختلف، هنگامی‌که $P=0$ است، رسم شده است. همچنان

1 Backward

1 Forward

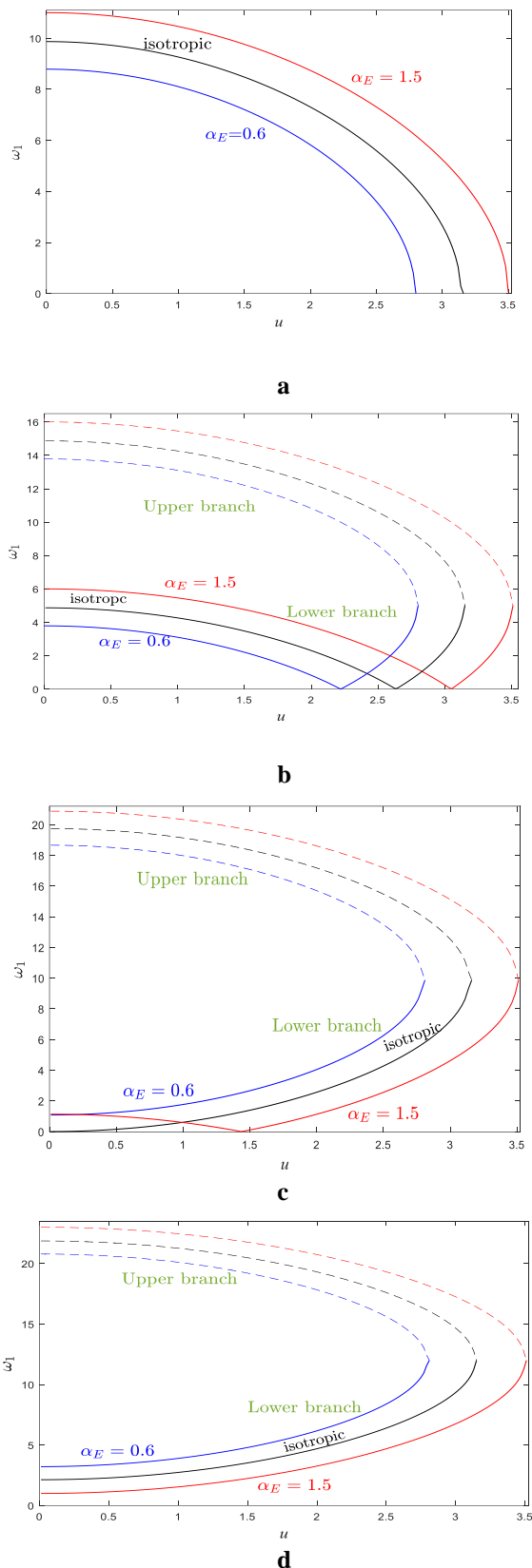


Fig.3 Fundamental frequency of the system based on axial velocity for $\zeta=0, P=0, \alpha_p=1$ (a) $\Omega=0$ (b) $\Omega=5$ (c) $\Omega=9.87$ (d) $\Omega=12$

شکل 3 فرکانس پایه‌ای سیستم برحسب سرعت محوری به ازای $P=0, \alpha_p=1, \zeta=0$ (الف) $\Omega=0$ (ب) $\Omega=5$ (ج) $\Omega=9.87$ (د) $\Omega=12$

فرکانس‌های طبیعی رخ می‌دهد. در نتیجه فرکانس پایه‌ای سیستم به دو شاخه مجزای چرخش پیشرو (شاخه پایینی) و چرخش پیشرو (شاخه بالایی) تقسیم می‌شود که این مطلب قبلاً در [40] اثبات شده است. در این حالت، حرکت‌های چرخشی پیشرو و پسرو برای دو مود اول به نوبت اتفاق می‌افتند و یک موج عرضی با پیکربندی فضایی در طول ارتعاشات ارائه می‌شود. اثر تغییرات سرعت محوری بر فرکانس پایه‌ای سیستم، وابسته به مقدار سرعت دورانی سیستم است. به طوری که مطابق شکل 3-ب، در سرعت‌های دورانی کوچک (مثلاً $\Omega=5$)، ابتدا با افزایش سرعت محوری تیر فرکانس‌های پایه‌ای پسرو و پیشرو سیستم به آرامی کاهش می‌یابند تا در یک سرعت محوری مشخص، فرکانس پایه‌ای پسرو صفر می‌شود و سیستم پدیده کماتش را تجربه می‌کند. بعد از آن، بلافاصله با افزایش سرعت محوری، سیستم مجدداً پایدار می‌شود. در این شرایط با افزایش بیشتر سرعت محوری، فرکانس پسرو روند افزایشی پیدا می‌کند، در حالی که فرکانس شاخه بالایی همچنان کاهش می‌یابد. این روند ادامه پیدا می‌کند تا در سرعت محوری فلاتر، شاخه‌های پایینی و بالایی فرکانس با یکدیگر تلاقی پیدا می‌کنند و باهم یکی می‌شوند و یک فلاتر کوپلینگ دوجهته اتفاق می‌افتد. در نتیجه، سیستم دچار پدیده فلاتر می‌شود و یک کوپلینگ فلاتر بین مختصات عمومی در دو جهت عرضی اتفاق می‌افتد. در این حالت جابجایی‌های سیستم با نوسان ناپایدار می‌شوند. بر اساس این شکل، با افزایش α_E ، سرعت‌های محوری متناظر پدیده‌های دایورژنس و فلاتر هر دو افزایش می‌یابند. همچنین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای سرعت‌های محوری کمتر از سرعت محوری دایورژنس ($u < u_d$)، تغییرات محوری مواد اثر یکسانی بر شاخه‌های پایینی و بالایی فرکانس پایه‌ای سیستم دارد، به طوری که با افزایش α_E ، فرکانس‌های پیشرو و پسرو سیستم افزایش می‌یابند؛ اما به ازای $u > u_d$ ، این اثر بر شاخه پایینی فرکانس پایه‌ای سیستم معکوس می‌شود. در سرعت‌های دورانی متوسط، سرعت محوری دایورژنس سیستم ایزوتروپیک به مقدار صفر نزدیک می‌شود. به‌طور مثال همان‌طور که در شکل 3-ج مشاهده می‌شود، به ازای $\Omega=9.87$ ، سرعت محوری دایورژنس سیستم ایزوتروپیک برابر صفر می‌شود. در نتیجه به ازای $\alpha_E > 1$ ، از آنجاکه در سیستم دایورژنس رخ می‌دهد، رفتار دینامیکی سیستم و اثر گرادیان محوری مواد بر آن مشابه شکل 3-ب است؛ اما به ازای $\alpha_E < 1$ ، در سیستم ناپایداری دایورژنس رخ نمی‌دهد و سیستم فقط ناپایداری فلاتر را تجربه می‌کند. در این حالت شاخه‌های پایینی و بالایی، با افزایش سرعت محوری، به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. در سرعت‌های دورانی زیاد (مثلاً $\Omega=12$)، در سیستم دایورژنس رخ نمی‌دهد (شکل 3-د). در این حالت، با افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک، فرکانس‌های پایه‌ای پسرو و پیشرو، به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. بر اساس شکل‌های 3 الف-د، با افزایش سرعت دورانی سیستم، شاخه‌های فرکانس پایه‌ای سیستم به سمت مقادیر فرکانس‌های بیشتر جابجا می‌شوند. در نتیجه سرعت دایورژنس سیستم با افزایش سرعت دورانی سیستم کاهش می‌یابد تا اینکه در سرعت‌های دورانی زیاد، در سیستم دایورژنس رخ نمی‌دهد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که تغییرات سرعت دورانی، بر روی سرعت فلاتر سیستم اثری ندارد، در حالی که با افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک می‌توان هردوی سرعت‌های دایورژنس و فلاتر را به‌طور هم‌زمان به تأخیر انداخت.

فرکانس‌های پایه‌ای پسترو و پیشرو سیستم کاهش می‌یابند، درحالی‌که به ازای سرعت‌های دورانی بیشتر از سرعت دورانی دایورژنس ($\Omega > \Omega_d$)، فرکانس پایه‌ای پسترو با کاهش پارامتر گرادیان مدول الاستیک روند افزایشی دارد. مطابق شکل 5-ب، هنگامی‌که سرعت محوری سیستم افزایش می‌یابد (مثلاً $u=3$)، در سیستم ایزوتروپیک فرکانس پایه‌ای پیشرو کاهش می‌یابد؛ اما فرکانس پایه‌ای پسترو سیستم به ازای $\Omega < \Omega_d$ کاهش می‌یابد، درحالی‌که مقدار آن به ازای $\Omega > \Omega_d$ افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در یک سرعت چرخشی یکسان، با افزایش سرعت محوری فرکانس پایه‌ای پیشرو سیستم کاهش می‌یابد؛ اما فرکانس پایه‌ای پسترو سیستم به ازای سرعت‌های دورانی کمتر و بیشتر از سرعت دورانی دایورژنس، به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت محوری سرعت دورانی دایورژنس سیستم کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش سرعت محوری سیستم، شاخه‌های فرکانس پایه‌ای سیستم بعد از دایورژنس موازی یکدیگر هستند. بر طبق شکل 5 (الف-ب)، هنگامی شاخه‌های بالایی و پایینی فرکانس بر روی هم منطبق نباشند، سرعت چرخشی فلاتر سیستم از نظر تئوری بی‌نهایت است. در این حالت نیز با کاهش α_E ، سرعت دورانی دایورژنس و فرکانس‌های پایه‌ای پیشرو سیستم کاهش می‌یابند. همچنین با کاهش α_E ، فرکانس پسترو سیستم به ازای $\Omega < \Omega_d$ و $\Omega > \Omega_d$ به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. مطابق شکل‌های 5 (الف-ب)، با تغییرات α_E ، شاخه‌های فرکانس پایه‌ای سیستم به صورت موازی جابجا می‌شوند. ضمناً همان‌طور که در شکل 5-ب مشاهده می‌شود، با کاهش پارامتر گرادیان مدول الاستیک (مثلاً $\alpha_E=0.6$)، در رفتار دینامیکی سیستم، ناپایداری دایورژنس مشاهده نمی‌شود. در این حالت شاخه‌های پسترو و پیشرو بر روی هم منطبق می‌شوند و سیستم پایداری خود را به ازای تمامی سرعت‌های دورانی از طریق ناپایداری فلاتر از دست می‌دهد. بر طبق شکل 5 (الف-ب)، هنگامی‌که شاخه‌های بالایی و پایینی فرکانس بر روی هم منطبق نباشند، سرعت چرخشی فلاتر سیستم از نظر تئوری بی‌نهایت است. همچنین بر اساس شکل‌های 3 و 5 می‌توان نتیجه گرفت که در مقایسه با حالت ایزوتروپیک، با تغییرات پارامتر گرادیان مدول الاستیک، می‌توان روند تکاملی پایداری سیستم را تغییر داد. نقشه پایداری سیستم در صفحه Ω - P در شکل 6 به ازای $u=1$ رسم شده است و محدوده‌های مربوط به دایورژنس و فلاتر نشان داده شده‌اند. برای سیستم ایزوتروپیک، به ازای سرعت‌های دورانی کم (مثلاً $\Omega < 9.1$)، با افزایش P ، ابتدا سیستم پایدار است و در یک نیروی محوری مشخص متحمل ناپایداری دایورژنس می‌شود و سپس مجدداً پایدار می‌شود. به عبارت دیگر، برای سرعت‌های دورانی نسبتاً کم، ناپایداری اولیه همیشه از نوع دایورژنس است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، دو ناحیه پایدار توسط مرز ناپایداری دایورژنس از هم جدا می‌شوند و پدیده دایورژنس فقط بر روی این مرز اتفاق می‌افتد و ناحیه ناپایداری دایورژنس وجود ندارد. به‌طور فیزیکی، در این حالت تیر در هردو راستای عرضی کماتش می‌کند. همچنین از آنجایی‌که سیستم کانسرواتیو است، ناپایداری اولیه که در سیستم رخ می‌دهد، دایورژنس است. با افزایش بیشتر نیروی محوری فشاری، سیستم به ازای $P > 8.9$ از طریق ناپایداری فلاتر، پایداری خود را از دست می‌دهد و دیگر پایداری خود را به دست نمی‌آورد. به عبارت دیگر، در سمت راست خطوط قائم نشان داده شده، سیستم متحمل ناپایداری فلاتر می‌شود. همچنین به ازای سرعت‌های دورانی زیاد (مثلاً $\Omega > 9.1$)، سیستم ناپایداری دایورژنس را تجربه نمی‌کند و با افزایش نیروی فشاری محوری ابتدا پایدار است و سپس در سیستم ناپایداری فلاتر رخ خواهد داد. سیستم ایزوتروپیک، به ازای نیروهای محوری فشاری کم (مثلاً $P < 8.9$) می‌تواند پایدار باشد و

نقشه پایداری سیستم در صفحه u - P در شکل 4 به ازای $\Omega=5$ رسم شده است و سرعت‌های مربوط به دایورژنس و فلاتر نشان داده شده‌اند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که سیستم به ازای تمامی سرعت‌های کمتر از اولین سرعت محوری دایورژنس ($u < u_d^1$) پایدار است. همچنین فراتر از دومین سرعت محوری فلاتر ($u < u_d^2$) سیستم ناپایداری فلاتر را تجربه خواهد کرد. از آنجاکه با افزایش نیروی محوری فشاری سختی مؤثر سیستم کاهش می‌یابد، در نتیجه مناطق پایداری سیستم کوچک می‌شوند و مقاومت سیستم به دایورژنس و فلاتر کم می‌شود. به بیان دیگر، افزایش نیروی محوری فشاری، جابجایی مرزهای ناپایداری فلاتر و دایورژنس به سمت سرعت‌های کمتر را نتیجه می‌دهد. همچنین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک، نقش تعیین‌کننده‌ای در جابجایی مرزهای پایداری دایورژنس و فلاتر به سرعت‌های بالاتر ایفا می‌کند. در مقایسه با سیستم ایزوتروپیک، سرعت‌های محوری دایورژنس و فلاتر با افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک افزایش می‌یابند و مناطق پایداری منبسط می‌شوند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اثر گرادیان محوری بر سرعت‌های دایورژنس و فلاتر اول محسوس‌تر است.

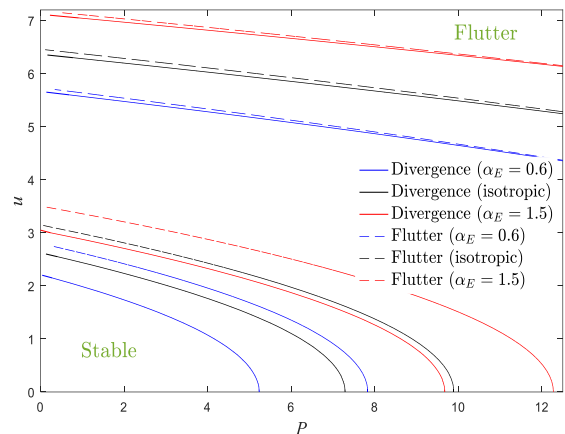


Fig.4 Axial velocities of the divergence and flutter of the system versus the axial load for $\xi=0$, $\Omega=5$, $\alpha p=1$

شکل 4 سرعت‌های محوری دایورژنس و فلاتر سیستم برحسب نیروی محوری به ازای $\Omega=5$, $\alpha p=1$, $\xi=0$

در شکل‌های 5 (الف-ب)، فرکانس پایه‌ای پسترو و پیشرو تیر مدرج محوری برحسب سرعت چرخشی به ازای سرعت‌های محوری مختلف هنگامی‌که $P=0$ است رسم شده است. بر اساس شکل 5-الف، هنگامی‌که سیستم ایزوتروپیک است و تنها دارای حرکت دورانی است ($u=0$)، با افزایش سرعت دورانی، فرکانس پایه‌ای پیشرو، افزایش می‌یابد، درحالی‌که فرکانس پایه‌ای پسترو کاهش می‌یابد. این روند ادامه می‌یابد تا هنگامی‌که فرکانس پایه‌ای پسترو در یک سرعت دورانی مشخص صفر می‌شود و سیستم دچار دایورژنس می‌شود. سرعت دورانی متناظر، سرعت دورانی دایورژنس (Ω_d) نامیده می‌شود. بعد از این نقطه عطف، با افزایش بیشتر سرعت دورانی سیستم، فرکانس‌های پسترو و پیشرو سیستم هر دو افزایش می‌یابند و شاخه‌های فرکانسی پایینی و بالایی سیستم باهم موازی می‌شوند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، با کاهش پارامتر گرادیان مدول الاستیک، سرعت دورانی دایورژنس سیستم کاهش می‌یابد. همچنین، به ازای سرعت‌های دورانی کمتر از سرعت دورانی دایورژنس ($\Omega < \Omega_d$)، با کاهش α_E ، هردوی

هنگامی که $P=0$ است، در شکل 10 رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت.

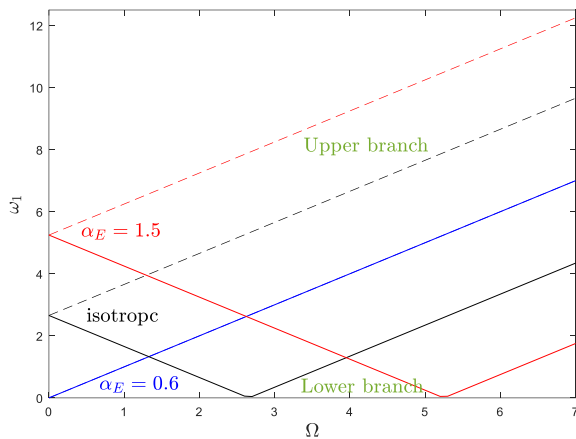
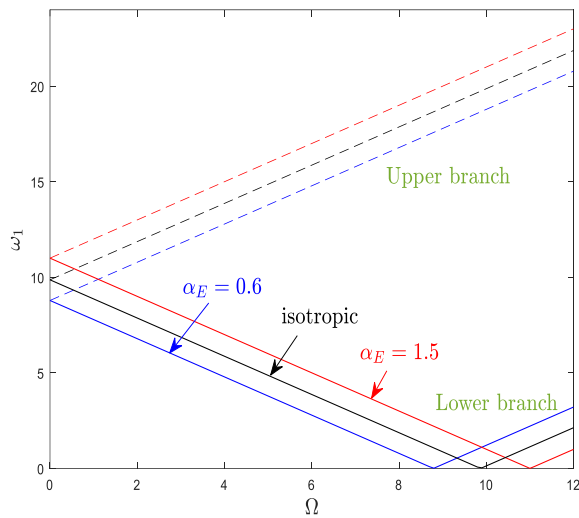


Fig.5 Fundamental frequency of the system versus rotating velocity for $P=0, \zeta=0, \alpha_p=1$ (a) $u=0$ (b) $u=3$

شکل 5 فرکانس پایه‌ای سیستم بر حسب سرعت دورانی به ازای $P=0, \alpha_p=1, \zeta=0$ (الف) $u=0$ (ب) $u=3$

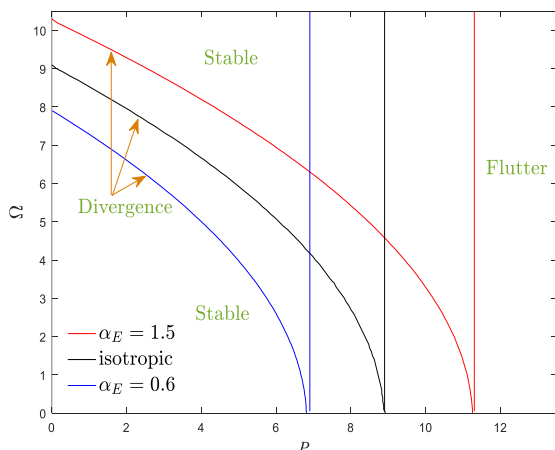


Fig.6 Stability map of the system in Ω - P plane for $\zeta=0, u=1, \alpha_p=1$

شکل 6 نقشه پایداری سیستم در صفحه Ω - P به ازای $u=1, \alpha_p=1, \zeta=0$

ناپایداری دایورژنس را تجربه کند، اما به ازای $P > 8.9$ ، تنها ناپایداری فلاتر را متحمل می‌شود. نقشه پایداری نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی تیر و در نتیجه افزایش اثرات ژبروسکوپیک در سیستم، نواحی پایداری گسترش می‌یابند. بر اساس شکل 6، با افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک، مرزهای دایورژنس به سمت نیروهای محوری فشاری و سرعت‌های دورانی بیشتر جابجا می‌شوند. به بیان دیگر، با افزایش α_E ، ناحیه پایداری اولیه برای سیستم بزرگ‌تر می‌شود. از آنجاکه افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک خاصیت افزایش سختی دارد، در نتیجه محدوده فلاتر نیز به سمت نیروهای محوری بزرگ‌تر جابجا می‌شوند و پدیده فلاتر در نیروهای محوری فشاری بزرگ‌تر رخ می‌دهد. بر اساس شکل‌های 3-6، افزایش سرعت دورانی و سرعت محوری در سیستم، به ترتیب موجب کاهش سرعت محوری دایورژنس و سرعت دورانی دایورژنس می‌شود. سرعت دورانی دایورژنس سیستم بر حسب پارامتر گرادیان مدول الاستیک در شکل 7 نشان داده شده است. منحنی‌های سرعت دورانی دایورژنس سیستم به ازای تمامی سرعت‌های محوری با افزایش α_E ، افزایشی هستند. با افزایش سرعت محوری سیستم، سرعت‌های دورانی دایورژنس سیستم کاهش می‌یابند. همچنین برای سرعت‌های محوری بزرگ، به ازای مقادیر کوچک α_E ، سرعت دورانی دایورژنس ناپدید می‌شوند. در این حالت تیر متحرک محوری حتی در نبود حرکت چرخشی، در شرایط فلاتر قرار دارد که با افزایش سرعت محوری سیستم، محدوده رخداد ناپایداری فلاتر نیز افزایش می‌یابد.

5-3- اثر پارامتر گرادیان چگالی

در این بخش فرض می‌شود که چگالی سیستم به‌طور خطی در راستای طولی تیر درجه‌بندی شده است. برای بررسی اثرات تغییرات محوری چگالی بر رفتار ارتعاشاتی سیستم، تغییرات فرکانس پایه‌ای پشرو و پیشرو سیستم بر حسب سرعت محوری به ازای پارامترهای گرادیان چگالی مختلف در نبود نیروی محوری فشاری، هنگامی که $\Omega=9.5$ است، در شکل 8 رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش α_p ، فرکانس‌های پایه‌ای پشرو سیستم به ازای تمامی سرعت‌های محوری کاهش می‌یابد. همچنین، برای سرعت‌های محوری کمتر از سرعت محوری دایورژنس ($u < u_d$)، با افزایش پارامتر گرادیان چگالی فرکانس پایه‌ای پشرو کاهش می‌یابد، در حالی که برای $u > u_d$ این روند معکوس می‌شود. ضمناً همان‌طور که مشخص است با افزایش α_p ، سرعت‌های محوری دایورژنس و فلاتر سیستم کاهش می‌یابد. تغییرات فرکانس پایه‌ای سیستم بر حسب سرعت دورانی به ازای پارامترهای گرادیان چگالی مختلف هنگامی که $u=2.5$ است، در شکل 9 رسم شده است. همان‌طور که مشخص است، با تغییر چگالی سیستم در راستای طولی، منحنی‌های فرکانس پایه‌ای سیستم همچنان موازی باقی می‌مانند. بر اساس این شکل، با افزایش α_p ، فرکانس پایه‌ای پشرو سیستم به ازای تمامی مقادیر Ω کاهش می‌یابد. همچنین برای $\Omega < \Omega_d$ فرکانس پایه‌ای پشرو سیستم با افزایش α_p کاهش می‌یابد، در حالی که برای $\Omega > \Omega_d$ این روند معکوس می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت پارامترهای گرادیان چگالی و مدول الاستیک اثرات معکوس بر رفتار ارتعاشاتی سیستم دارند. باهدف بررسی دقیق‌تر رفتار دینامیکی سیستم به ازای تغییرات α_p ، تغییرات سرعت دورانی دایورژنس سیستم بر حسب پارامتر گرادیان چگالی برای سرعت‌های محوری مختلف

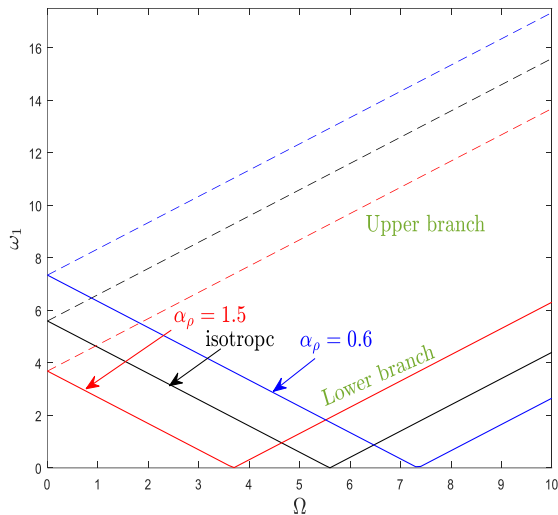


Fig.9 Fundamental frequency of the system versus the rotating velocity for $\zeta=0, P=0, u=2.5, \alpha_E=1$

شکل 9 فرکانس پایه‌ای سیستم بر حسب سرعت دورانی به ازای $P=0, u=2.5, \alpha_E=1, \zeta=0$

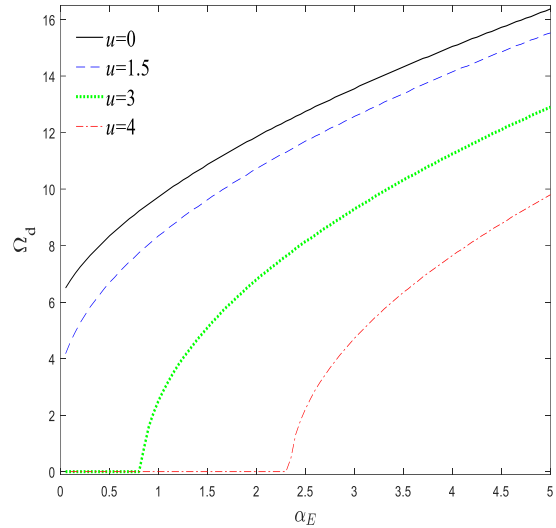


Fig.7 Divergence rotating velocity of the axially graded beam based on elastic modulus gradient parameter for $\zeta=0, P=0, \alpha_\rho=1$

شکل 7 سرعت دورانی دایورژنس تیر مدرج محوری بر حسب پارامتر گرادیان مدول الاستیک به ازای $P=0, \alpha_\rho=1, \zeta=0$

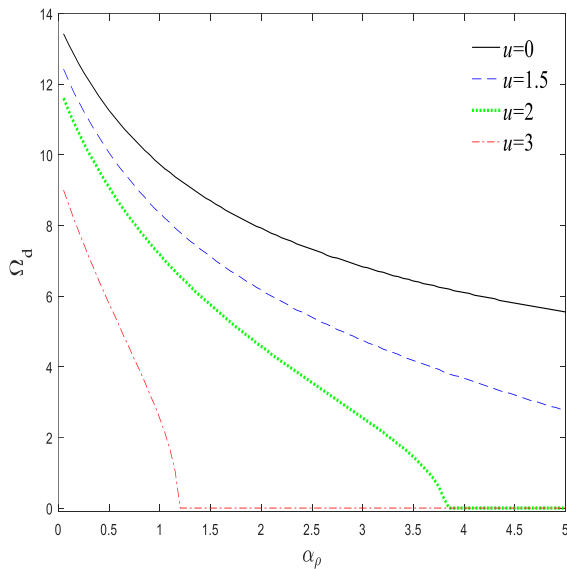


Fig.10 Divergence rotating velocity of the axially graded beam versus the density gradient parameter for $\zeta=0, P=0, \alpha_E=1$

شکل 10 سرعت دورانی دایورژنس تیر مدرج محوری بر حسب پارامتر گرادیان چگالی به ازای $P=0, \alpha_E=1, \zeta=0$

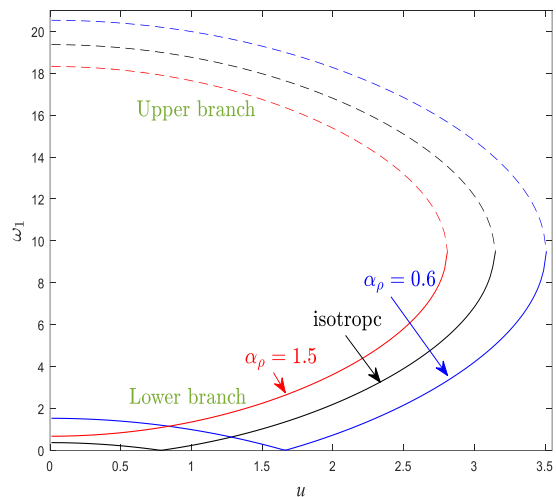


Fig.8 Fundamental frequency of the system versus axial velocity for $\zeta=0, P=0, \alpha_E=1, \Omega=9.5$

شکل 8 فرکانس پایه‌ای سیستم بر حسب سرعت محوری به ازای $\Omega=9.5, P=0, \alpha_E=1, \zeta=0$

برای ارزیابی بهتر اثر گرادیان چگالی در راستای طولی سازه بر دینامیک سیستم، مرزهای دایورژنس به ازای α_ρ های مختلف هنگامی که $P=0$ است، رسم شده است و با حالت ایزوتروپیک مقایسه شده است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است، در مقایسه با سیستم ایزوتروپیک، با افزایش پارامتر گرادیان چگالی پدیده دایورژنس در سرعت‌های محوری و دورانی کمتر رخ خواهد داد و برعکس. پارامتر گرادیان چگالی در ماتریس‌های جرم، دمپینگ و سختی نقش دارد. با توجه شکل‌های 8-11، می‌توان نتیجه گرفت اثر افزودگی جرم پارامتر گرادیان چگالی بر رفتار دینامیکی سیستم غالب است و افزایش پارامتر گرادیان چگالی اثر ناپایدارکننده بر سیستم دارد. بر اساس شکل‌های 3-11، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سختی ساختاری بعلاوه کاهش نسبت جرمی، روش‌های مؤثر برای بهبود رفتار پایداری سیستم‌های

با افزایش سرعت محوری سیستم، سرعت دورانی دایورژنس سیستم کاهش می‌یابد. این موضوع اشاره به آن دارد که کاهش سرعت محوری، منجر به بزرگ شدن ناحیه پایداری سیستم می‌شود، مخصوصاً در α_ρ های بزرگ. به‌عبارت‌دیگر، تیرهای چرخان بدون حرکت محوری، پایداری بیشتری نسبت به تیرهای تحت حرکت چرخشی و محوری هم‌زمان دارند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت محوری، در α_ρ های بزرگ سرعت دورانی دایورژنس سیستم صفر می‌شود. در این حالت در سیستم ناپایداری دایورژنس رخ نمی‌دهد و به ازای تمامی سرعت‌های دوران، ناپایداری فلاتر رخ خواهد داد. یک نکته مهم دیگر در این شکل این است که برعکس نمودارهای سرعت دورانی دایورژنس در صفحه $\Omega_d-\alpha_E$ ، منحنی‌ها در صفحه $\Omega_d-\alpha_\rho$ با افزایش پارامتر گرادیان چگالی کاهش می‌باشند. در نتیجه می‌توان گفت پارامتر گرادیان چگالی بر پایداری سیستم اثر کاهش‌دهنده دارد.

چگالی و مدول الاستیک به ازای $u=1, \Omega=4, P=0, \zeta=0$ در شکل 13 اثر توزیع‌های مختلف مشخصات مواد بر مرزهای دایورژنس تیر مدرج محوری هنگامی که $\Omega=2$ و $P=0$ است، نشان داده شده است. طبق انتظار مرزهای دایورژنس سیستم به ازای $\alpha_E=1$ و یا $\alpha_\rho=1$ بر روی هم منطبق می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم در حالت تغییرات محوری چگالی و مدول الاستیک، به ترتیب در حالت‌های توزیع نمایی و خطی پایدارتر است. به بیان دیگر، در حالت چگالی متغیر، توزیع نمایی، ناحیه پایداری بزرگ‌تری را پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که در حالت مدول الاستیک متغیر، توزیع خطی منجر به یک سیستم پایدارتر خواهد بود. همچنین افزایش α_E و کاهش α_ρ منجر به یک سیستم پایدارتر می‌شود.

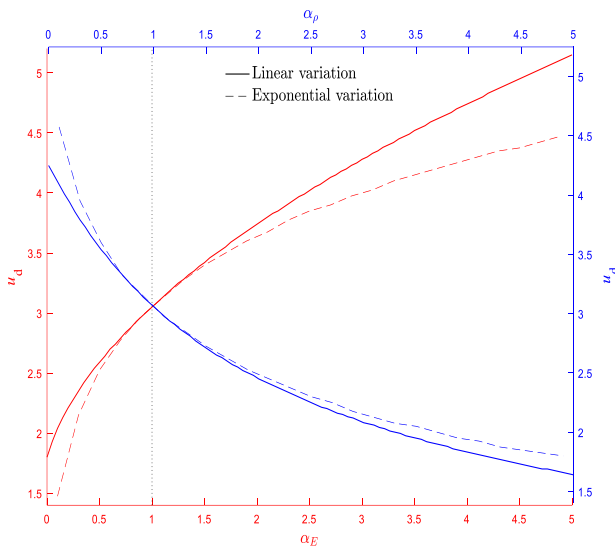


Fig.13 Divergence axial velocity of the axially graded beam versus the density and elastic modulus gradient parameters for $\zeta=0, P=0, \Omega=2$

شکل 13 سرعت محوری دایورژنس تیر مدرج محوری برحسب پارامترهای گرادیان چگالی و مدول الاستیک به ازای $\Omega=2, P=0, \zeta=0$

5-5- اثر تغییرات هم‌زمان چگالی و مدول الاستیک

فرض می‌شود که چگالی و مدول الاستیک سیستم به‌طور هم‌زمان $(\alpha_\rho=\alpha_E=\alpha)$ به‌صورت خطی در راستای طولی تیر درجه‌بندی شده‌اند. در شکل 14، تغییرات سرعت محوری دایورژنس سیستم برحسب پارامتر گرادیان (α) برای بارهای محوری مختلف ترسیم شده است. همان‌طور که واضح است، مرزهای دایورژنس سیستم که به‌صورت عددی محاسبه شده‌اند، با نتایج حل تحلیلی مطابقت خوبی دارد. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش نیروی محوری فشاری و یا افزایش نیروی کششی، مناطق پایداری سیستم بزرگ می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت نیروی فشاری افزایش پارامتر گرادیان خاصیت پایداری‌کننده بر سیستم دارد، درحالی‌که در حالت نیروی کششی، افزایش پارامتر گرادیان خاصیت ناپایدارکننده بر سیستم دارد. همچنین، یک تغییر سریع در سرعت محوری دایورژنس سیستم در مقادیر کم پارامتر گرادیان مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، به ازای مقادیر بزرگ α ، سرعت محوری دایورژنس سیستم، حساسیت خود را نسبت به نیروی محوری از دست می‌دهد و مرزهای پایداری به ازای نیروهای محوری مختلف، باهم موازی می‌شوند. بنابراین، می‌توان با تعیین هم‌زمان گرادیان

بایزروسکوپی و روشی برای به تأخیر انداختن شروع ناپایداری‌های استاتیکی و دینامیکی، هم‌زمان در سیستم هستند.

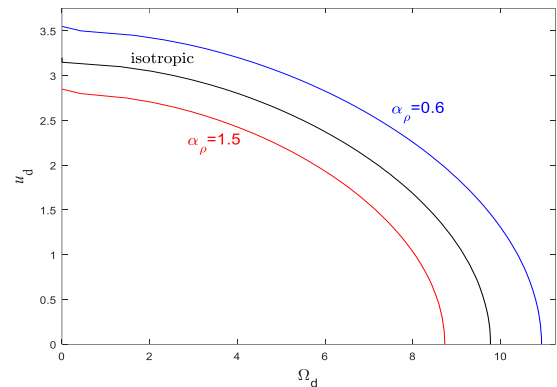


Fig.11 Effect of density gradient parameter on the divergence boundaries of the system for $\zeta=0, P=0, \alpha_E=1$

شکل 11 اثر پارامتر گرادیان چگالی بر مرزهای دایورژنس سیستم به ازای $P=0, \alpha_E=1, \zeta=0$

5-4- اثر پروفایل توزیع مشخصات مادی

در این بخش فرض می‌شود که چگالی و مدول الاستیک سیستم جداگانه به‌صورت خطی یا نمایی در راستای طولی تیر درجه‌بندی شده‌اند. در شکل 12، فرکانس‌های پایه‌ای پسر و پیشرو سیستم با توزیع‌های نمایی و خطی مشخصات مادی برحسب پارامترهای گرادیان چگالی و مدول الاستیک هنگامی که $u=1$ و $\Omega=4$ رسم شده‌اند. همان‌طور که مشخص است فرکانس پایه‌ای سیستم با افزایش α_E و α_ρ به ترتیب افزایشی و کاهشی هستند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که هنگامی که $\alpha_E=1$ و یا $\alpha_\rho=1$ است، سیستم به حالت ایزوتروپیک کاهش می‌یابد، درنتیجه در این حالت فرکانس‌های طبیعی برای توزیع‌های نمایی و خطی مشخصات مادی سیستم باهم برابر هستند. یک ویژگی مهم دیگر در این نمودار این است که در مقایسه با تغییرات نمایی مدول الاستیک، فرکانس‌های پایه سیستم به ازای تغییرات خطی مدول الاستیک بزرگ‌تر هستند. درحالی‌که فرکانس‌های پایه‌ای سیستم در حالت تغییرات نمایی چگالی در مقایسه با تغییرات خطی چگالی بزرگ‌تر هستند.

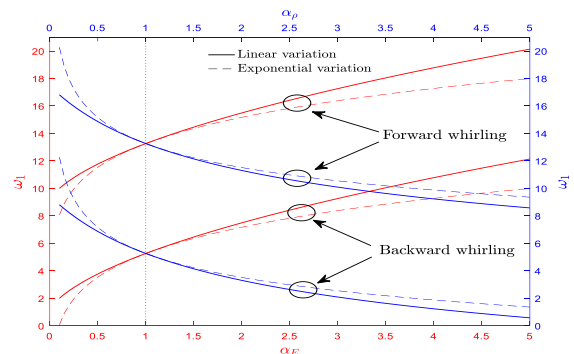


Fig.12 Fundamental frequencies of the axially graded beam versus the density and elastic modulus gradient parameters for $\zeta=0, P=0, u=1, \Omega=4$

شکل 12 فرکانس‌های پایه‌ای تیر مدرج محوری برحسب پارامترهای گرادیان

است. اگر در سیستم ناپایداری دایورژنس رخ دهد، افزایش پارامتر گرادیان مدول الاستیک و کاهش پارامتر گرادیان چگالی، فرکانس پایه‌ای پسر را در سرعت‌های کمتر و بیشتر از سرعت محوری دایورژنس به ترتیب افزایش و کاهش می‌دهند، در غیر این صورت، منجر به کاهش فرکانس پایه‌ای پسر و سیستم می‌شود. در حالت چگالی متغیر و مدول الاستیک متغیر، به ترتیب توزیع‌های نمایی و خطی منجر به فرکانس‌های بزرگ‌تر و سیستم پایدارتر می‌شوند. همچنین، فهمیده شد که پارامترهای گرادیان چگالی و مدول الاستیک، به ترتیب اثرات ناپایدارکننده و پایدارکننده بر سیستم دارند. به بیان دیگر، در مقایسه با تیرهای ایزوتروپیک، تیرهای مدرج محوری هنگامی که چگالی و مدول الاستیک در راستای طولی سیستم به ترتیب کاهش و افزایش یابند، پایدارتر خواهند بود. نتیجه پژوهش حاضر نشان داد که تغییرات سرعت دورانی، تأثیری بر آستانه ناپایداری فلاتر سیستم ندارد. نشان داده شد که با تنظیم درست تغییرات محوری مواد می‌توان مرز ناپایداری دایورژنس را حذف نمود و محدوده‌های ناپایداری فلاتر را به تعویق انداخت. نتایج نشان دادند که با تعیین هم‌زمان گرادیان چگالی و مدول الاستیک در راستای طولی می‌توان اثرات ناپایدارکننده نیروی محوری فشاری را تقلیل داد. مدل‌سازی و نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در طراحی سیستم‌های باژبروسکوپیک غیرهمگن مفید باشد.

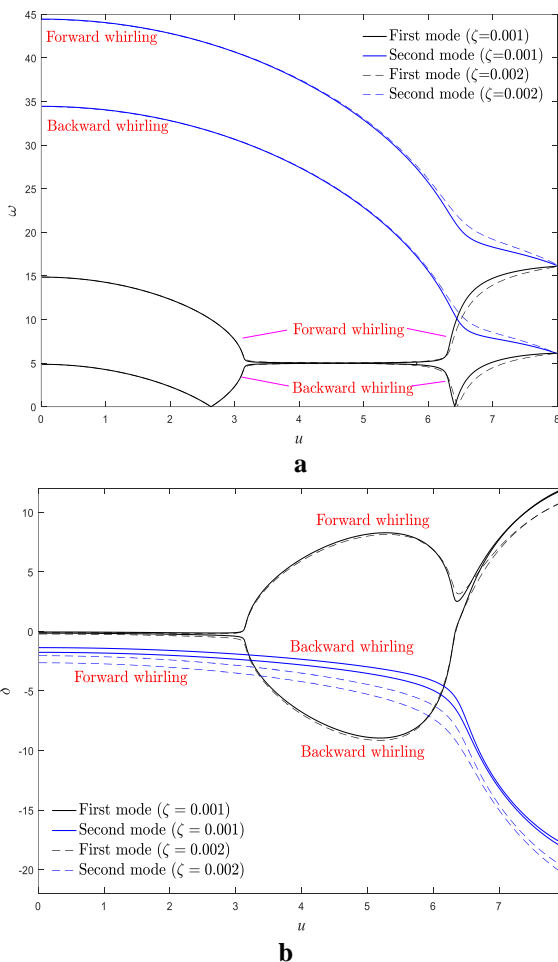


Fig.15 (a) Real and (b) imaginary parts of two first natural frequencies based on axial velocity for $P=0, u=2, \Omega=5, \zeta=0.001$

شکل 15 الف) قسمت حقیقی و (ب) مجازی دو فرکانس طبیعی اول بر حسب سرعت محوری به ازای $P=0, \zeta=0.001, \Omega=5$

چگالی و مدول الاستیک در راستای طولی اثرات ناپایدارکننده نیروی محوری فشاری را تقلیل داد.

5-6- اثر ویسکوزیته

در نهایت باهدف بررسی اثر مواد ویسکوالاستیک بر دینامیک سیستم، قسمت موهومی و حقیقی دو جفت فرکانس طبیعی اول ارتعاشات (شامل فرکانس‌های پسر و پیشرو) تیر بر حسب سرعت متحرک محوری در شکل 15 الف-ب) به ازای دو مقدار مختلف از پارامتر ویسکوالاستیک (ζ) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش خاصیت ویسکوالاستیک مواد، سرعت بحرانی دایورژنس سیستم تغییر نمی‌کند که این ویژگی با راه‌حل تحلیلی ارائه‌شده در پیوست، قابل‌اثبات است. از آنجایی که سیستم ویسکوالاستیک، ناپایستار است، فرکانس‌های طبیعی سیستم قبل از رخداد دایورژنس مختلط می‌شوند، مخصوصاً فرکانس‌های موده‌های بالاتر. براساس شکل 15-ب، هنگامی که سیستم ویسکوالاستیک باشد، قسمت موهومی منحنی‌های فرکانسی، تقارن خود را نسبت به محور x از دست می‌دهند. ضمناً همچنان که مشاهده می‌شود، سیستم ویسکوالاستیک، روند تکامل پایداری "پایدار-فلاتر مود اول-دایورژنس مود دوم" را تجربه می‌کند. در نتیجه می‌توان گفت، در مقایسه با سیستم ایزوتروپیک، مواد ویسکوالاستیک روند تکامل پایداری سیستم را تغییر می‌دهند. در مجموع می‌توان گفت که پایداری کیفی تیرهای متحرک محوری به اثرات مواد ویسکوالاستیک سیستم وابستگی دارد، درحالی‌که گرادیان محوری مواد، نقش قابل‌توجهی در تعیین مقدار کمی سرعت بحرانی و فرکانس‌های طبیعی سیستم دارد.

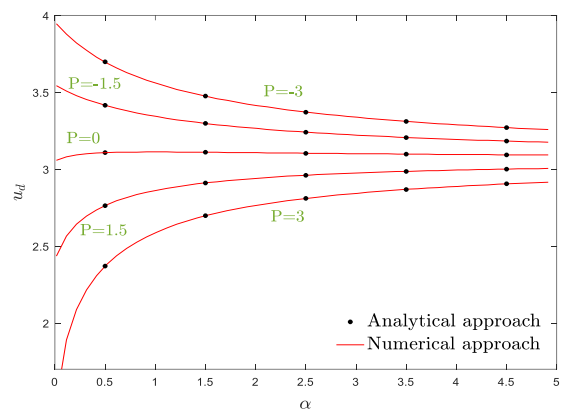


Fig.14 Divergence axial velocity of the system versus gradient parameter for $\zeta=0, \Omega=1$

شکل 14 سرعت محوری دایورژنس سیستم بر حسب پارامتر گرادیان به ازای $\Omega=1, \zeta=0$

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک تحقیق مفصل بر روی دینامیک سازه‌های تیرهای مدرج محوری با حرکت محوری و دورانی تحت بارمحوری خارجی انجام شده است. روش‌های عددی و تحلیلی به کار برده شده‌اند تا شرایط ناپایداری دایورژنس و فلاتر سیستم مطالعه شود. اثر پارامترهای مختلف مانند تغییرات محوری خصوصیات مادی، نیروی محوری، سرعت محوری و دورانی بر رفتار ارتعاشاتی سیستم بررسی شد. نتایج نشان دادند که با افزایش مدول الاستیک و کاهش چگالی در راستای طولی سیستم، فرکانس پایه‌ای پیشرو سیستم افزایش می‌یابد. اثر گرادیان محوری مواد بر فرکانس پایه‌ای پسر و سیستم پیچیده‌تر

7- پیوست

هنگامی که سیستم سرعت محوری یا دورانی بحرانی دارد، کمترین فرکانس طبیعی سیستم یعنی فرکانس پایه‌ای پسر سیستم صفر می‌شود و سیستم سختی خود را به ازای مود اصلی از دست می‌دهد [41]. به‌منظور استخراج سرعت بحرانی مربوط به مود اول، معادله (۱۹) با در نظر گرفتن یک مود ($r=s=1$)، به معادله زیر کاهش می‌یابد [42]:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_1(\tau) + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1(\tau) + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \mathbf{q}_1(\tau) = 0 \quad (a-1)$$

با تغییرات خطی مشخصات مادی می‌توان نوشت:

$$k_{11} = \pi^4(\alpha_E + 1) - \pi^2((\alpha_p + 1)v^2 + 2P) - v^2(\alpha_p - 1) - \Omega^2(\alpha_p + 1) \quad (a-2)$$

$$k_{12} = 2v\alpha_p - 4\Omega \quad (a-3)$$

$$k_{13} = 2v(\alpha_p - 2) + 4\Omega \quad (a-4)$$

$$k_{22} = \pi^4(\alpha_E + 1) - \pi^2((\alpha_p + 1)v^2 + 2P) - v^2(\alpha_p - 1) - \Omega^2(\alpha_p + 1) \quad (a-5)$$

بر طبق تئوری پایداری سیستم‌های خطی ژیروسکوپیک [43]، هنگامی که مقادیر ویژه سیستم صفر شود، درمیان ماتریس سختی صفر می‌شود [44]. در نتیجه سرعت محوری (یا دورانی) بحرانی سیستم را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21} = 0 \quad (a-6)$$

5- مراجع

- [12] Chan, M. L., Lau, K. T., Wong, T. T., Ho, M. P. and Hui, D., "Mechanism of Reinforcement in a Nanoclay/Polymer Composite" *Composites Part B-Eng*, Vol. 42, pp. 1708-1712, 2011.
- [13] Albdiry, M. T., Yousif, B. F. and Ku, H., "Fracture Toughness and Toughening Mechanisms of Unsaturated Polyester-Based Clay Nanocomposites", 13TH International Conference on Fracture June 16-21, Beijing, China, 2013.
- [14] Chowdary, M. S. and Kumar, M. S. R. N., "Effect of Nanoclay on the Mechanical properties of Polyester and S-Glass Fiber (Al)" *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 74, pp. 35-42, 2015.
- [15] Rafiq, A., Al-Qadhib, M., Merahc, N., Ali, Y., "Mechanical Behavior of Hybrid Glass Fibre/Epoxy Clay Nanocomposites" *Advanced Materials Research*, Vol. 894, pp. 336-341, 2014.
- [16] Pol, M. H., Liaghat, Gh. H., Mehrabani, Yeganeh, E., Afrouzian, A., "Experimental Investigation of Nanoclay and Nanosilica Particles Effects on Mechanical Properties of Glass Epoxy Composites" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015.
- [17] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "On the mechanical characterizations of unidirectional basalt fiber/epoxy laminated composites with 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane functionalized multi-walled carbon nanotubes-enhanced matrix" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(5), 421-434, 2016
- [18] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "Enhanced Mechanical Properties of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Composites Using Silane-Modified Na+- Montmorillonite Nanoclay" *Polymer Testing*, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.
- [19] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM D790, 2003.
- [20] Mariche, R., Sanchez, M., Suarez, A. J., Prolongo, S. G. and Urena, A., "Electrically Conductive Functionalized- GNP/Epoxy Based Composites: From Nanocomposite to Multiscale Glass Fibre Composite Material" *Composites Part B*, Vol. 98, pp. 49-55, 2016.
- [21] Avila, A. F., Peixoto, L. G. Z., Silva Neto, A., De avila, J. and Carvalho, M. G. R., "Bending Investigation on Carbon Fiber/Epoxy Composites Nano- Modified by Graphene" *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 35, pp. 269-275, 2012.
- [22] Kim, J. K. and Mai, Y. W., "Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites" Elsevier, 1998.
- [23] Singh, S. K., Singh, S., Sharma, and S., Sharma, V., "Strength Degradation of Mechanical Properties of Unidirectional E- glass Fiber Epoxy Resin Nanoclay Composites Under Hygrothermal Loading Conditions" *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 1114-1119, 2014.
- [24] Sharma, B., Khosravi, H., Chibber, S., and Mehta, R., "Effect of surface treatment of nanoclay on the mechanical properties of epoxy/glass fiber/clay nanocomposites" *Composite Interfaces*, Vol. 23, pp. 6323-640, 2016.
- [25] Rahimi, Gh.H., Zamani, R. and Pol, M. H., "Studies on The Tensile and Flexural Properties of TETA-Cured Epoxy Resins Modified With Clay" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 29-34, 2014 (In Persian).
- [26] Ngo, T. D., Nguyen, Q. T., Nguyen, T. P. and Tran, P., "Effect of Nanoclay on Thermomechanical Properties of Epoxy/Glass Fiber Composites" *Arabian Journal Science and Engineering*, Vol. 41, pp. 1251-1261, 2016.
- [27] Han, J. T. and Cho, K., "Layered Silicate-Induced Enhancement of Fracture Toughness of Epoxy Molding Compounds over a Wide Temperature Range" *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 290, pp. 1184-1191, 2005.
- [1] Barbero, E. J. "Introduction to Composite Materials Design: 2nd edition", CRC Press, 2010
- [2] Sano, T., Srivastan, T. S. and Peretti, M. W., "Advanced Composites for Aerospace, Marine, and Land Applications" Wiley TMS, 2014.
- [3] Deborah, D. L., "Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies" Springer London, 2003.
- [4] Hyer, M. W., "Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials" WCB/McGraw-Hill, New York, 1998.
- [5] Fischer, H., "Polymer Nanocomposites Fundamental Research to Specific Applications", *Materials Science and Engineering C*, Vol. 23, pp.763-772, 2003.
- [6] Kumar, M. S. S., Raju, N. M. S., Sampath, P. S. and Jayakumari, L. S., "Effects of Nanomaterials on Polymer Composites: An Expatriate View" *Review Advanced Materials Science*, Vol. 38, pp. 40-54, 2014.
- [7] Hussain, F. and Hojjati, M., "Review Article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview" *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, No. 17, pp. 1511-1574, 2006.
- [8] Xu, Y., Peng, H., Wang, X., and Su, S., "Comparative Study of Different Polymerically modified Clays on Curing Reaction and Thermal Properties of Epoxy Resin" *Thermochemical Acta*, Vol. 516, pp. 13-18, 2011.
- [9] Azeez, A. A., Rhee, K. Y., Park, S. J. and Hui, D., "Epoxy Clay Nanocomposites- Processing, Properties and Applications: A review" *Composites: Part B*, Vol. 45, pp. 308-320, 2013.
- [10] Uddin, F., "Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals" *Metallurgical and Materials Transactions, A*, Vol. 39, pp. 2804-2814, 2008.
- [11] Ayatollahi, M. R., Shokrieh, M. M., Shadlou, S., Kefayati, A. R. and Chitsazadeh, M., "Mechanical and Electrical Properties of Epoxy/Multi-walled Carbon Nanotube/ Nanoclay Nanocomposites" *Iranian Polymer Journal*, Vol. 20, pp. 835-843, 2011.



مطالعه تجربی خواص مکانیکی، شکل شناسی و جریان پذیری در نانوکامپوزیت ABS/PBT/CNT

میلاذ آقالاری¹، فرشاد حیدری¹، کریم شلش نژاد^{2*}، نوید تاج بخش چاخارلو³

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، کد پستی 5166616471، shelesh-nezhad@tabrizu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
پلیمر اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن (ABS) به دلیل برخورداری از خواص نسبتاً خوب مکانیکی، کاربرد های زیادی در تولید محصولات پلاستیکی دارد. از سوی دیگر، جریان پذیری پایین ABS، امکان قالبگیری محصولات نازک را سلب می کند. در این پژوهش، برای افزایش فرایندپذیری، پلیمر پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) به ABS افزوده شد. افزون بر این، از نانولوله های کربنی (CNT) برای بهبود مقاومت مکانیکی استفاده شد. آمیخته های ABS/PBT در سه درصد وزنی مختلف (90/10، 80/20، 70/30) و نانوکامپوزیت های بر پایه آمیخته (80/20) ABS/PBT حاوی 0.1، 0.3 و 0.5 درصد وزنی نانولوله های کربنی با استفاده از دستگاه اکسترودر دوپیچه و دستگاه قالب گیری تزریقی تولید شد. خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی، خمشی و ضربه ای، و نیز شکل شناسی و جریان پذیری نمونه های مختلف مطالعه شد. افزودن 10، 20 و 30 درصد وزنی PBT به ABS، شاخص جریان مذاب (MFI) را به ترتیب 25، 58 و 78 درصد نسبت به ABS خالص افزایش داد. حضور فاز PBT در زمینه ABS باعث افزایش استحکام کششی و خمشی شد، ولی مقاومت به ضربه شکافدار را کاهش داد. بکارگیری نانولوله های کربنی در ABS/PBT باعث بهبود خواص مکانیکی شد. بیشترین مقاومت کششی در نانوکامپوزیت حاوی 0.5 درصد وزنی نانولوله های کربنی، و بیشترین مقاومت خمشی و ضربه ای نیز در نانو کامپوزیت حاوی 0.3 درصد وزنی نانولوله های کربنی مشاهده شد. نتایج آزمون های شکل شناسی، اثر قابل توجه نانولوله های کربنی بر شکل شناسی شکست نمونه های نانوکامپوزیتی را نشان داد.	دریافت: 1398/12/18 پذیرش: 1399/11/10
	کلیدواژگان: نانوکامپوزیت، نانولوله کربنی، خواص مکانیکی، جریان پذیری ذوب

Experimental study on the mechanical properties, morphology and fluidity of ABS/PBT/CNT nanocomposites

Milad Aghalari, Farshad Heidari, Karim Shelesh-Nezhad*, Navid Tajbakhsh Chakherlou

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* Tabriz 5166616471, Iran, shelesh-nezhad@tabrizu.ac.ir

Keywords

ABS/PBT blend,
Nanocomposite,
Carbon nanotube,
Mechanical properties,
Melt fluidity,

Abstract

Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) polymer owing to its relatively good mechanical properties is broadly used in the production of plastic products. However, ABS low fluidity prevents molding of thin-walled products. In this study, poly (butylene terephthalate) (PBT) was applied into ABS to enhance fluidity. In addition, carbon nanotubes utilized to promote mechanical performances. ABS/PBT blends of three different weight percentages (90/10, 80/20, 70/30) and nanocomposites based on ABS/PBT (80/20) blend containing 0.1, 0.3 and 0.5 wt. % of carbon nanotubes were prepared by employing a twin-screw extruder and an injection molding machine. The mechanical properties including tensile, flexural and impact resistance along with morphology and fluidity of different samples were investigated. The presence of 10, 20 and 30 wt.% PBT in ABS elevated the melt flow index as much as 25, 58 and 78% respectively as compared to pure ABS. The inclusion of PBT enhanced tensile and flexural strengths but reduced notched impact resistance. The existence of carbon nanotubes in ABS/PBT improved mechanical properties. The highest tensile strength was observed in nanocomposite containing 0.5 wt.% carbon nanotubes. The maximum flexural strength and impact resistance were observed in nanocomposite containing 0.3 wt.% carbon nanotubes. SEM studies showed the significant effect of CNT inclusion on the fracture morphology of nanocomposite samples

1- مقدمه

محدود یا غیرممکن می سازد [1]. پلیمر PBT² در مقایسه با ABS دارای خواص کشسانی، خمشی و جریان پذیری بهتری است [3]. یک آمیخته پلیمری به عنوان مخلوطی از حداقل دو نوع پلیمر مختلف تعریف می شود.

پلیمر ABS¹ از خواص مکانیکی نسبتاً خوبی برخوردار است [1، 2]. از سوی دیگر، ویسکوزیته نسبتاً زیاد ABS، امکان قالبگیری محصولات نازک را

² Polybutylene terephthalate

¹ Acrylonitrile butadiene styrene

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Aghalari, M., Heidari, F., Shelesh-Nezhad, K., Tajbakhsh chakherlou, N., "Experimental study on the mechanical properties, morphology and fluidity of ABS/PBT/CNT nanocomposites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1189-1196, 2021.

همکاران [16] در تحقیق خود اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر خواص مکانیکی و حرارتی آمیخته پلیمری PA6/ABS (50/50) را بررسی کردند. وجود نانولوله‌های کربنی در زمینه پلیمری و در فصل مشترک دو فاز پلیمری باعث افزایش استحکام و مدول کششی و نیز افزایش مدول ذخیره شد.

هنوز پژوهشی در زمینه مطالعه خواص و عملکرد نانوکامپوزیت ABS/PBT/CNT گزارش نشده است. در این تحقیق برای بهبود جریان پذیری ABS، پلیمر PBT به آن اضافه شد. در مرحله بعد، برای افزایش مقاومت مکانیکی در آمیخته ABS/PBT، از نانولوله‌های کربنی استفاده شد. جریان پذیری، خواص کششی، خمشی و ضربه‌ای و نیز شکل شناسی میکروسکوپی در آمیخته ABS/PBT و نانوکامپوزیت ABS/PBT/CNT مورد مطالعه قرار گرفت.

2- بخش تجربی

2-1 مواد مورد استفاده

از پلیمر ABS با نام تجاری ABS-N50 ساخت شرکت فاند بصیر گلپایگان با شاخص جریان مذاب 35 g/10min (220°C, 10 kg) استفاده شد. پلیمر PBT با نام تجاری Tecodur-PB70nl محصول شرکت پوروتک¹² ترکیه با شاخص جریان مذاب 45 g/10min (270°C, 2.16 kg) بکار گرفته شد. از نانولوله‌های کربنی چند دیواره با قطر خارجی متوسط 25 نانومتر و طول متوسط 20 میکرومتر، عامل دار نشده، محصول شرکت تحقیقاتی نانو مواد آمریکا¹³ استفاده شد.

2-2 تجهیزات

رطوبت‌گیری مواد اولیه پلیمری با استفاده از کوره کربولایت¹⁴ ساخت کشور انگلستان انجام شد. وزن کردن مواد اولیه شامل ABS و PBT و نیز نانولوله‌های کربنی با استفاده از ترازوی مدل اند¹⁵ ساخت کشور ژاپن با دقت 0.001g انجام شد. برای تولید گرانول‌های آمیخته‌های پلیمری و نانوکامپوزیتی به روش اختلاط ذوبی، از دستگاه اکسترودر دومارپیچه همسوگرد ZSK ساخت کشور آلمان با قطر مارپیچ 25 mm و نسبت طول به قطر 40 استفاده گردید. نمونه‌های استاندارد آزمون‌های کشش، خمش و ضربه شکاف دار با استفاده از دستگاه تزریق پلاستیک شرکت ماشین سازی اصلانیان مدل EM80 با ظرفیت تزریق 125 g تولید شد. آزمون‌های کشش و خمش با استفاده از دستگاه انیورسال زوئیک¹⁶ Z-10 ساخت آلمان و آزمون ضربه شکاف دار با استفاده از دستگاه زوئیک HIT25P ساخت آلمان انجام شد. برای مطالعه شکل شناسی نمونه‌ها از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی¹⁷ مدل MIRA3 ساخت کشور جمهوری چک استفاده

دلیل اصلی برای استفاده از آمیخته‌های پلیمری، رفع معایب و بهبود خواص مختلف پلیمرها به وسیله اختلاط آنها با یکدیگر و برقراری تعادل مناسبی از خواص است [4، 5]. اختلاط ABS با PBT می‌تواند خواص مکانیکی و حرارتی را بهبود بخشد و جریان پذیری را افزایش دهد [6]. با این حال، حساسیت زیاد به شکاف در پلیمر PBT می‌تواند مقاومت ضربه‌ای شکاف دار در آمیخته ABS/PBT را کاهش دهد. تانگ¹ و همکاران [3] در تحقیق خود نشان دادند بکارگیری PBT در زمینه ABS، باعث افزایش جزئی در استحکام کششی و خمشی و افزایش قابل توجه در شاخص جریان مذاب می‌شود. از طرفی دیگر، به دلیل ترد بودن PBT، از استحکام ضربه شکاف دار آمیخته پلیمری کاسته شد. همچنین اضافه کردن 3 درصد وزنی سازگار کننده ASG²، باعث افزایش استحکام به ضربه شکاف دار ولی کاهش بسیار زیاد در شاخص جریان مذاب شد. سوارز³ و همکاران [7] در تحقیق خود اثر افزودن پلی کربنات⁴ (PC) به ABS را مورد بررسی قرار دادند. افزودن PC به ABS باعث بهبود استحکام کششی و مدول یانگ به ترتیب تا 35 و 15 درصد شد. جانگ⁵ و همکاران [8] در تحقیق خود نشان دادند به کارگیری PA6⁶ در آمیخته پلیمری ABS/PA6، باعث افزایش استحکام کششی، استحکام خمشی، سختی راکول و دمای تغییر شکل حرارتی می‌شود، ولی استحکام ضربه شکاف دار کاهش پیدا می‌کند. افت مقاومت ضربه‌ای به حساسیت به شکاف PA6 نسبت داده شد.

نانوکامپوزیت‌ها طبقه‌بندی جدیدی از مواد می‌باشند که از دو فاز اصلی تشکیل شده‌اند. فاز اول، زمینه نانوکامپوزیت محسوب می‌شود و می‌تواند از جنس فلز، پلیمر یا سرامیک می‌باشد. فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتری، زیر 100 نانومتر، می‌باشند که به‌عنوان تقویت‌کننده یا مواد پرکننده در درون فاز اول یا ماده زمینه توزیع می‌شوند [9، 10]. نانولوله‌های کربنی (CNT) نوعی نانومواد هستند که به دلیل دارا بودن خواص منحصر بفرد شامل وزن مخصوص پایین، نسبت منظر، استحکام مکانیکی و هدایت الکتریکی بسیار زیاد به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته‌اند [11]. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که خواص مکانیکی مواد با افزودن نانولوله‌های کربنی می‌تواند به میزان قابل توجهی افزایش یابد. بهبود در خواص تا حد زیادی بستگی به نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی در درون زمینه کامپوزیت دارد [12]. کاپور⁸ و همکاران [13] اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به ABS را بر خواص مکانیکی و حرارتی مطالعه کردند و نشان دادند که بکارگیری 5 درصد وزنی CNT در ABS، مقادیر مدول الاستیک، مدول ذخیره و سختی را به ترتیب 90، 153 و 99 درصد افزایش می‌دهد. دوریگانو⁹ و همکاران [14] نشان دادند که بکارگیری نانولوله‌های کربنی در ABS باعث افزایش استحکام کششی، هدایت الکتریکی و حرارتی می‌شود. پیسویچ¹⁰ و همکاران [15] در تحقیق خود نشان دادند که افزودن 0.3 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به PBT باعث افزایش استحکام کششی به میزان 20 درصد، مدول یانگ به میزان 10 درصد و ازدیاد طول به میزان 5 برابر نسبت به PBT خالص می‌شود. بوس¹¹ و

¹ Tang

² Acrylonitrile-styrene-glycidyl methacrylate

³ Suarez

⁴ Polycarbonate

⁵ Jang

⁶ Polyamide6

⁷ Carbon nano-tube

⁸ Kapoor

⁹ Dorigato

¹⁰ Piesowicz

¹¹ Bose

¹² Eurotec

¹³ US Nanomaterials Inc.

¹⁴ Carbolite

¹⁵ And

¹⁶ Zwick

¹⁷ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

جریان مذاب به ترتیب 25، 58 و 78 درصد نسبت به ABS خالص افزایش می یابد. PBT جریان پذیری بیشتری نسبت به ABS خالص دارد و بنابراین افزودن آن به ABS می تواند جریان پذیری آمیخته پلیمری ABS/PBT را افزایش دهد. بکارگیری 20 درصد وزنی PBT اثربخشی بیشتری در بهبود جریان پذیری دارد، زیرا نسبت افزایش شاخص جریان به درصد وزنی استفاده شده از PBT در این حالت بیشتر از دو آمیخته دیگر است. در مرحله بعد، آمیخته پلیمری ABS/PBT (80/20) به عنوان مبنای در نظر گرفته شد و اثر بکارگیری نانولوله های کربنی در این آمیخته بر رفتار جریان مذاب مطالعه شد. مطابق شکل 2، افزودن نانولوله های کربنی با 0.1، 0.3 و 0.5 درصد وزنی به آمیخته پلیمری ABS/PBT (80/20)، شاخص جریان مذاب را به ترتیب 7، 10 و 17 درصد نسبت به آمیخته پلیمری کاهش داد. وجود نانولوله های کربنی در زمینه پلیمری، تحرک زنجیره های پلیمری و در نتیجه جریان پذیری ذوب را کاهش می دهد. افزون بر این، نانولوله های کربنی می توانند با اتصال دو فاز پلیمری ABS و PBT به یکدیگر باعث کاهش جریان پذیری ذوب شوند. با وجود این، مقادیر شاخص جریان مذاب نانوکامپوزیت ها نسبت به ABS خالص بیشتر است. نتایج مشابهی در مطالعه اثر افزودن نانولوله های کربنی به آمیخته پلیمری PBT/TPU بر جریان پذیری گزارش شده است [17].

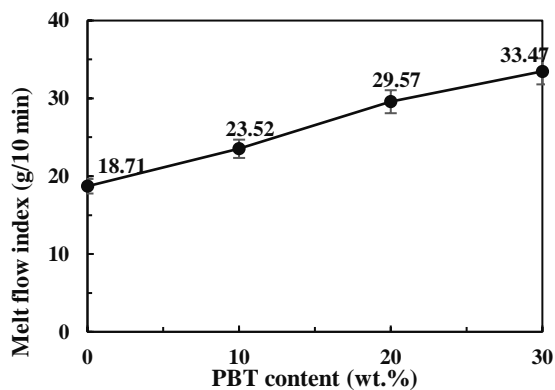


Fig 1. MFI for ABS/PBT blends vs. PBT contents

شکل 1 آزمون شاخص جریان مذاب برای آمیخته های ABS/PBT بر حسب درصد PBT

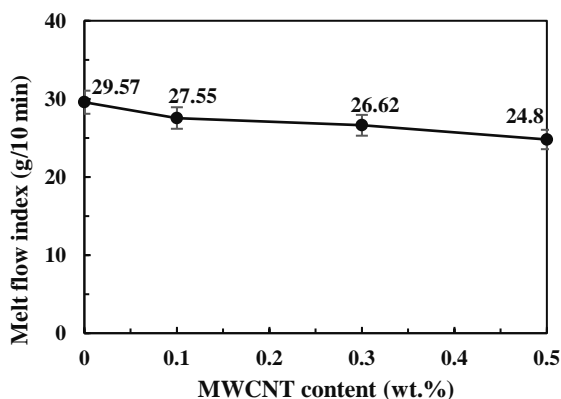


Fig 2. MFI for ABS/PBT/CNT nanocomposites vs. CNT contents

شکل 2 آزمون شاخص جریان مذاب برای نانوکامپوزیت های ABS/PBT/CNT بر حسب درصد CNT

گردید. آزمون جریان پذیری مذاب¹ با به کارگیری دستگاه تعیین شاخص جریان مذاب مدل ری-ران² ساخت انگلستان انجام شد.

3-2 آماده سازی نمونه ها

پلیمرهای ABS و PBT هر کدام به مدت 8 ساعت در دمای 110°C در کوره برای رطوبت گیری قرار داده شدند. سپس، مواد اولیه مطابق جدول 1 برای نمونه های مختلف توزین شد. در مرحله بعد، آمیخته های پلیمری و نمونه های کامپوزیتی در ابتدا مخلوط مکانیکی شدند و سپس با استفاده از اکسترودر دوماپیچ مخلوط ذوبی شدند. برای تولید آمیخته ها و نانوکامپوزیت ها، سرعت دورانی ماریپیچ های اکسترودر برابر با 200 rpm و دمای گرم کن های اکسترودر از محل تغذیه تا قالب به ترتیب 220، 230، 235 و 240 °C تنظیم شد. نمونه های استاندارد آزمون های کشش (ASTM D-638)، خمش (ASTM D-790) و ضربه (ASTM D-256) به روش قالبگیری تزریقی تهیه شدند. مقادیر فشار و دمای تزریق به ترتیب 80 MPa و 240°C تنظیم شد. پیش از قالب گیری نمونه ها، گرانول های پلیمری و نانوکامپوزیتی به مدت 8 ساعت و در دمای 110°C رطوبت گیری شدند.

4-2 آزمون ها

آزمون شاخص جریان مذاب، مطابق استاندارد ASTM-D1238، با وزنه 3.8 Kg و در دمای 240 °C انجام شد. آزمون کشش، طبق استاندارد ASTM-D638، با سرعت 5 mm/min بر روی نمونه هایی با ابعاد 57×13×3 mm³ در ناحیه گیج، انجام شد. آزمون خمش سه نقطه، مطابق استاندارد ASTM-D790، با سرعت 5 mm/min بر روی نمونه هایی با ابعاد 100×12×4 mm³ و تحت فاصله تکیه گاهی 50 mm انجام شد. آزمون ضربه شکاف دار طبق استاندارد ASTM-D256 با انرژی تنظیمی 5.5 J بر روی نمونه هایی با ابعاد 65×13×5 mm³ و شکافی با زاویه 45° و عمق 2 mm انجام پذیرفت. همه آزمون ها در شرایط محیط و با سه بار تکرار انجام شد.

جدول 1 نامگذاری و ترکیب نمونه ها

Table 1. Nomenclatures and compositions of samples.

Sample code	ABS (wt.%)	PBT (wt.%)	CNT (wt.%)
ABS	100	0	0
ABS/PBT (90/10)	90	10	0
ABS/PBT (80/20)	80	20	0
ABS/PBT (70/30)	70	30	0
ABS/PBT/CNT (80/20/0.1)	79.9	20	0.1
ABS/PBT/CNT (80/20/0.3)	79.7	20	0.3
ABS/PBT/CNT (80/20/0.5)	79.5	20	0.5

3- نتایج و بحث

1-3 شاخص جریان مذاب

شکل های 1 و 2، مقادیر شاخص جریان مذاب برای آمیخته های مختلف پلیمری و نانوکامپوزیت های حاوی نانولوله های کربنی را نشان می دهند. طبق شکل 1، با افزودن 10، 20 و 30 درصد وزنی PBT به ABS شاخص

¹ Melt Flow Index (MFI)

² Ray-Ran

2-3 شکل شناسی

شکل های 3 و 4 به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع شکست نمونه های ضربه ABS خالص و آمیخته پلیمری (80/20) ABS/PBT را با بزرگنمایی 10000 برابر نشان می دهند. مطابق شکل 4، پلیمرهای ABS و PBT با یکدیگر سازگار نیستند و یک شکل شناسی ناپیوسته با فاز پخش شده PBT در زمینه ABS مشاهده می شود. با این حال، وجود و پخش ذرات ریز PBT با ابعاد کمتر از 0.5 میکرون در زمینه ABS، نشان دهنده اختلاط ذوبی نسبتاً خوب در این آمیخته ناسازگار می باشد (شکل 4). شکل های 5 تا 7 تصاویر میکروسکوپی نانو کامپوزیت های حاوی 0.1، 0.3 و 0.5 درصد وزنی نانولوله های کربنی را با بزرگنمایی 10000 برابر نشان می دهند. وجود نانولوله های کربنی در زمینه پلیمری ABS/PBT با پیکان مشخص شده است. اضافه کردن نانولوله های کربنی (با طول حدود 20 میکرون) باعث تغییر قابل توجه در شکل شناسی مقطع شکست شد و سطح شکست نسبتاً زبرتر و شکل پذیرتر بدست آمد. وجود نانولوله کربنی می تواند اتصال بین دو فاز پلیمری را بهبود دهد [17] و باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک در نمونه نانو کامپوزیتی شود.

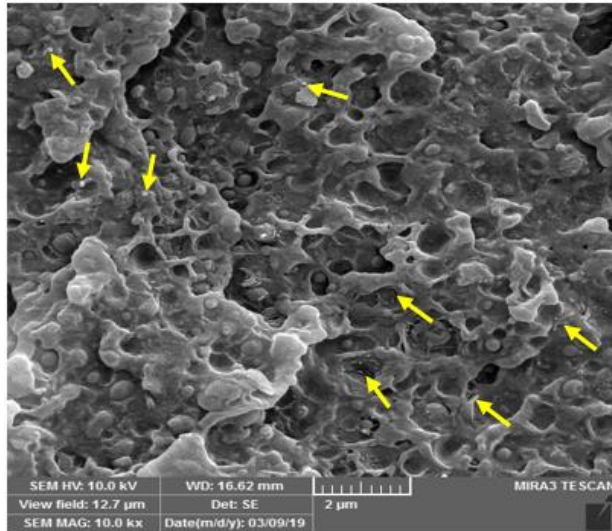


Fig 5. SEM image of ABS/PBT/CNT (80/20/0.1) nanocomposite
شکل 5 تصویر میکروسکوپی الکترونی نانو کامپوزیت ABS/PBT/CNT (80/20/0.1)

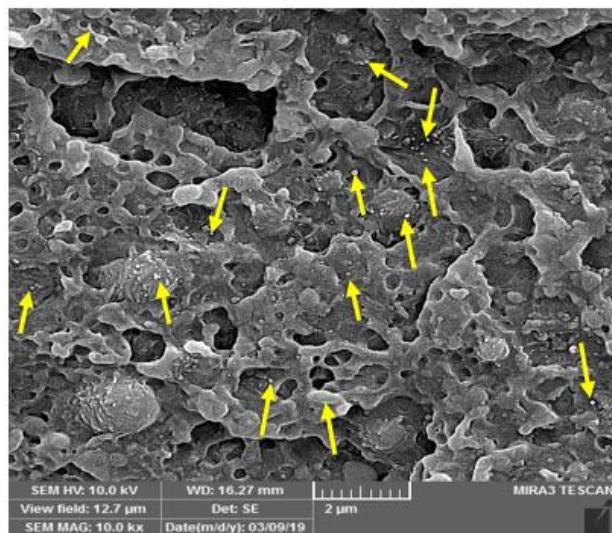


Fig 6. SEM image of ABS/PBT/CNT (80/20/0.3) nanocomposite
شکل 6 تصویر میکروسکوپی الکترونی نانو کامپوزیت ABS/PBT/CNT (80/20/0.3)

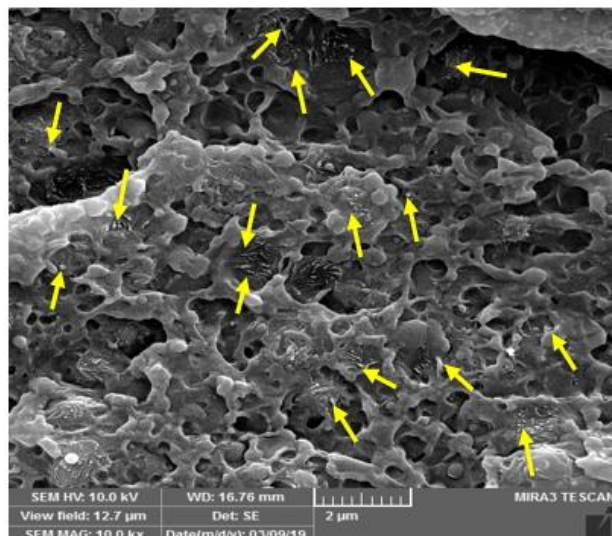


Fig 7. SEM image of ABS/PBT/CNT (80/20/0.5) nanocomposite
شکل 7 تصویر میکروسکوپی الکترونی نانو کامپوزیت ABS/PBT/CNT (80/20/0.5)

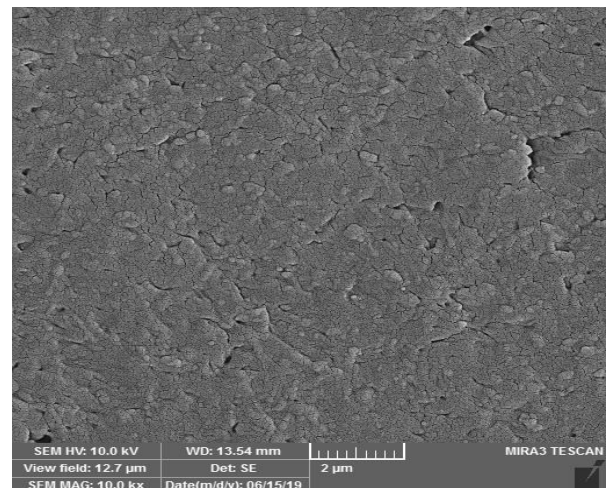


Fig 3. SEM image of pure ABS

شکل 3 تصویر میکروسکوپی الکترونی روشی از ABS خالص

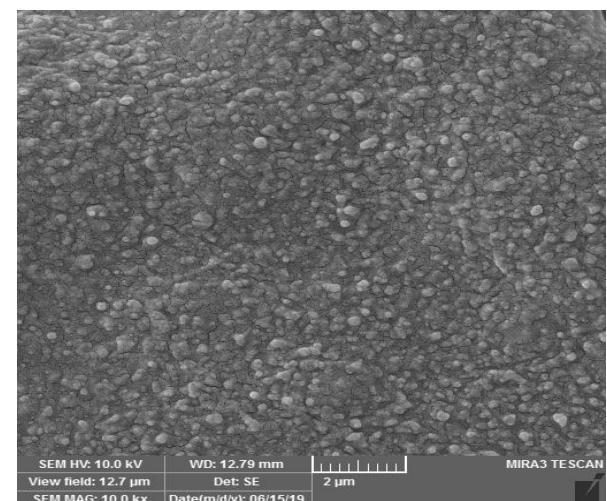


Fig 4. SEM image of ABS/PBT (80/20) blend

شکل 4 تصویر میکروسکوپی الکترونی آمیخته ABS/PBT (80/20)

شکل 8، وجود نانولوله کربنی و اتصال آن به زمینه پلیمری را با بزرگنمایی 70000 برابر نشان می دهد. نانولوله کربنی مانند یک پل در زمینه پلیمری عمل کرده است. طبق شکل 8، قطر نانولوله نشان داده شده حدود 89 نانومتر است، در حالی که قطر نانولوله های بکار گرفته شده حداکثر 30 نانومتر می باشد. آثار باقی مانده از پلیمر بر روی سطح نانولوله کربنی نشان دهنده چسبندگی و انتقال تنش در فصل مشترک پلیمر-نانولوله کربنی است. این شرایط می تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی شود [18، 19].

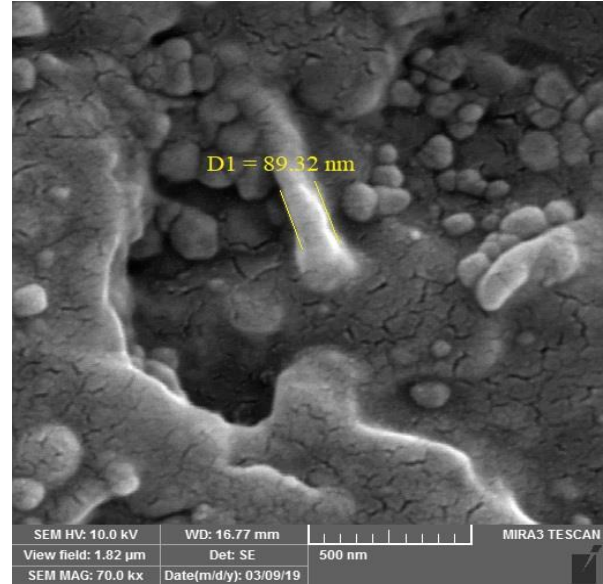


Fig 8. SEM image of polymer matrix adhesion to CNT

شکل 8 تصویر میکروسکوپی الکترونی از چسبندگی پلیمر زمینه به نانولوله کربنی

3-3 نتایج آزمون کشش

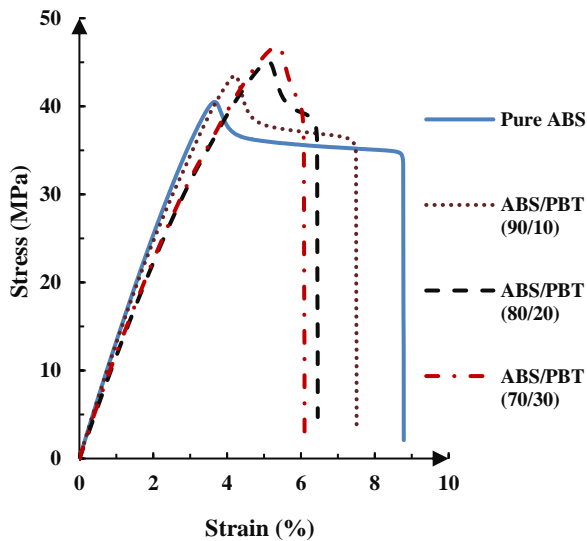


Fig 9. Stress-strain curve of ABS/PBT blends

شکل 9 منحنی تنش-کرنش آمیخته های ABS/PBT

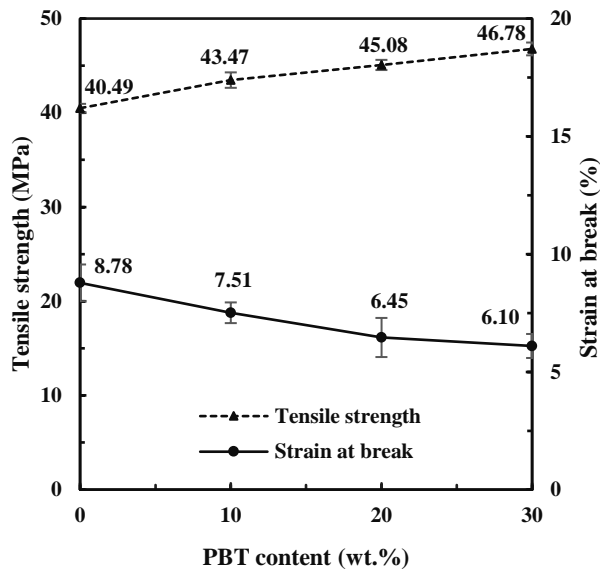
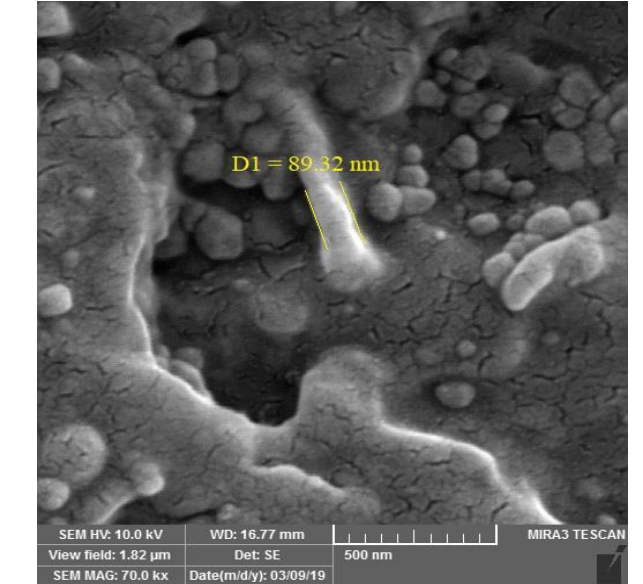


Fig 10. Tensile strength and strain at break for ABS/PBT blends

شکل 10 استحکام کششی و کرنش شکست آمیخته های ABS/PBT

شکل 9 منحنی تنش-کرنش و شکل 10 میانگین نتایج استحکام کششی و کرنش شکست برای ABS خالص و آمیخته های پلیمری ABS/PBT را نشان می دهند. طبق شکل 9، با افزودن PBT به ABS، مقدار کرنش شکست و نیز سطح کل زیر منحنی تنش-کرنش کاهش یافته و تمایل ماده به رفتار ترد بیشتر شده است. طبق شکل 10، استحکام کششی آمیخته پلیمری ABS/PBT نسبت به ABS خالص با افزودن 10، 20 و 30 درصد وزنی PBT، به ترتیب 7.6، 11.5 و 15.5 درصد افزایش می یابد. به دلیل برخورداری از استحکام کششی بالاتر نسبت به ABS خالص [3] هنگامی که به ماده ABS اضافه می شود می تواند باعث افزایش استحکام کششی گردد. اما از طرف دیگر، مقدار ازدیاد طول در نقطه پارگی در یک آمیخته، تا حد زیادی بستگی به چسبندگی در فصل مشترک دو فاز پلیمری دارد [16]. بنابراین، ناسازگاری PBT با ABS، باعث کاهش کرنش در نقطه پارگی در ABS/PBT در مقایسه با ABS خالص شده است.



نانولوله های کربنی، از تحرک زنجیره های پلیمری کاسته و باعث افزایش مقاومت خمشی می شود [21].

3-5 نتایج آزمون ضربه شکاف دار

شکل 15 استحکام ضربه ABS خالص و آمیخته های پلیمری ABS/PBT و شکل 16 استحکام ضربه نانوکامپوزیت های ABS/PBT/CNT را نشان می دهد. با توجه به شکل 15، وجود PBT به دلیل پایین بودن مقاومت به ضربه شکاف دار آن [6]، باعث افت قابل توجه مقاومت ضربه در آمیخته های ABS/PBT شده است. مقاومت به ضربه آمیخته پلیمری ABS/PBT نسبت به ABS خالص با افزودن 10، 20 و 30 درصد وزنی PBT، به ترتیب 35، 39 و 47 درصد کاهش یافته است. یک کاهش قابل توجه در مقاومت به ضربه شکاف دار با اضافه کردن 10 درصد وزنی PBT به ABS خالص مشاهده می شود. ولی در درصدهای وزنی زیادتر PBT (20 و 30 درصد وزنی)، این آهنگ کاهش کمتر می شود.

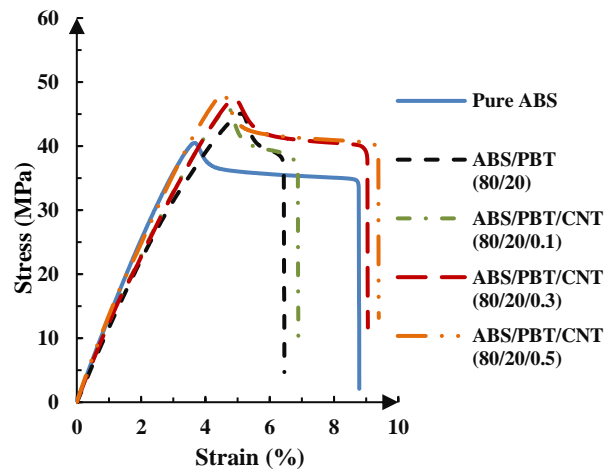


Fig 11. Stress-Strain curve of ABS/PBT/CNT nanocomposites

شکل 11 منحنی تنش-کرنش نانوکامپوزیت های ABS/PBT/CNT

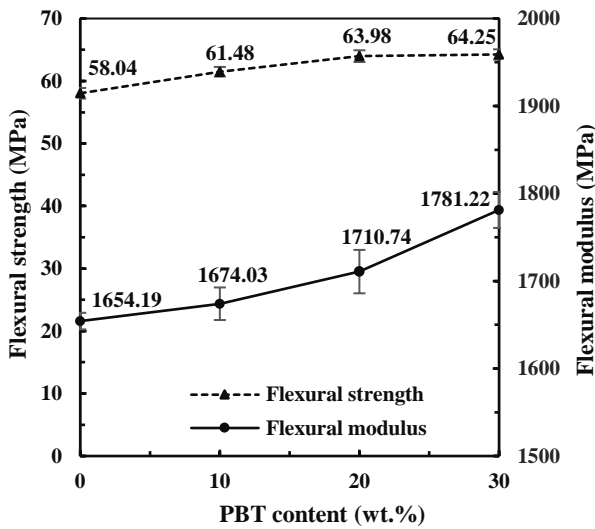


Fig 13. Flexural strength and moduli of ABS/PBT blends

شکل 13 استحکام و مدول خمشی آمیخته های ABS/PBT

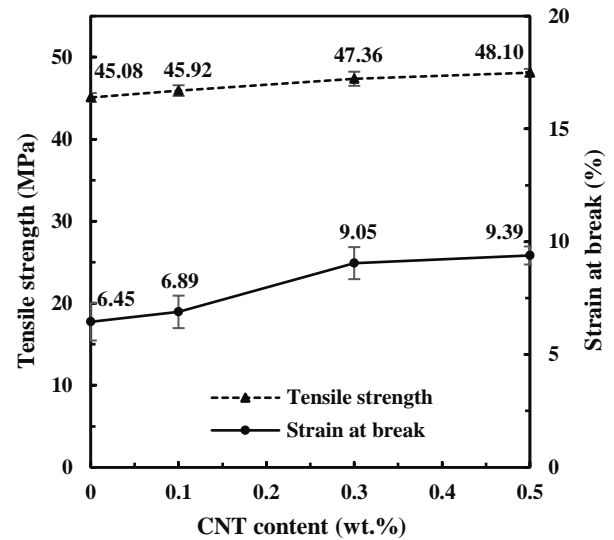


Fig 12. Tensile strength and strain at break for ABS/PBT/CNT nanocomposites

شکل 12 استحکام کششی و کرنش شکست نانوکامپوزیت های ABS/PBT/CNT

3-4 نتایج آزمون خمش سه نقطه

شکل 13، مقادیر مدول و استحکام خمشی برای ABS خالص و آمیخته های پلیمری ABS/PBT و شکل 14 میانگین مقاومت خمشی نانوکامپوزیت های ABS/PBT/CNT را نشان می دهند. طبق شکل 13، استحکام خمشی آمیخته پلیمری ABS/PBT نسبت به ABS خالص با افزودن 10، 20 و 30 درصد وزنی PBT، به ترتیب 6، 10 و 10.6 درصد افزایش یافته است. مدول خمشی آمیخته پلیمری ABS/PBT نیز نسبت به ABS خالص با افزودن 10، 20 و 30 درصد وزنی PBT به ترتیب 1.4، 3.5 و 7.5 درصد افزایش می یابد. PBT دارای مقاومت خمشی بیشتری در مقایسه با ABS است [3، 23] و بنابراین به کارگیری آن در ABS می تواند خواص خمشی را بهبود دهد.

مطابق شکل 14، افزودن نانولوله های کربنی با درصدهای وزنی 0.1، 0.3 و 0.5، به آمیخته پلیمری ABS/PBT (80/20) باعث افزایش استحکام خمشی به ترتیب تا 10.6، 12.5 و 10 درصد، و افزایش مدول خمشی به ترتیب تا 19، 20.5 و 11 درصد می شود. نسبت منظر بالای نانولوله های کربنی، پخش یکنواخت آنها در زمینه پلیمری و برهمکنش مناسب بین پلیمر و

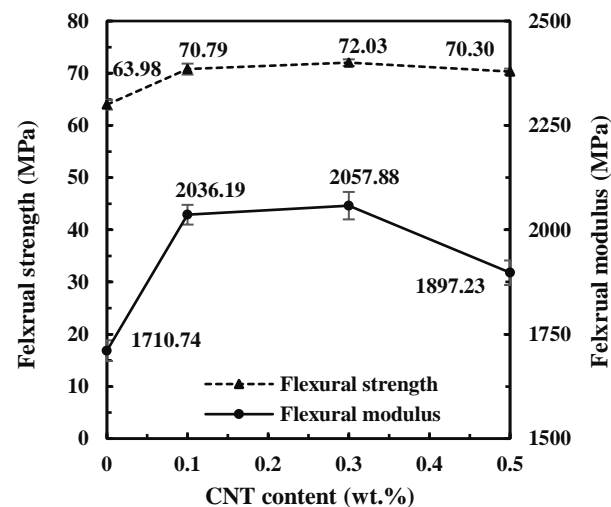


Fig 14. Flexural strength and moduli of ABS/PBT/CNT nanocomposites

شکل 14 استحکام و مدول خمشی نانوکامپوزیت های ABS/PBT/CNT

دارای شکل شناسی ناپیوسته است و ذرات ریز PBT با اندازه کمتر از 0.5 میکرون به طور نسبتاً یکنواخت در زمینه ABS پخش شده است. آزمون های میکروسکوپی نشان دهنده توزیع نسبتاً یکنواخت نانولوله های کربنی در زمینه پلیمری ABS/PBT و نیز چسبندگی پلیمر به نانولوله های کربنی می باشد. سطح شکست در آمیخته پلیمری ABS/PBT نسبتاً ترد بوده، اما با اضافه کردن نانولوله های کربنی، شکست شکل پذیر بدست آمده است. افزودن 10، 20 و 30 درصد وزنی PBT به ABS، شاخص جریان مذاب را به ترتیب 25، 58 و 78 درصد نسبت به ABS خالص افزایش داد. به کارگیری 20 درصد وزنی PBT در ABS، باعث افزایش استحکام کششی و خمشی به ترتیب به مقدار 11.3 و 10.2 درصد شد، ولی مقاومت به ضربه شکاف دار را کاهش داد. افزودن نانولوله های کربنی به ABS/PBT باعث بهبود خواص مکانیکی شد. بطوریکه، افزودن 0.3 درصد وزنی نانولوله های کربنی به آمیخته ABS/PBT (80/20)، مقاومت به ضربه شکافدار و چقرمگی کششی را به ترتیب به مقدار 27.9 و 61.8 درصد افزایش داد.

5- مراجع

- [1] Richardson, T. L. and Lokensgard, E., "Industrial Plastics: Theory and Applications", Cengage Learning, 2004.
- [2] Baraheni, M., Shelesh-Nezhad, K., Miralami, A. Adli, A. R. and Hashemi Soudmand, B., "Experimental Studies on Morphology and Impact Behavior of Pa6/ABS/CaCO3 Nanocomposites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 43-50, 2016.
- [3] Tang, L., Wang, L., Chen, P., Fu, J., Xiao, P., Ye, N. and Zhang, M., "Toughness of ABS/PBT Blends: The Relationship between Composition, Morphology, and Fracture Behavior", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 135, No. 13, pp. 46051, 2018.
- [4] Utracki, L., "History of Commercial Polymer Alloys and Blends (from a Perspective of the Patent Literature)", Polymer Engineering & Science, Vol. 35, No. 1, pp. 2-17, 1995.
- [5] Utracki, L. A. and Wilkie, C. A., "Polymer Blends Handbook", Springer, 2002.
- [6] Hage, E., Hale, W., Keskkula, H. and Paul, D., "Impact Modification of Poly (Butylene Terephthalate) by ABS Materials", Polymer, Vol. 38, No. 13, pp. 3237-3250, 1997.
- [7] Suarez, H., Barlow, J. and Paul, D., "Mechanical Properties of ABS/Polycarbonate Blends", Journal of applied polymer science, Vol. 29, No. 11, pp. 3253-3259, 1984.
- [8] Jang, S. P. and Kim, D., "Thermal, Mechanical, and Diffusional Properties of Nylon 6/ABS Polymer Blends: Compatibilizer Effect", Polymer Engineering & Science, Vol. 40, No. 7, pp. 1635-1642, 2000.
- [9] Yang, W., Hu, Y., Tai, Q., Lu, H., Song, L. and Yuen, R. K., "Fire and Mechanical Performance of Nanoclay Reinforced Glass-Fiber/PBT Composites Containing Aluminum Hypophosphite Particles", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 42, No. 7, pp. 794-800, 2011.
- [10] Bashiri-Goodarzi, H., "An Experimental Study of the Effects of Carbon Nanotube and Graphene Addition on the Impact Strength of Epoxy/Basalt Fiber Composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. In Press.
- [11] Khan, S. U. and Kim, J. K., "Impact and Delamination Failure of Multiscale Carbon Nanotube-Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review", International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 12, No. 2, pp. 115-133, 2011.
- [12] Eslami-Farsani, R. Shahrabi-Farahani, A. Khosravi, H. and Zamani, M. R., "A Study on the Flexural Response of Grid Composites Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 101-108, 2017.

طبق شکل 16، بکارگیری نانولوله های کربنی در آمیخته ABS/PBT باعث بهبود مقاومت به ضربه شکاف دار شد. افزودن 0.1، 0.3 و 0.5 درصد وزنی نانولوله های کربنی به آمیخته پلیمری ABS/PBT (80/20) مقاومت به ضربه شکاف دار را به ترتیب تا 13، 27 و 23 درصد افزایش داد. بکارگیری نانولوله های کربنی، افت مقاومت به ضربه ناشی از افزودن PBT را تا حدی جبران کرد. پخش یکنواخت نانولوله های کربنی در زمینه پلیمری و چسبندگی مناسب بین پلیمر و نانولوله ها (شکل 8)، باعث پخش انرژی ضربه، ازدیاد تغییر شکل پلاستیک در زمینه پلیمری و افزایش اتلاف انرژی ضربه در نمونه های نانوکامپوزیتی شد.

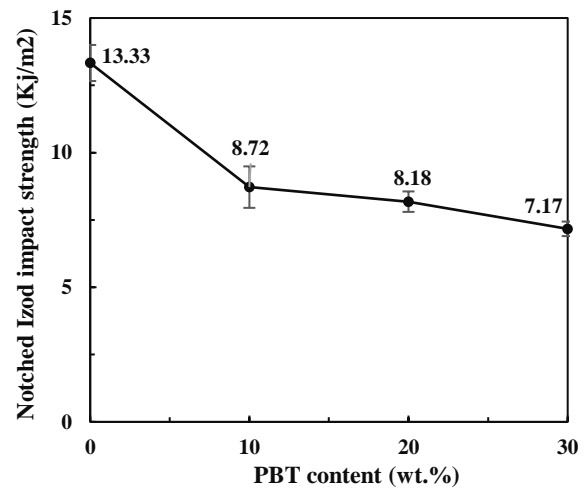


Fig 15. Impact resistance of ABS/PBT blends

شکل 15 مقاومت ضربه ای در آمیخته های ABS/PBT

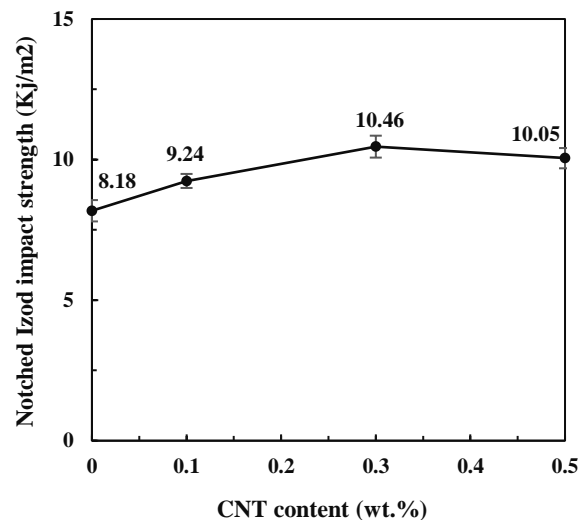


Fig 16. Impact resistance of ABS/PBT/CNT nanocomposites

شکل 16 استحکام ضربه ای در نانوکامپوزیت های ABS/PBT/CNT

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، خواص آمیخته های پلیمری ABS/PBT (90/10، 80/20، 70/30) و اثر افزودن نانولوله های کربنی در سه درصد وزنی 0.1، 0.3 و 0.5 به آمیخته پلیمری ABS/PBT (80/20) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمون های میکروسکوپی نشان می دهد که آمیخته پلیمری ABS/PBT

- [13] Kapoor, S., Goyal, M. and Jindal, P., "Enhanced thermal, static, and dynamic mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes-reinforced acrylonitrile butadiene styrene nanocomposite", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, In Press, DOI: 10.1177/0892705719886012.
- [14] Dorigato, A., Moretti, V., Dul, S., Unterberger, S. and Pegoretti, A., "Electrically conductive nanocomposites for fused deposition modelling", *Synthetic Metals*, Vol. 226, pp. 7-14, 2017.
- [15] Piesowicz, E., Irska, I., Bryll, K., Gawdzińska, K. and Bratychak, M., "Poly (Butylene Terephthalate/Carbon Nanotubes Nanocomposites. Part Ii. Structure and Properties", *Polimery*, Vol. 61, 2016.
- [16] Bose, S., Bhattacharyya, A. R., Häußler, L. and Pötschke, P., "Influence of Multiwall Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties and Unusual Crystallization Behavior in Melt-Mixed Co-Continuous Blends of Polyamide6 and Acrylonitrile Butadiene Styrene", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 49, No. 8, pp. 1533-1543, 2009.
- [17] Tehran, A. C., Shelesh-Nezhad, K. and Barazandeh, F. J., "Mechanical and Thermal Properties of TPU-Toughened PBT/CNT Nanocomposites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 32, No. 6, pp. 815-830, 2019.
- [18] Coleman, J. N., Cadek, M., Ryan, K. P., Fonseca, A., Nagy, J. B., Blau, W. J. and Ferreira, M. S., "Reinforcement of Polymers with Carbon Nanotubes. The Role of an Ordered Polymer Interfacial Region. Experiment and Modeling", *Polymer*, Vol. 47, No. 26, pp. 8556-8561, 2006.
- [19] Pötschke, P., Fornes, T. and Paul, D. R., "Rheological Behavior of Multiwalled Carbon Nanotube/Polycarbonate Composites", *Polymer*, Vol. 43, No. 11, pp. 3247-3255, 2002.
- [20] Gorrasi, G., Samo, M., Di Bartolomeo, A., Sannino, D., Ciambelli, P. and Vittoria, V., "Incorporation of Carbon Nanotubes into Polyethylene by High Energy Ball Milling: Morphology and Physical Properties", *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 45, No. 5, pp. 597-606, 2007.
- [21] Bagotia, N., Choudhary, V. and Sharma, D., "Studies on Toughened Polycarbonate/Multiwalled Carbon Nanotubes Nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 124, pp. 101-110, 2017.
- [22] Lim, J. W., Hassan, A., Rahmat, A. R. and Wahit, M. U., "Morphology, Thermal and Mechanical Behavior of Polypropylene Nanocomposites Toughened with Poly (Ethylene - Co - Octene)", *Polymer International*, Vol. 55, No. 2, pp. 204-215, 2006.
- [23] Thomas, S. and Visakh, P., "Handbook of Engineering and Specialty Thermoplastics, Volume 3: Polyethers and Polyesters", John Wiley & Sons, 2011.



بررسی اثر نانوصفحات گرافن و نانوتیوب کربن بر بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی

ابوالفضل بابازاده¹، محمد جعفر حداد^{2*}، مجید صفرآبادی³

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی 14155-6619، mjhadad@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

کامپوزیت‌ها، از جمله مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص مهمی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و دامنه گسترده تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. از راه‌های بهبود و دستیابی به خواص برتر، اصلاح و بهینه‌سازی فرآیند تولید و توجه به استفاده از نانوذرات، به عنوان مقاوم‌ساز در این مواد، است. در همین راستا، روش ریخته‌گری گردابی به عنوان یکی از روش‌های توزیع ذرات مقاوم‌ساز در مذاب، در نظر گرفته شده و با توجه به خواص نانوذرات پایه کربنی، از سه درصد وزنی 0.01، 0.05 و 0.1 از نانوصفحات گرافن و نانوتیوب کربن به عنوان ذرات مقاوم‌ساز در آلیاژ اولیه A356 استفاده شد. با چندین مرتبه سعی و خطا، مناسب‌ترین شرایط برای اضافه کردن مقاوم‌سازها به مذاب حاصل شد. این شرایط شامل سرعت چرخش همزن گرافیتی، 500 RPM به مدت یک دقیقه به صورت متوالی و در دمای 740 درجه سانتیگراد حاصل شد. آنالیز عنصری، فازی و بررسی‌های ریزساختاری، توزیع و ایجاد نانوذرات مقاوم‌ساز را در زمینه کامپوزیت تایید کرد. آزمون کشش، بهبود استحکام تسلیم، نهایی و شکست را نشان داد، به گونه‌ای که حداکثر افزایش استحکام و ازدیاد طول، با استفاده از 0.1 درصد وزنی گرافن، 28% و 2.6% بوده است. همچنین با استفاده از 0.1 درصد وزنی نانوتیوب کربن، سختی نانوکامپوزیت تا 88.4 ویکرز افزایش یافته که بهبود 33% را نسبت آلیاژ بدون مقاوم‌ساز نشان می‌دهد. افزایش همزمان استحکام و کرنش از مهم‌ترین نتایج این پژوهش است.

دریافت: 1398/12/29

پذیرش: 1399/11/10

کلیدواژه‌ها:

گرافن

کامپوزیت

ریخته‌گری گردابی

همزن

نانوتیوب کربن

Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites

Abolfazl Babazade, Mohammadjafar Hadad*, Majid Safarabadi

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14155-6619, Tehran, Iran, mjhadad@ut.ac.ir

Keywords

Graphene,
Composite,
stir casting,
nanotube carbon,

Abstract

One of the methods to improve and achieve superior properties, is to modify and optimize the Manufacturing Process and to consider the use of nanoparticles as reinforcements in these materials. In this regard, stir casting method is considered as one of the methods of distribution of refractory particles in the melt and three percent by weight of 0.01, 0.05 and 0.1% of graphene nameplates and carbon nanotubes as reinforcements particles added to The primary alloy A356, due to the properties of carbon based nanoparticles. The optimum conditions, including the rotational speed of the graphite mixer, 500 RPM, were obtained for one-minute mixing in a row, at 740°C. The results of elemental, phasic and microstructural analysis, confirmed, the distribution correctly of reinforcements nanoparticles in the composite matrix. The tensile test showed, an increase in yield, ultimate and fracture strength, and also strain, so that the maximum increase in strength and strain using 0.1 wt.% graphene, was 28% and 2.6%, respectively. Also, by using 0.1 wt.% carbon nanotube, the nanocomposite hardness increased to 88.4 Vickers, indicating a 33% improvement in the ratio of non-reinforced alloy.

1- مقدمه

منحصراً آلیاژی دارند [1]. به طور کلی، فاز گسسته و توزیع شده، مقاوم‌ساز و فاز پیوسته و غالب، زمینه یا ماتریکس نامیده می‌شود. مطابق با ماهیت شیمیایی فاز زمینه، مواد کامپوزیت به سه دسته زمینه فلزی¹، زمینه

کامپوزیت‌ها موادی هستند متشکل از دو یا چند ماده در فازهای فیزیکی و شیمیایی مختلف، که برای دستیابی به خواص بهتر، در کنار هم قرار گرفته‌اند. به طور ویژه، کامپوزیت‌ها خواص بسیار متفاوتی نسبت به مواد

¹ Metal Matrix Composite

Please cite this article using:

Babazade, A., Hadad, M.J., Safarabadi, M., "Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1197-1206, 2021.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

شیمیایی و فیزیکی و نیز عدم وجود یا ناچیز بودن تخلخل و فیلم های اکسیدی سبب حصول خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب در محصول نهایی می شود [11].

یکی از چالش هایی که برای استفاده از نانوذرات وجود دارد، توزیع یکسان آن ها در زمینه می باشد [11]. جریان گردابی ایجاد شده به وسیله چرخش همزن، ضربات انفجار گونه به خوشه ها و کلوخه های نانوذرات وارد می کنند و از این طریق خوشه های نانوذرات را می شکنند. ضربه شدید به همراه درجه حرارت های بسیار بالای گذرا سبب افزایش ترشوندگی ذرات توسط مذاب می شود. بررسی خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت ها نشان داده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نانو کامپوزیت ها نسبت به آلیاژ پایه به میزان چشمگیری بیشتر است [12]. بررسی ریزساختار نانو کامپوزیت های فوق نشان داده است که اندازه دانه و بازوهای دندردیتی فاز زمینه نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ مربوطه کوچکتر است. یکی از اثرات مهم حضور نانوذرات، حذف ترکیبات بین فلزی مضر گزارش شده است [13].

مطالب عنوان شده، از مهمترین عوامل برای برابر یا بهتر بودن انعطاف پذیری⁷ نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ پایه محسوب می شوند. توزیع و پراکندگی نانوذرات در زمینه نانو کامپوزیت نسبتاً مطلوب است و همواره تعدادی خوشه و کلوخه نانوذرات در نواحی مجاور مرز دانه ها و یا در امتداد مرز دانه ها مشاهده شده است. علاوه بر این، گزارش شده است که نانوذرات مجزا بیشتر در درون دانه ها یا بازوهای دندردیتی فاز زمینه پراکنده شده اند [12].

گرافن با تعداد لایه های کم توده های صفحه ای شکل از 2 تا 10 عدد لایه گرافتی می باشد. این نوع گرافن در ابتدا به عنوان محصول جانبی و یا پیش محصول تولید گرافن تک لایه شناخته می شد، اما بعدها به عنوان یک ماده تجاری مورد توجه قرار گرفت. گرافن بسیار نازک دارای ضخامت بیش از 10 ورقه (3 - 5) و البته کمتر از 100 nm می باشد. به طور کلی گرافن به عنوان ساختاری دارای سه لایه و یا کمتر تعریف می شود [14]. اخیراً خواص الاستیکی و استحکام شکست اولیه گرافن تک لایه با مخروط فرورونده نانو توسط AFM اندازه گیری شده است. گزارش شده است که گرافن بدون عیب دارای مدول یانگ 1 TPa و استحکام کششی 130 GPa می باشد. یک ماده ورق های شکل تهیه شده از لایه های اکسید گرافن دارای مدول الاستیک متوسط و استحکام کششی بالای به ترتیب حدود 23 GPa و 100 MPa می باشد. خواص مکانیکی این کاغذ اکسید گرافنی با معرفی پیوندهای عرضی شیمیایی بین صفحات بهبود یافت [15].

نانولوله های کربنی، هم از نظر مقاومت کششی و هم از نظر ضریب کشسانی، یکی از محکم ترین موادی هستند که تاکنون شناخته شده اند. این استحکام برگرفته از پیوندهای کووالانسی sp بین اتم های کربن است. مدول یانگ نانولوله های کربنی در راستای محورشان بسیار زیاد است. نانولوله ها به دلیل طول بسیار زیادشان از قابلیت انعطاف پذیری بالایی برخوردارند. در نتیجه، این ترکیبات برای کاربرد در مواد مرکب که به خواص ناهمگون نیاز دارند، بسیار مناسبند [16]. مقاومت کششی CNT برابر 63 GPa اندازه گیری شد. برای مقایسه، به مقاومت کششی فولاد کربنی مرغوب برابر 1.2 GPa است. همچنین، CNT ضریب کشسانی بسیار بالایی حدود 1 TPa دارد. با در نظر گرفتن این که نانولوله های کربنی چگالی وزنی پایینی 1.3 تا 1.4 g/cm³ دارند، استحکام ویژه آنها در میان تمام مواد شناخته شده، بهترین است. لوله

پلیمری¹ و زمینه سرامیکی² دسته بندی می شوند. به دلیل تبعیت تغییرات و بهبود خواصی مانند چگالی، انبساط حرارتی، استحکام کششی، فشاری و خزشی، با تغییرات کسر فاز مقاوم ساز، توجه محققان به پژوهش در مورد کامپوزیت های زمینه فلزی جلب شده است [2]. نیاز روز افزودن به مواد پیشرفته در صنایع مهمی مانند هوافضا و خودروسازی، سبب توسعه در پژوهش های مرتبط با کامپوزیت های زمینه فلزی شده است. کامپوزیت های زمینه فلزی آلومینیوم، به دلیل دارا بودن خواص برجسته ای مانند استحکام و سفتی زیاد، قابلیت ریخته گری بالا و مقاومت به سایش عالی، کاربردهای گسترده ای در صنایع خودرو سازی و هوافضا پیدا کرده، به طوری که با پیشرفت چشمگیر در این زمینه، بر کاربرد این کامپوزیت ها، افزوده شده است [3]. در این راستا، تلاش های زیادی برای بهبود خواص این مواد، با افزودن مقاوم سازها صورت گرفته است [4]. اغلب، در کامپوزیت های زمینه آلومینیومی، فاز زمینه غنی از آلومینیوم یا یک از آلیاژهای آن و فاز مقاوم ساز یک فاز غیر فلزی مانند CNT، B₄C، SiO₂، Al₂O₃، SiC و گرافن است [5]. این دسته از کامپوزیت ها در بخش های مختلف مهندسی تحت آزمون و تست های کاربردی و ساختاری قرار گرفته و به دلیل تنوع در خواص مکانیکی، که وابسته به میزان مقاوم ساز و درصد عنصر آلومینیوم در فاز زمینه است؛ کارایی آن ها اثبات شده است. با این حال، از جمله معایب این مواد، هزینه ی بالا در مرحله ساخت و مواد مقاوم ساز بیان شده است. اصلاح و بهبود روش تولید این مواد، در کاهش هزینه و در نتیجه توسعه کاربردشان، نقشی اساسی دارد. کامپوزیت زمینه آلومینیومی با مقاوم ساز ذره ای⁴، به دلیل دارا بودن خواص همسانگرد⁵ و هزینه نسبی تولید پایین به موضوعی جالب برای پژوهشگران، تبدیل شده است. ارزیابی و بررسی های انجام شده بر روش ها و فنون تولید و ریخته گری، ثابت می کند استفاده از همزن در مرحله ریخته گری⁶، سبب کاهش چشمگیر هزینه های تولید این نوع کامپوزیت می شود [6-8].

کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته از راه های گوناگونی نظیر متالورژی پودر، تزریق مذاب در پیش ساخته، رسوب همزمان، آلیاژ سازی مکانیکی و روش های گوناگون ریخته گری نظیر ریخته گری کوبشی، ریخته گری نیمه جامد، ریخته گری گردابی و دیگر روش ها تولید می شوند [7-11]. روش ریخته گری گردابی شامل هم زدن شدید فلز مذاب، تشکیل گرداب و وارد شدن ذرات تقویت کننده به داخل گرداب می باشد. پس از افزودن ذرات تقویت کننده به مذاب، دوغاب حاصله به مدت زمان معینی هم زده می شود، سپس با روش های متداول، ریخته گری انجام می گیرد [11].

لازم بذکر است که حضور ذرات تقویت کننده سخت در زمینه آلومینیوم همواره منجر به بهبود خواص نمی شود. حضور فیلم های اکسیدی و تخلخل در کامپوزیت های تهیه شده از روش ریخته گری گردابی به دلایل مختلف از جمله کشیده شدن هوا به داخل مذاب در حین هم زدن دوغاب کامپوزیتی و ممانعت از خروج گازها از دوغاب پس از ریخته گری به دلیل گرانبوی بیشتر در مقایسه با آلیاژ زمینه، می تواند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت های ریخته گری شده اثر معکوس داشته باشند. در مورد کامپوزیت های زمینه فلزی ذره ای، عموماً توزیع یکنواخت و مناسب بین زمینه و ذره، وجود تطابق

¹ Polymer Matrix Composite

² Ceramic Matrix Composite

³ Carbon Nano Tube

⁴ Particulate-Reinforced Aluminum-Metal Matrix Composites

⁵ Isotropic

⁶ Stir Casting

⁷ Elongation

ایکس، آنالیز عنصری اسپکتروسکوپی نشری¹، آزمون‌های مکانیکی سختی سنجی و کشش و آنالیز ریزساختاری و متالوگرافی بوده است. با بررسی و تطابق نتایج این مراحل، بحث و نتیجه این پژوهش حاصل شده است.

2-1- تهیه و آماده‌سازی آلیاژ و پودر اولیه

در این پژوهش، از پودر نانو تیوب کربن و پودر گرافن، به عنوان مقاوم‌ساز با مشخصات ذکر شده در جدول 1 استفاده شده است.

جدول 1 مشخصات پودرهای مقاوم‌ساز

Table 1 Characteristics of reinforcement powders

نوع	خلوص (%)	چگالی (g/cm ³)	اندازه دانه (nm)
نانو تیوب کربن	>90	2.1	10-20
گرافن	>95	1.26	5-15

مطابق با پژوهش‌های انجام شده در این زمینه [22]، آلیاژ پایه آلومینیومی A356، به دلیل سهولت در دسترسی و هم‌چنین قابلیت تعمیم نتایج و شهرت این آلیاژ، به کار گرفته شده است. برای شناسایی و اطمینان از ترکیب شیمیایی آلیاژ اولیه آلومینیومی A356، از آزمون عنصری اسپکتروسکوپی نشری استفاده شد. جدول 2، ترکیب شیمیایی این آلیاژ اولیه را نشان می‌دهد.

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ A356 اولیه

Table 2 Chemical Composition of primary A356 alloy

عنصر	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu
درصد وزنی	8.21	0.35	0.01	0.19	0.09	0.09

همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد، یکی از روش‌های جدید و نوپا برای تولید نانوکامپوزیت‌ها، روش ایجاد جریان گردابی در مخلوط مذاب با استفاده از همزن است. در این راستا، ابتدا، شمش‌ها آلیاژ اولیه A356، با استفاده از اهر نواری به تکه‌های 100 گرمی بریده و تقسیم بندی شد. تکه‌های ایجاد شده تا مقدار 860 گرم در بوته‌ای از جنس گرافیت قرار گرفته و کل مجموعه درون کوره ی مقاومتی تنظیم شده بر دمای 740°C قرار داده شد. باید توجه شود، با وجود هزینه کمتر استفاده از بوته فولادی، از این بوته نمی‌توان برای ذوب و ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیومی استفاده کرد، چرا که باعث جذب عنصر آهن در مذاب و تغییر ترکیب شیمیایی و در نتیجه تغییر خواص نهایی قطعه خواهد شد.

به منظور اضافه کردن ذرات مقاوم‌ساز به مذاب، مطابق پژوهش‌های مشابه [22-26]، می‌بایست این ذرات همراه با قسمتی از مواد اولیه، به مخلوط مذاب اضافه شود. در واقع، با اضافه کردن این ذرات مقاوم‌ساز به صورت مجزا، به علت واکنش شدید، احتمال توزیع مناسب ذرات مقاوم‌ساز در سراسر مخلوط مذاب، کاهش یافته، بنابراین سبب افت خواص مکانیکی قطعه خواهند شد. به همین دلیل، از پودر آلومینیوم خالص استفاده شد. هم‌چنین به منظور افزایش ترشوندگی ذرات مقاوم‌ساز و در نتیجه توزیع بهتر در مذاب، از پودر منیزیم خالص استفاده شده است.

بنابراین، در هر مرتبه، مقدار معینی از ذرات مقاوم‌ساز، با 100 گرم پودر آلومینیوم خالص و 40 گرم پودر منیزیم خالص، در هاون سرامیکی، مخلوط شده و 20 دقیقه عملیات آسیاکاری برای افزایش توزیع ذرات در مخلوط

ها تحت نیروی کششی بالا، دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند؛ یعنی تغییر شکل دائمی پیدا می‌کنند. در حالت فشار و به هم فشردگی، استحکام CNT کم‌تر است. این به دلیل ساختار درون تهی آنهاست که به پیچ خوردن یا خم شدن آنها (پدیده کماتش در نانولوله‌های جداره نازک یا پدیده چین خوردگی در نانولوله‌های جداره ضخیم) تحت تنشهای خمشی، پیچشی یا فشاری منجر می‌شود [17].

تحقیقات انجام شده بر روی کامپوزیت‌های زمینه فلزی با مقاوم‌ساز ذره‌ای در ابعاد میکرو [18] نشان می‌دهد هر چند مراحل تولید به دقت کنترل شود تا ذرات به صورت یکنواخت توزیع شوند باز هم کارایی کمتری برای افزایش استحکام نسبت به ذرات نانومتری (ذرات با اندازه ای در محدوده 10-200 nm) خواهند داشت. به صورت کلی، ذرات بزرگتر از 1.5 میکرومتر مستعد ورقه ورقه شدن و ذرات بین 200 تا 1500 نانومتر، تمایل به ایجاد حفره در فصل مشترک خود با زمینه دارند. ذرات کوچکتر از 200 نانومتر اتصال بسیار خوب با زمینه داشته که نتیجه آن خواص مکانیکی عالی و خواص حرارتی و الکتریکی قابل توجه است. هم‌چنین با مقدار کمتری از ذرات نانو می‌توان به خواص یکسانی دست یافت [18]. استفاده از مقاوم‌ساز نانو منجر به تغییر نحوه شکست از درون دانه ای به بین دانه ای می‌شود. هم‌چنین با بهبود قابل توجهی در متوسط چقرمگی شکست، مقاومت به خزش، مقاومت در برابر شوک حرارتی مقاومت در برابر ساییش و هم‌چنین افزایش پایداری ابعادی در دمای بالا همراه است [19]. در پژوهشی مشابه، با بررسی اثر نانو صفحات گرافن بر کامپوزیت ریخته‌گری آلومینیوم 7068، تغییرات ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی را گزارش شده است [20]. در این گزارش، بهبود خواص مکانیکی به خصوص استحکام کششی نهایی UTS، در حضور 0.5 درصد گرافن، 41 درصد افزایش داشته است. هم‌چنین عنوان شده است که مکانیزم اصلی در افزایش استحکام این نانو کامپوزیت، قفل کردن و تغییر مسیر ترک می‌باشد. در پژوهشی دیگر اثر افزودن 1.5 درصد وزنی نانوتیوب کربن به آلیاژ آلومینیومی 2024 بررسی شده است. مطابق نتایج ارائه شده، استحکام فشاری، استحکام تسلیم و استحکام نهایی آلیاژ، به ترتیب به میزان حدودی 28٪، 29٪ و 32٪ افزایش یافته است. بر طبق گزارش این تحقیق، پدیده بیرون‌کشی الیاف CNT در زمینه و پل‌زدن نانوتیوب‌ها در بین ترک‌های ایجاد شده، در حین تغییر شکل پلاستیک باعث افزایش استحکام مکانیکی و در نتیجه شکست نرم شده است [21].

هدف از این پژوهش، بررسی و تعیین مناسب‌ترین درصد وزنی دو نوع مطرح مقاوم‌سازهای پایه کربنی؛ نانوتیوب کربن و نانوصفحات گرافن؛ در نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی و تعیین چگونگی تغییر خواص مکانیکی بوده است. هزینه تهیه مواد مقاوم‌ساز در این پژوهش از جمله عوامل کنترل‌کننده است، بنابراین در انتخاب بازه درصد وزنی مواد افزودنی، به این نکته توجه شد. اصلاح و بهینه‌سازی مراحل فرآیند ریخته‌گری از دیگر اهداف این پژوهش بوده است. ارائه مجموعه‌ای از بهبود خواص مکانیکی، کاهش هزینه‌های فرآیند ریخته‌گری به علت قالب‌ریزی مستقیم، طراحی سیستم چرخشی با توجه به حجم دمای مذاب، طراحی شکل پره همزن با توجه به ویسکوزیته مذاب و چگونگی افزودن ذرات مقاوم‌ساز به مذاب از نتایج و نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

2- روش تحقیق

مراحل عملی این پژوهش شامل تهیه آلیاژ اولیه آلومینیومی و پودر اولیه، عملیات ریخته‌گری و انجام آزمون‌های شناسایی نظیر آنالیز فازی پراش پرتو

¹ Optical Emission Spectrometry

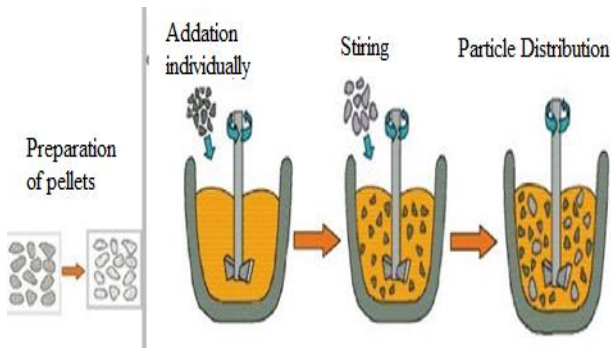


Fig. 1 Scheme of steps for adding pellets and mixer rotation

شکل 1 طرحواره مراحل افزودن گندله و چرخش همزن

در این پژوهش با توجه به سرعت چرخش 500 دور بر دقیقه و ویسکوزیته مذاب، از همزنی به شکل 2-الف، استفاده شد. همانند بوته، برای این آلیاژ، جنس همزن نیز باید از گرافیت باشد. نحوه ی اتصال همزن به سیستم تولید نیرو، قرارگیری در بوته و استفاده از ورق‌های فولادی جهت کاهش تماس سطح مذاب با اتمسفر در شکل 2-ب، مشاهده می‌شود. به محض پایان چرخش همزن، بوته محتوی مذاب از کوره خارج و با رعایت سرعت بحرانی آلیاژ آلومینیوم، همراه با انجام عملیات سرباره‌گیری جهت جلوگیری از ورود اکسید به قالب، ذوب‌ریزی درون قالب استوانه‌ای؛ پیش‌گرم شده تا دمای 200°C ؛ انجام شد. در شکل 2-الف، این قالب مشاهده می‌شود.



Fig. 2 A: Graphite mixer and cylindrical mold. B: Mixer and power generation setup.

شکل 2 الف: همزن گرافیتی و بوته استوانه‌ای. ب: نحوه قرارگیری همزن بر سیستم

ضخامت این قالب بر سرعت سرمایش و در نتیجه خواص مکانیکی قطعه، به شدت اثرگذار است. بنابراین مطابق با پژوهش‌های انجام شده [23-24]، از قالبی یک سر باز، از جنس فولاد، با ضخامت 12mm، ارتفاع 255mm و قطر خارجی 125mm، استفاده شد. لازم به ذکر است، جهت سهولت در خروج محصول از قالب، پیش از ذوب ریزی، سطح داخلی قالب با پودر گرافیت آغشته شد. در نهایت قالب محتوی مذاب، بعد از ریخته‌گری در هوای آزاد سرد شد. این مراحل برای هر شش نمونه، تکرار شد. جدول 4، طریقه نام‌گذاری این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

پودری، انجام شد. مشخصات اجزای مخلوط پودری تولید شده، در جدول 3 مشاهده می‌شود.

جدول 3 درصد وزنی پودرهای مقاوم‌ساز.

Table 3 Weight Percentage of reinforcement powders

درصد وزنی (%)		وزن (گرم)		نوع پودر		
---	---	100	40	آلومینیوم		
---	---	---	---	منیزیم		
0.1	0.05	0.01	1	0.5	0.1	نانو تیوب کربن
0.1	0.05	0.01	1	0.5	0.1	گرافن

2-2- عملیات ریخته‌گری گردابی

همان‌طور که اشاره شد، آلیاژ آلومینیومی A356، پس از برش تا مقدار 860 گرم درون یک بوته گرافیتی قرار داده شده، و به درون کوره مقاومتی با دمای 740°C انتقال داده شد. باید توجه شود، به منظور جلوگیری از وارد شدن شوک حرارتی به بوته گرافیتی، می‌بایست بوته به همراه محتوی، در دمای پایین به درون کوره منتقل شود. به عبارت دیگر، مواد شارژی جهت تهیه ذوب، باید همراه با کوره تحت افزایش دما قرار گیرد.

مخلوط پودری حاصل شده از مرحله آماده‌سازی، به چهارده قسمت برابر تقسیم شده و هر قسمت درون فویل آلومینیومی پیچیده شده و به شکل گندله تبدیل شد. دلیل استفاده از فویل آلومینیومی، جلوگیری از پاشش پودر هنگام ورود به مخلوط مذاب و جلوگیری از اتلاف آن بوده است. پس از آماده‌شدن مذاب آلیاژ اولیه، در دمای 740°C ، یک گندله درون مذاب قرار گرفته و عملیات همزدن با سرعت و به مدت زمان معین انجام شد. عملیات همزدن برای سیزده گندله دیگر نیز انجام شد. مراحل بیان شده برای اضافه کردن گندله‌ها، صرفاً برای یک درصد وزنی معین از مقاوم‌ساز بوده است. به عبارت دیگر، تهیه و اضافه کردن گندله‌ها به مذاب، برای دو مقاوم‌ساز گرافنی و نانوتیوب کربنی و به میزان 0.01، 0.05 و 0.1 درصد وزنی؛ یا به عبارتی مجموعاً شش مرحله؛ انجام شد. به دلیل تمایل شدید اکسیداسیون مذاب آلومینیوم، در حین چرخش همزن در مذاب، از دمش گاز آرگون با خلوص 99.999 درصد با فشار 3 میلی بار و مجهز به رطوبت‌گیر، اطراف و بر سطح مذاب استفاده شد.

با توجه به گزارش‌ها و نتایج پژوهش‌های انجام شده مشابه [22-23]، سرعت چرخش همزن 500 دور بر دقیقه و زمان چرخش این همزن بین اضافه کردن دو گندله متوالی، یک دقیقه تنظیم شد. انتخاب سرعت چرخش بیش از این مقدار، سبب ایجاد جریان متلاطم درون مذاب و پاشش به بیرون؛ و سرعتی کمتر از این مقدار سبب عدم توزیع مناسب ذرات مقاوم‌ساز گزارش شده است. هم‌چنین انتخاب زمان بیش از یک دقیقه سبب گسترش اکسیداسیون درون مذاب؛ به علت ماهیت اکسید شونده‌گی شدید آلیاژهای آلومینیوم خواهد شد. زمان کمتر نیز، باعث کاهش تاثیرگذاری جریان گردابی بر توزیع ذرات شده است [22]. طرحواره کلی مراحل افزودن ذرات مقاوم‌ساز به مذاب و چرخش همزن، در شکل 1، مشاهده می‌شود.

یکی از مهم‌ترین عوامل در ایجاد جریان گردابی و توزیع مناسب ذرات درون مذاب، شکل پره همزن است. هم‌چنین توانایی کنترل چرخش مذاب و جلوگیری از پاشش مذاب به بیرون نیز از عوامل موثر در انتخاب همزن است

جدول 4 نام گذاری نمونه‌ها

Table 4 Naming samples

نوع	درصد وزنی مقاوم‌ساز		
	0.01	0.05	0.1
CN	CNT-0.01	CNT-0.05	CNT-0.1
GR	GRF-0.01	GRF-0.05	GRF-0.1

نانوکامپوزیت حاصل از ریخته‌گری گردابی، در شکل 3-الف، مشاهده می‌شود. برای انجام آزمون‌های مختلف، نمونه‌های حاصل از ریخته‌گری با استفاده از اره نواری به قطعات کوچک‌تر تبدیل شدند. برای بررسی ترکیب شیمیایی نانوکامپوزیت‌های تولید شده و اطمینان از صحت روش تولیدی، از آزمون اسپکتروسکوپی نشری (کوانتومتری) استفاده شد. مدل این دستگاه Hitachi High-Tech FOUNDRY-MASTER Smart بوده است. برای آماده‌سازی این آزمون، با ایجاد برش عرضی از مقطع نمونه‌ها و سمباده زنی تا سمباده مش 1000، سطح نمونه کاملاً مهیا انجام آزمون شد. شکل 3-ب، نمونه آماده شده برای انجام این آزمون را نشان می‌دهد. برای بررسی فازهای تشکیل شده در نانوکامپوزیت، از روش پراش اشعه ایکس و با استفاده از دستگاه مدل Bruker استفاده شد. از نمونه‌های آماده شده برای آزمون قبل، برای انجام این آزمون نیز استفاده شد. نتایج این آزمون با استفاده از نرم افزار XPert High Score تحلیل شد. به منظور بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت، از نمونه‌های مقطع زده شده استفاده شد. بدین صورت که نمونه‌ها در ابتدا تا مش 3000، سمباده زنی شده و سپس با استفاده از دستگاه پولیش مکانیکی، با استفاده از نمد مخصوص، عملیات پولیش انجام شد. در حین پولیش، پاشش محلول ذرات آلومینا 1.5 میکرومتر، انجام شد. سرعت چرخش پولیش 150 دور بر دقیقه بوده و به مدت 30 دقیقه عملیات پولیش ادامه یافت. تصاویر ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل MeijiMT7530 و تا بزرگنمایی 100 ثبت شد. آزمون‌های کشش و سختی ویکرز، برای بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های تولید شده، به کار گرفته شد. مطابق با استاندارد ASTM E8 [27] نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمون کشش تراشکاری و آماده شد. این آزمون با دستگاه یونیورسال مدل SANTAM SAF-50، با ظرفیت 5 تن و نرخ کرنش 5mm/min انجام شد. شکل 3-ج، الگو و شکل 3-د، نمونه‌های تهیه شده برای این آزمون را نشان می‌دهد. ابعاد این الگو در جدول 5، قابل مشاهده است.

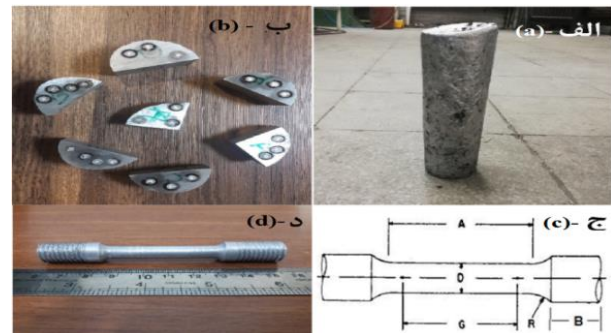


Fig. 3 A: CNT-0.01, B: Samples prepared for XRD, OES and Hardness Test C: Scheme of standard sample for Tensile Test D: Sample prepared for Tensile Test.

شکل 3 الف: نانوکامپوزیت تولید شده CNT-0.01. ب: نمونه‌های آماده‌سازی شده برای پراش اشعه ایکس، کوانتومتری، سختی سنجی، ج: نمای نمونه استاندارد کشش، د: نمونه آماده شده برای آزمون کشش.

جدول 5 ابعاد الگوی نمونه ی آزمون کشش مطابق استاندارد E8.

Table 5 Dimensions of Tensile Test Sample According to ASTM E8.

طول مشخصه	قطر	شعاع گوشه	طول قسمت کاهش یافته	طول قسمت انتهایی	قطر قسمت انتهایی	نماد
G	D	R	A	B	E	اندازه (mm)
36	9	8	45	25	14.4	

از دستگاه سختی ویکرز مدل Koopa UV-1، با وزن اعمالی 31.25 Kg برای انجام آزمون سختی بر روی نمونه‌های تهیه شده برای متالوگرافی، استفاده شد. نتایج ارائه شده میانگین 8 مرتبه انجام سختی سنجی است. لازم به ذکر است، جهت بررسی و مقایسه اثر افزودن مقاوم‌سازهای مختلف، از هر 6 نمونه برای آزمون‌های کوانتومتری، کشش و سختی استفاده شد. حال این‌که، برای آزمون‌های کیفی پراش اشعه ایکس و متالوگرافی صرفاً از دو نمونه CNT-0.1 و GRF-0.1 استفاده شده است. دلیل انتخاب این دو نمونه عدم نیاز به مقادیر کمی در این دو آزمون و استفاده از بیش‌ترین مقدار حضور مقاوم‌سازها بوده است.

۱- نتایج و تحلیل

1-3- بررسی‌های عنصری و فازی

نتایج آزمون عنصری کوانتومتری در جدول 6 مشاهده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شده بود، آزمون کوانتومتری، ترکیب شیمیایی نانوکامپوزیت‌های تولید شده را مشخص می‌کند. با توجه به نزدیک بودن مقادیر عنصر کربن به درصد وزنی اسمی در هر شش نمونه، می‌توان صحت و درستی عملیات تولید نانوکامپوزیت را نتیجه گرفت. همچنین مقادیر منیزیم در مقایسه با مقدار منیزیم در آلیاژ اولیه؛ جدول 2 به شدت افزایش یافته، که ناشی از افزودن پودر منیزیم خالص به همراه مقاوم‌ساز است. از لحاظ کمی، مقدار منیزیم در نانوکامپوزیت‌های تولید شده، نسبت به آلیاژ اولیه حدود 2.2% افزایش یافته، (افزایش 0.35% به میانگین 2.55%)، حال آن‌که، از لحاظ اسمی مقدار منیزیم می‌بایست 4٪ افزایش می‌یافت (40 گرم در 1000 گرم مذاب). این مقایسه نشان می‌دهد، در تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با مقاوم‌سازهای گرافن و نانوتیوب کربن، اتلاف منیزیم همراه با مقاوم‌ساز، 1.8% است که برای تولید با درصد‌های متغیر مقاوم‌ساز، محاسبه و گزارش این مقدار بسیار سودمند است. از توجه بیشتر به نتایج ترکیب شیمیایی، می‌توان نتیجه گرفت به دلیل نزدیکی و عدم انحراف مقدار سیلیسیوم، در نمونه‌های تولید شده؛ ایجاد جریان گردابی با مشخصه‌های سرعت چرخش و زمان همزن، در توزیع عناصر آلیاژی مفید و موثر بوده است. نتایج آزمون پراش اشعه ایکس برای دو نمونه GRF-0.1 و CNT-0.1 در شکل 4 مشاهده می‌شود. مطابق بخش الف، نانوکامپوزیت GRF-0.1 شامل فازهای Al(α), Al7Si, Fe2Si, C16 (Graphene)، تشخیص داده شد.

بوده که با رنگ روشن در تصویر ریزساختاری مشخص است. در مرزدانه‌ها، فاز تیره‌رنگ و پیوسته Al_7Si ، نشان داده شده که عامل عمومی استحکام‌زا در آلیاژهای A356 است. هم‌چنین فاز سیاه رنگ در میانه تصویر مشاهده شده، که در واقع ذرات بهم‌پیوسته کربنی هستند. توجه شود، آگلومره شدن نانوذرات سبب تشکیل این فاز تیره‌رنگ شده است. در واقع در حالت ایده‌آل، این ذرات آگلومره نباید در ریزساختار تشکیل شوند. البته به دقت در تصاویر ریزساختار، ذرات بسیار ریزی تا ابعاد 0.5 میکرون نیز مشاهده می‌شود، که نشان از توزیع نسبتاً مناسب ذرات مقاوم‌ساز دارد.

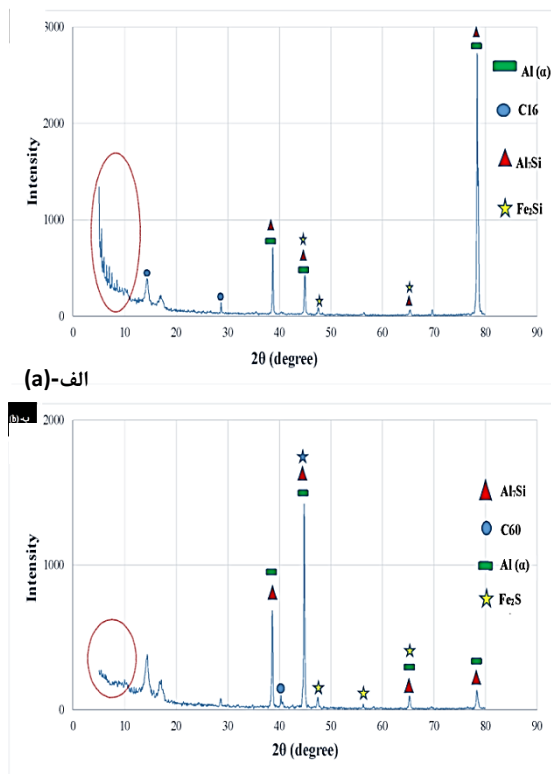


Fig. 4 XRD Patterns a: GRF-0.1 b: CNT-0.1
شکل 4 الگوی پراش پرتوی ایکس، الف: GRF-0.1، ب: CNT-0.1

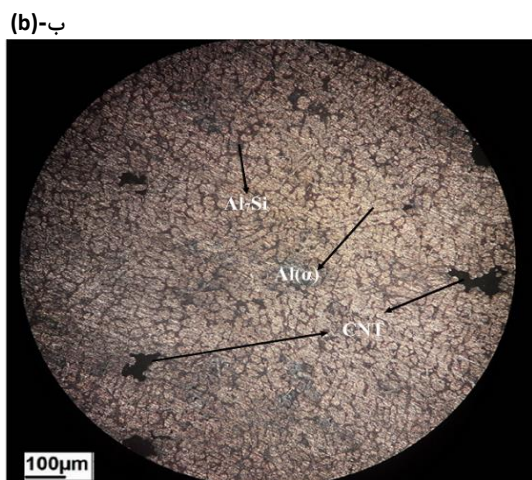


Fig. 5 Microstructure of CNT-0.1 nanocomposite prepared by optical microscope at 100X magnification.
شکل 5 ریزساختار نانوکامپوزیت CNT-0.1 تهیه شده با میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی 100.

جدول 6 درصد اجزای مهم نانوکامپوزیت‌های تولید شده.

Table 6 Chemical Composition of produced Nanocomposites.

نمونه	%		
	C	Si	Mg
CNT-0.01	0.0100	7.281	2.019
CNT-0.05	0.0492	8.407	2.066
CNT-0.1	0.0988	8.215	2.749
GRF-0.01	0.0097	8.232	2.178
GRF-0.05	0.0482	9.417	2.625
GRF-0.1	0.0977	8.425	3.000

فاز زمینه آلومینیومی $Al(\alpha)$ ، غنی از عناصر آلیاژی بوده. به عبارت دیگر عناصر آلیاژی نشان داده شده در جدول 6 کمتر از حد اشباع خودشان در این فاز به صورت محلول جامد حضور دارند. با توجه به این که پایه و اساس آلیاژ اولیه آلومینیومی بوده، حضور این فاز در نانوکامپوزیت، قابل پیش بینی بود. پیک‌ها با بیش‌ترین شدت، مرتبط به این فاز هست، که نشان از غالب بودن این فاز دارد. فازهای بین فلزی Al_7Si ، Fe_2Si نیز به صورت محدود شناسایی شده و که با توجه درصد عناصر Fe و Si ، وجود این فازها نیز قابل پیش‌بینی بوده است. در آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم، فاز Al_7Si ، فاز استحکام ده محسوب می‌شود [28] فاز کربنی گرافن که در نرم افزار Xpert High Score با نام اختصاری C16 شناخته شده، نیز به شکل محدودترین فاز موجود در این نانوکامپوزیت شناسایی شده است. نکته قابل توجه در مورد فاز C16 این است که پیک‌های مرتبط با این فاز همگی تمایل به بخش آمورف و بدون پیک منحنی دارند. این رخداد از آنجایی ناشی می‌شود که گرافن، در واقع کربن دارای ساختار دوبعدی است و طبیعی است فاز بی ساختار متمایل به شکل دوبعدی، نمی‌تواند پراش اشعه ایکس داشته باشد؛ چرا که پدیده تفرق مرتبط با ساختارهای سه بعدی است. با این حال، همان‌طور که مشاهده می‌شود پیک‌هایی به فاز گرافن C16 نسبت داده شده و می‌تواند ناشی از برهم کنش پیک‌های فاز آمورف C16 و فازهای دیگر کریستالی باشد.

شکل 4-ب، الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت CNT-0.1 را نشان می‌دهد. مانند نمونه ی قبل، در این الگو نیز حضور سه فاز $Al(\alpha)$ ، Al_7Si ، Fe_2Si با دلایل و نکات مشابه شناسایی شده است. با توجه به این که این نمونه دارای مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن بوده، حضور فاز C60 که نماد اختصاری فاز نانوتیوب کربنی است، منطقی و قابل پذیرش است. با این حال، در مقایسه با نمونه ی قبلی، فاز C60 دارای ساختار سه بعدی کریستالی بوده، لذا پیک‌های این فاز تمایلی به محدوده آمورف ندارند. هم چنین در این نانوکامپوزیت، بر خلاف نانوکامپوزیت گرافن دار GRF-0.1، از شدت محدوده آمورف کاسته شده، که به دلیل تفاوت در ماهیت کریستالی نانوتیوب کربن و آمورف گرافن است. محدوده آمورف در هر دو الگو، با منحنی بیضی شکل در سمت چپ، مشخص شده است.

3-2- بررسی‌های ریزساختاری

شکل 5 ریزساختار نانوکامپوزیت CNT-0.1 را در بزرگنمایی 100 نشان می‌دهد. مطابق نتایج شناسایی فازها، این نانوکامپوزیت باید دارای فازهای مشخصه خود باشد، که در شکل نشان داده شده است. فاز $Al(\alpha)$ ، فاز زمینه

مطابق شکل 7، نقطه A، معرف نقطه ی تسلیم یا نقطه شروع حرکت نابجایی ها و شروع تغییر شکل پلاستیک است. در نقطه B، حداکثر استحکام کششی ماده بروز داده شده، و در نقطه C، ماده به شکست رسیده است. منطقه 1 نشان دهنده منطقه الاستیک، و مجموع مناطق 2 و 3 نشان گر تغییر شکل پلاستیک هستند. هم چنین تغییر شکل تا پایان منطقه 2 به شکل یکنواخت بوده، اما با وارد شدن به منطقه 3 تغییر شکل نمونه به صورت موضعی اتفاق افتاده است. شکل 8 منحنی تغییرات استحکام بر حسب کرنش را برای شش نمونه نانوکامپوزیت گرافن دار و نانوتیوب دار، نشان می دهد. با استفاده از این منحنی ها، نتایج کمی استحکام حاصل از آزمون کشش در جدول 7 و نتایج کمی کرنش در جدول 8 قابل مشاهده است.

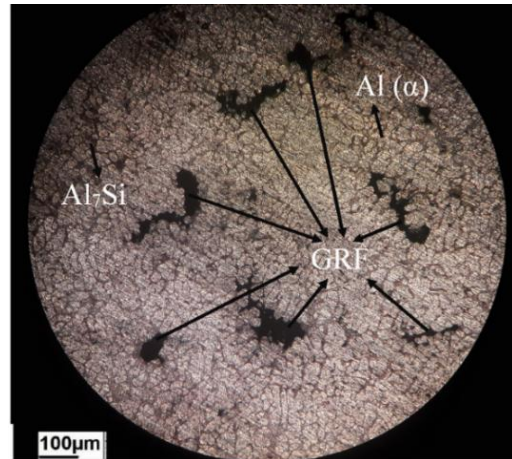


Fig.6 Microstructure of GRF-0.1 nanocomposite prepared by optical microscope at 100 magnifications.

شکل 6 ریزساختار نانوکامپوزیت GRF-0.1 تهیه شده با میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی 100.

ریزساختار نانوکامپوزیت گرافن دار GRF-0.1 در شکل 6 مشاهده می شود. مورفولوژی فاز زمینه $Al(\alpha)$ و فاز بین فلزی Al_7Si ، مشابه مورد قبل است. با این تفاوت که آگلومره های نانوصفحات گرافن با تکرار بیشتر در میانه تصویر مشاهده می شود. دلیل حضور بیشتر فاز گرافن نسبت به نانوتیوب کربن، حتی با درصد وزنی برابر، به شکل ساختاری این دو فاز و در واقع به چگالی آن ها ارتباط دارد. فاز گرافن با چگالی کم تر از نانوتیوب کربن دارای ساختار صفحه ای و دو بعدی بوده، لذا منطقی است که در شرایط درصد وزنی برابر، گرافن کسر حجمی بیشتری از نانوکامپوزیت را اشغال کرده باشد. این مهم، در مقایسه شکل های 5 و 6 کاملاً مشخص است. نکته جالب دیگر این است که، با توجه به جدول 6 و درصد وزنی منیزیم در این دو نمونه، نانوکامپوزیت گرافنی دارای منیزیم بیشتر بوده، لذا اثر گذاری منیزیم در ترکندگی ذرات مقاوم ساز، در این نمونه، بیشتر از نمونه ی نانوتیوب کربنی بوده است. لذا انتظار می رود با افزایش ترشوندگی فاز مقاوم ساز، کسر حجمی افزایش یابد.

3-3- بررسی نتایج کشش

شکل 7 منحنی تغییرات استحکام مهندسی بر حسب کرنش مهندسی و مولفه های قابل شناسایی در آزمون کشش را برای نمونه CNT-0.01 نشان می دهد.

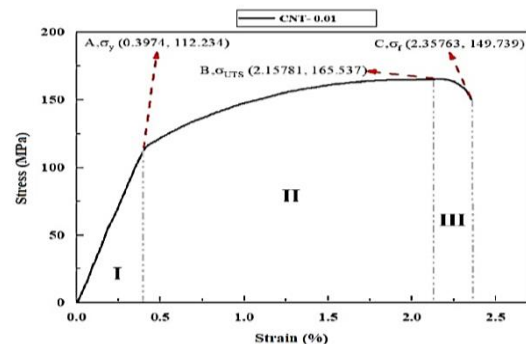


Fig. 7 Engineering Strength Change Curve Vs Engineering Strain for CNT-0.01 Sample.

شکل 7 منحنی تغییرات استحکام مهندسی بر حسب کرنش مهندسی برای نمونه CNT-0.01.

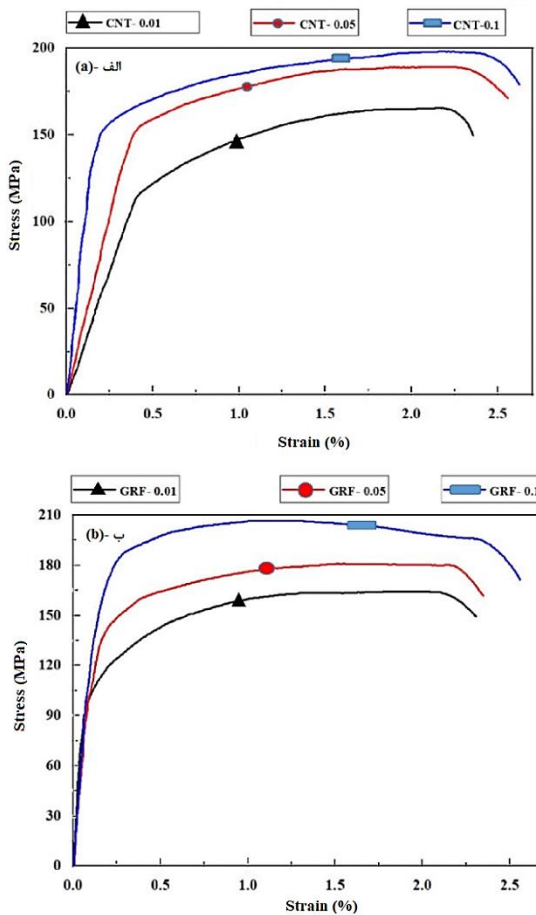


Fig 8 Engineering Strength Variations Curve Vs Engineering Strain for Fabricated nanocomposites A: CNT B: GRF

شکل 8 منحنی تغییرات استحکام مهندسی بر حسب کرنش مهندسی برای نانوکامپوزیت های تولید شده با مقاوم ساز مختلف، الف: نانوتیوب کربن، ب: گرافن

منحنی تغییرات استحکام برای نمونه های نانوتیوب دار؛ شکل 8-الف؛ نشان می دهد با افزایش مقدار مقاوم ساز در نانوکامپوزیت، استحکام در تمام نقاط افزایش یافته است. مکانیزم افزایش استحکام در حضور فاز مقاوم ساز، به دو شکل زیر است: حضور فاز مقاوم ساز و اثر گذاری بر حرکت نابجایی ها، به گونه ای که هم شروع و هم پیشروی حرکت نابجایی ها را با مشکل همراه کرده، که به معنای افزایش استحکام سیلان است. چرا که مطابق تئوری اوروان، نابجایی ها برای عبور از فاز ثانویه، مجبور به برش این فاز شده یا با ایجاد حلقه به دور فاز ثانویه، از آن عبور می کنند. در هر دو مورد، انرژی

جدول 8 نتایج کرنش نانوکامپوزیت‌های تولید شده در آزمون کشش.

Table 8 Results of Strain Tensile Test

نمونه	کرنش پلاستیک e _p %	کرنش شکست e _f %
CNT-0.01	1.96	2.36
CNT-0.05	2.20	2.56
CNT-0.1	2.42	2.63
GRF-0.01	2.17	2.31
GRF-0.05	2.19	2.35
GRF-0.1	2.41	2.56

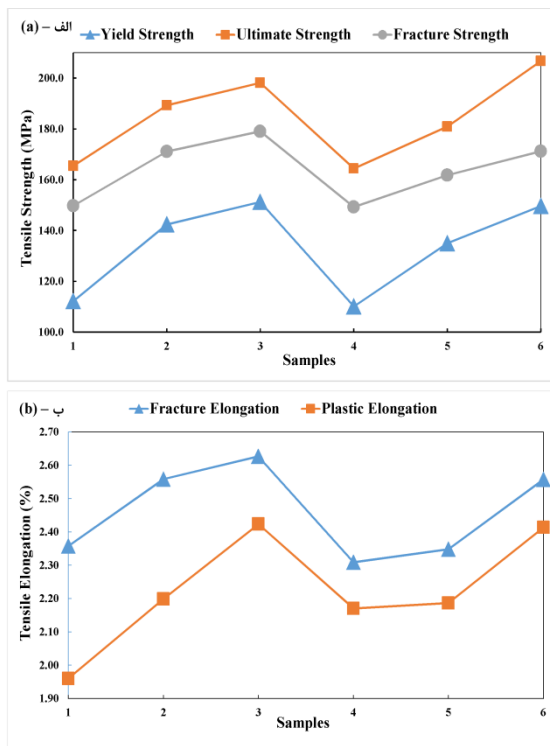


Fig. 9 Trends of Changes in Tensile Test Components a: Strength b: Strain. 1: CNT-0.01 2: CNT-0.05 3: CNT-0.1 4: GRF-0.01 5: GRF-0.05 6: GRF-0.1

شکل 9 روند تغییرات مولفه‌های آزمون کشش الف: استحکام ب: کرنش. نمونه شماره 1: CNT-0.01. 2: CNT-0.05. 3: CNT-0.1. 4: GRF-0.01. 5: GRF-0.05. 6: GRF-0.1.

با توجه به نتایج حاصل در این بخش، می‌توان نتیجه گرفت، به طور کلی افزودن مقاوم‌ساز کربنی، به آلیاژ اولیه آلومینیومی A356، سبب افزایش انعطاف پذیری خواهد شد. در بهترین حالت، با افزودن 0.1% مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن کرنش شکست تا حد 2.63% افزایش یافته. به نظر می‌رسد به دلیل حضور فاز مقاوم‌ساز و ایجاد اثر اصلاح اندازه دانه بر فاز زمینه، جوانه‌زنی و رشد ترک؛ که عامل ایجاد شکست است؛ به تعویق افتاده باشد. همچنین همان‌طور که در بخش بررسی استحکام نیز عنوان شد، حرکت نایجایی‌ها در حضور مقاوم‌ساز به تعویق افتاده که به معنی افزایش انعطاف پذیری و کرنش است.

با توجه به شکل 9-ب، در مقادیر کم، اثر مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن بیش از گرافن بوده. حال آنکه، با افزایش مقدار مقاوم‌ساز تا 0.1%، اثر گذاری

نایجایی جذب خواهد شد، به عبارت دیگر، نایجایی برای حرکت و ادامه تغییر شکل نیاز به انرژی بیرونی خواهد داشت که به معنای اعمال تنش و افزایش استحکام است [29]. مورد دوم، اثرگذاری فاز مقاوم‌ساز بر رشد دانه فاز زمینه در هنگام انجماد. به عبارت دیگر، حضور فاز ثانویه باعث جلوگیری از رشد دانه و اصلاح اندازه دانه فاز زمینه خواهد شد. مطابق رابطه هال-پچ با کاهش اندازه دانه، استحکام به خصوص استحکام تسلیم افزایش می‌یابد. این عامل اثرگذار با عنوان فاکتور محدود کننده رشد در مباحث انجمادی شناخته شده و در گزارش پژوهش‌های انجام شده در این مورد، عنصر کربن یکی از عناصر دارای این فاکتور برای آلیاژهای آلومینیومی شناخته شده است [30]. بنابراین، افزایش استحکام در حضور مقاوم‌سازهای کربنی در آلیاژهای آلومینیومی، منطقی به نظر می‌رسد.

جدول 7 نتایج استحکام نانوکامپوزیت‌های تولید شده در آزمون کشش.

Table 7 Results of strength Tensile Test

نمونه	استحکام تسلیم σ _y (MPa)	استحکام نهایی σ _{uts} (MPa)	استحکام شکست σ _f (MPa)
CNT-0.01	112.2	165.5	149.7
CNT-0.05	142.4	189.4	171.2
CNT-0.1	151.3	198.2	179.0
GRF-0.01	110.2	164.5	149.3
GRF-0.05	135.0	181.0	161.8
GRF-0.1	149.7	206.8	171.3

از طرفی، از مقایسه استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های تولید شده، با استحکام آلیاژ بدون مقاوم‌ساز یا همان آلیاژ اولیه آلومینیومی، می‌توان استنباط کرد، حضور مقاوم‌ساز پایه کربنی حتی با کمترین مقدار یعنی 0.01% نیز سبب افزایش قابل توجه در استحکام شده است. استحکام نهایی آلیاژ A356 در شرایط ریخته‌گری معمولی حدود 160 مگاپاسکال گزارش شده [27]؛ که از استحکام نهایی تمام نمونه‌های تولید شده در این پژوهش کمتر بوده است. در بهترین حالت، با افزودن 0.1% گرافن، استحکام نهایی 206.8 مگاپاسکال حاصل شده، که رشد 28% در استحکام نهایی نسبت به نمونه آلیاژ اولیه را نشان می‌دهد. روند رشد استحکام تسلیم، نهایی و شکست در حضور هر دو مقاوم‌ساز، در شکل 9-الف، کاملاً مشاهده می‌شود. مقایسه استحکام حاصل شده در درصد وزن ثابت، بین دو مقاوم‌ساز، نشان می‌دهد اثر گرافن در افزایش استحکام، به خصوص استحکام نهایی، بیش‌تر از نانوتیوب کربن باشد (شکل 9-الف). در واقع، همان‌طور که در بخش 2-3 و نتایج متالوگرافی عنوان شد، فاز گرافن کسر حجمی بیش‌تری در مقایسه با نانوتیوب کربن، از زمینه اشغال کرده. تصاویر ریزساختاری این مهم را نشان داد. دلیل این امر، چگالی کم‌تر گرافن نسبت به نانوتیوب کربن و تر شونده‌گی بیش‌تر آن عنوان شد. بنابراین، کسر حجمی بیش‌تر به معنای اثرگذاری بیش‌تر بر ایجاد موانع برای حرکت نایجایی‌ها، و در نهایت افزایش استحکام خواهد بود.

تغییرات طول نسبت به طول اولیه، کرنش مهندسی نامیده می‌شود. کرنش در محدوده تغییر شکل پلاستیک و کرنش تا نقطه شکست، برای نمونه‌های تولید شده، از متحنی‌های شکل 8 محاسبه شده و نتایج کمی آن در جدول 8، گزارش شده است. کرنش پلاستیک آلیاژ آلومینیومی A356، در شرایط ریخته‌گری معمولی حدود 2% گزارش شده است [31].

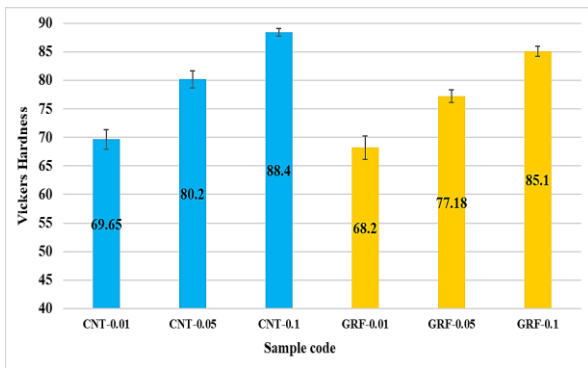


Fig.10 Results of Vickers Hardness

شکل 10 نمودار سختی ویکرز

این پدیده را می‌توان به افزایش کسر حجمی ذرات در فاز زمینه، بر اثر افزایش درصد وزنی، ارتباط داد. در واقع، هر چه انحراف معیار سختی کم‌تر باشد، مبین این نکته است که توزیع ذرات فاز مقاوم‌ساز در زمینه بهتر بوده است. بنابراین انحراف معیار کم در این بخش، می‌تواند نشانه‌ای از خواص مکانیکی مناسب و هم‌چنین صحت عملیات ریخته‌گری گردابی باشد.

4- جمع‌بندی

موارد زیر به عنوان جمع بندی نتایج و دستاوردهای این پژوهش بیان می‌شود:

- با طراحی سیستم چرخشی و همزن، کنترل متغیرها و بهینه‌سازی عملیات ریخته‌گری گردابی، برای تولید نانو کامپوزیت‌های مقاوم شده با نانو صفحات گرافن و نانو تیوب کربن، با موفقیت انجام شد.
- دمای 740°C به عنوان دمای عملیات ریخته‌گری، سرعت چرخش همزن 500 RPM به مدت حدود 14 دقیقه برای هر نمونه، از جمله متغیرهای بهینه‌سازی شده بودند.
- آنالیزهای عنصری و فازی، حضور فاز مجزای کربنی را تایید کرد. هم‌چنین تصاویر ریزساختار، توزیع این فازهای مقاوم‌ساز را در مرزخانه آلیاژ زمینه، نشان داد.
- آزمون کشش نشان داد، حضور و افزایش درصد وزنی مقاوم‌ساز، سبب افزایش استحکام در هر سه نقطه تسلیم، نهایی و شکست، برای هر دو مقاوم‌ساز شده است.
- بیشترین افزایش استحکام نسبت به آلیاژ بدون مقاوم‌ساز، متعلق به مقاوم‌ساز گرافن با درصد وزنی 0.1 بوده است. در این حالت، استحکام تسلیم، نهایی و شکست نانوکامپوزیت، به ترتیب 149.7، 206.8 و 171.3 مگاپاسکال حاصل شد.
- حضور و افزایش درصد وزنی هر مقاوم‌ساز باعث افزایش انعطاف‌پذیری نانوکامپوزیت شده است. بیش‌ترین افزایش در انعطاف‌پذیری، متعلق به مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن با درصد وزنی 0.1، تا میزان 2.63% بوده است.
- در هر دو مقاوم‌ساز، استحکام و انعطاف پذیری همزمان افزایش یافته است، که در نهایت منجر به افزایش چشمگیر انرژی چقرمگی خواهد شد. این امر در طراحی و انتخاب مواد مهندسی، بسیار مهم و ایده‌آل است.
- با حضور و افزایش درصد وزنی مقاوم‌سازها، سختی به عنوان معیاری از مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک، افزایش یافته است. بیش‌ترین سختی حاصل شده متعلق به نانوکامپوزیت مقاوم‌شده با 0.1% وزنی نانوتیوب کربن بوده است. سختی در این حالت تا 88.4 ویکرز افزایش یافته است.

گرافن و نانوتیوب کربن تقریباً برابر شده است. علت این امر می‌تواند چگالی پایین‌تر و تر شونده‌گی بالاتر، گرافن باشد، چرا که افزایش اثر کسر حجمی بر افزایش کرنش را در درصد وزنی بالا، بیش‌تر نشان داده است.

نکته بسیار مهم در بررسی نتایج آزمون استحکام، افزایش همزمان استحکام و انعطاف پذیری، با افزودن فاز مقاوم‌ساز و هم‌چنین افزایش مقدار آن است. این امر می‌تواند به عنوان یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش عنوان شود، چرا که افزایش همزمان این دو معیار مستقل، به معنای افزایش شدید قابلیت جذب انرژی تا شکست، یا همان چقرمگی است.

3-4- بررسی نتایج سختی‌سنجی

آزمون سختی بر نمونه‌های تولیدی انجام گرفته و نتایج آن به صورت میانگین عدد سختی ویکرز در جدول 9، گزارش شده است.

جدول 9 نتایج آزمون سختی ویکرز

Table 9 Results of Vickers hardness Test.

انحراف معیار	میانگین سختی	نمونه
SD ¹	HV	
1.71	69.65	CNT-0.01
1.50	80.20	CNT-0.05
0.66	88.40	CNT-0.1
2.03	68.20	GRF-0.01
1.09	77.18	GRF-0.05
0.86	85.10	GRF-0.1

برای درک بهتر اثر مقاوم‌ساز، نمودار ستونی میانگین عدد سختی ویکرز، رسم شده و در شکل 10 مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش درصد وزنی، در هر دو مقاوم‌ساز، عدد سختی افزایش پیدا کرده است. در واقع، می‌توان عنوان کرد که سختی معیاری هم‌خانواده با استحکام کششی است. با این تفاوت که در حالت کشش، قطعه تحت بار ثابت تا تغییر شکل پلاستیک و شکست باقی می‌ماند [22].

حال آن‌که در سختی، صرفاً بار از طریق یک نفوذکننده به سطح قطعه وارد شده، و معمولاً قطعه را به مرحله تغییر شکل پلاستیک و شکست نمی‌رساند. با این توضیحات، می‌توان انتظار داشت روند تغییرات سختی نیز مشابه روند تغییرات استحکام باشد که تطابق نتایج آزمون کشش و سختی سنجی نیز همین امر را تصدیق می‌کند.

سختی آلیاژ اولیه آلومینیومی A356، 64 ویکرز گزارش شده است [32]. بنابراین همانند استحکام، در این بخش نیز افزودن مقاوم‌ساز، حتی به مقدار 0.01%، باعث افزایش از 64 ویکرز به 68.2 ویکرز با مقاوم‌ساز گرافنی شده است. در بهینه‌ترین حالت، با افزودن 0.1% نانوتیوب کربن، سختی تا 88.4 ویکرز افزایش یافته که افزایش حدود 33% را، نسبت به حالت بدون مقاوم‌ساز نشان می‌دهد.

به دلیل تکرارپذیری سختی، با محاسبه انحراف معیار برای هر نمونه، نکته مهم و بسیار جالبی پدیدار می‌شود. در هر مقاوم‌ساز، با افزایش درصد وزنی، انحراف معیار سختی اندازه‌گیری شده به طور محسوسی کاهش یافته است.

¹ Standard Deviation

- [18] Fischer, L., Raj, R., "Literature Survey Report: Nano-Dispersion Strengthening of Aluminum," Introduction to Research, University of Colorado 2004.
- [19] Borgonovo, C., Makhlof, M., "Synthesis of Aluminum-Aluminum Nitride Nanocomposites by a Gas-Liquid Reaction II. Microstructure and Mechanical Properties", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 47, No. 4, pp. 1818-1827, 2016.
- [20] Alipour, M., Farsani, R., "Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of Cast AA7068 Nanocomposite Reinforced with Graphene Nano Plates", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 10, pp. 139-144, 2017.
- [21] Rikhtegar, F., Shabestari, S., Saghafi, H., "Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Al2024-CNT Nanocomposite Produced by Flake Powder Metallurgy Process", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 91-100, 2017.
- [22] Boostani, A., Tahamtan, S., Yazdani, S., "Enhanced Tensile Properties of Aluminium Matrix Composites Reinforced With Graphene Encapsulated SiC Nanoparticles", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 68, pp. 155-163, 2015.
- [23] Kwon, H., Park, D., Silvain, J., "Investigation of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composite Materials", Composites Science and Technology, Vol. 70, pp. 546-550, 2010.
- [24] Esawi, A., Morsi, K., "Fabrication and Properties of Dispersed Carbon Nanotube-Aluminum Composites", Materials Science and Engineering A, Vol. 508, pp. 167-173, 2009.
- [25] Tang, J., Fan, G., "Synthesis of Carbon Nanotube/Aluminum Composite Powders by Polymer Pyrolysis Chemical Vapor Deposition", Carbon, Vol. 55, pp. 202-208, 2013.
- [26] Choi, H., Min, B., Shin, J., "Strengthening in Nanostructured 2024 Aluminum Alloy and Its Composites Containing Carbon Nanotubes", Composites: Part A, Vol. 42, pp. 1438-1444, 2011.
- [27] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, pp. 98-105, 2000.
- [28] Alipour, M., Farsani, R., "Investigation of the Microstructure of Cast Al7068 Nanocomposite Reinforced with SiC Nano Particles", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 461-468, 2018.
- [29] Dieter, G. E., "Mechanical Metallurgy", Third ed., McGraw-Hill Education, New York, pp. 453-455, 1986.
- [30] Yolshina, L.A., Muradymov, R.V., Korsun, I.V., "Novel Aluminum-Graphene And Aluminum-Graphite Metallic Composite Materials Synthesis and properties", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 663, pp. 449-459, 2016.
- [31] Burapa, R., Janudom, S., Chuheep, T., Canyook R., Wannasin, J., "Effects of Primary Phase Morphology on Mechanical Properties of Al-Si-Mg-Fe Alloy in Semi-Solid Slurry Casting Process", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 20, pp. 857-861, 2010.
- [32] Langlais, J., Lemieux, A., Kulunk, B., "Impact of the SEED Processing Parameters on The Microstructure and Resulting Mechanical Properties of A356 Alloy Castings", Transactions-American Foundrymens Society, vol. 114, pp. 06-125, 2006.
- [1] Surappa, M. K., "Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities", Sadhana, Vol. 28, pp. 319-334, 2003.
- [2] Mahallawi, E., Egenfeld, I.S., Kouta, K., "Synthesis and Characterization of New Cast A356/(Al2O3) Metal Matrix Nano-Composites", In Proceedings of the 2nd Multifunctional Nanocomposites & Nanomaterials: International Conference & Exhibition MN2008, Cairo, Egypt, January 11-13, 2008.
- [3] Hashim, J., "Metal Matrix Composites: Production By the Stir Casting Method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 1, pp. 92-23, 2009.
- [4] Mahallawi, E., Shash, A. Y., "Nanoreinforced Cast Al-Si Alloys with Al2O3, TiO2 and ZrO2 Nanoparticles", Journal of Metals, Vol. 5, pp. 802-821, 2015.
- [5] Mahallawi, E., Shash, Y., Mahmoud, K., "Influence of Nano-Dispersions on Strength Ductility Properties of Semi-solid Cast A356 Al Alloy", Materials Science and Technology, Vol. 26, pp. 1226-1231, 2010.
- [6] Schwedt, A., Mayer, J., Amer A., "Influence of Al2O3 Nano-Dispersions on Microstructure Features and Mechanical Properties of Cast and T6 Heat-Treated Al-Si Hypoeutectic Alloys", Materials Science and Engineering: A, Vol. 556, pp. 76-87, 2012.
- [7] Khademian, M., Heidari, M., Alizade, A., "Investigation the Effect of Hot Rolling Process on Properties and Microstructure of Al-B4C Composite By Vortex", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, pp. 140-146, 2014.
- [8] Yazdani, A., Salahinejad, E., "Evolution of Reinforcement Distribution in Al-B4C Composite During Accumulative Roll Bonding" Material and Design, Vol. 32, No. 6, pp. 3137-3142, 2011.
- [9] Tabesh, A., Ebrahimi A., "The Investigation and Comparison of Mechanical properties and Microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al2O3 Composite Produced by Mixed Accumulative Roll Bonding", In Persian, Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 4, No. 4, pp. 464-470, 2018.
- [10] Khoramshad, H., Khodaei, M., "Sensitive of The Impact Behavior of Multi-layered Metal Laminate to the Position of the Material Parameters Variations", In Persian, Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 1, No. 1, pp. 23-34, 2014.
- [11] Wenzhen, L., Shiyong, L., Qiongyuan, Z., Xue, Z., "Ultrasonic-Assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites", Materials Science Forum, Vol. 654-656, pp. 990-993, 2010.
- [12] Hihn, J. Y., Doche, M. L., Mandroyan, A., Hallez, L., Pollet, B. G., "Respective Contribution of Cavitation and Convective Flow to Local Stirring in Sonoreactors", Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 18, pp. 881-887, 2011.
- [13] Chen, Y., Tekumalla, S., Guo, Y. B., Shabadi, R., Gupta, M., "The Dynamic Compressive Response of A High-Strength Magnesium Alloy and Its Nanocomposite", Materials Science and Engineering: A, Vol. 702, pp. 65-72, 2017.
- [14] Park, S., "Collide Suspensions of Highly Reduced Graphene Oxide In a Wide Variety of Organic Solvents", Nano Letters, Vol. 9, No. 4, pp. 1593-1597, 2009.
- [15] Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., "Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties and Applications", Advanced Materials, Vol. 22, pp. 3906-3924, 2010.
- [16] Niyogi, S., "Chemistry of Single-Walled Carbon Nanotubes", Accounts of Chemical Research, vol. 35, no. 12, pp. 1105-1113, 2002.
- [17] Sun, C., Liu, K., "Dynamic Torsional Buckling of a Double-Walled Carbon Nanotube Embedded in an Elastic Medium", European Journal of Mechanics-A/Solids, Vol. 27, No. 1, pp. 40-49, 2008.

5- مراجع



مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای موثر بر استحکام کششی و انعطاف پذیری کامپوزیت زمینه آلومینیومی حاصل از فرآیند FSA با استفاده از روش RSM

مهدی وحدتی*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
* شاهرود، صندوق پستی 36199-95161، vahdati@shahroodut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از روش های جدید برای بهبود خواص مکانیکی لایه های سطحی، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP) است. در صورتی که فرآیند FSP به همراه یک ماده مصرفی انجام شود، این فرآیند جدید تحت عنوان آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی (FSA) شناخته می شود. از این رو در پژوهش پیش رو، کامپوزیت های سطحی Al7075 با به کارگیری ذرات تقویت کننده از جنس آلومینا، با استفاده از این فرآیند و منطبق بر اصول طراحی آزمایش، تولید شدند. بدین منظور، روش RSM به عنوان روش طراحی آزمایش، انتخاب گردید و متغیرهای: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت کننده به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند، تعیین شدند. نتایج حاصل از آنالیز واریانس و تحلیل رگرسیون داده های حاصل از آزمون های تجربی، صحت و دقت معادلات رگرسیون را مورد تأیید قرار داد و نشان داد که نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت کننده با تأثیرات خطی و مرتبه دوم، بر استحکام کششی و انعطاف پذیری نمونه های کامپوزیتی موثر هستند. همچنین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در مقدار 800 rpm تنظیم شود، افزایش قطر شانه ابزار از 9 mm به 15 mm باعث افزایش 17.97 درصدی استحکام کششی نمونه های کامپوزیتی می شود. علاوه بر این، کاهش نرخ پیشروی ابزار از 60 mm/min به 20 mm/min و کاهش اندازه ذرات آلومینا از 50 μm به 20 μm، به ترتیب موجب افزایش انعطاف پذیری نمونه های کامپوزیتی به میزان 1.85% و 5.04% می شود. در پایان، با دستیابی به مقدار بیشینه تابع مطلوبیت (0.915)، شرایط بهینه متغیرهای ورودی فرآیند تعیین شد و با اجرای آزمون صحت گذاری، به تأیید رسید.

دریافت: 1399/01/14

پذیرش: 1399/11/27

کلیدواژه ها:

بهینه سازی، کامپوزیت سطحی
استحکام کششی
انعطاف پذیری
آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی

Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by FSA via RSM

Mahdi Vahdati*

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
* P.O.B. 36199-95161, Shahrood, Iran, vahdati@shahroodut.ac.ir

Keywords

Optimization,
Surface composite,
Tensile strength,
Ductility,
Friction stir alloying

Abstract

One of the new methods to improve the mechanical properties of surface layers is the friction stir processing (FSP). If the FSP process is carried out with a consumable material, this new process is known as the friction stir alloying (FSA). Therefore in this research, the Al7075 surface composites by using reinforcing particles (Al₂O₃) were produced based on this process in accordance with the DOE approach. So, the RSM was selected as the experiment design method and variable factors such as: tool rotational speed, tool feed rate, tool shoulder diameter and size of reinforcing particles were determined as the input variables. The results of ANOVA and regression analysis of experimental data approved the accuracy of regression equations and showed that the tool feed rate, tool shoulder diameter and size of reinforcing particles with linear and second-order effects, affect on the tensile strength and ductility of the composite specimens. Also, if the tool rotational speed is set at 800 rpm, increasing the tool shoulder diameter from 9 mm to 15 mm will increase the tensile strength of the composite specimens by 17.97%. In addition, lowering the tool feed rate from 60 mm/min to 20 mm/min and reducing the size of alumina particles from 50 μm to 20 μm, will increase the ductility of composite specimens by 1.85% and 5.04%, respectively. Finally, by achieving maximum value of desirability function (0.915), the optimal condition of input variables was determined. In addition, the optimal condition has been confirmed by implementing the verification test.

1- مقدمه

شد [3]. در ادامه، این فرآیند برای تولید کامپوزیت سطحی، اصلاح میکروساختار آلیاژهای ریختگی، آلیاژسازی و بهبود کیفیت اتصالات جوشی مورد استفاده قرار گرفت [4، 5]. فرآیند FSP از اصولی مشابه با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی² پیروی می کند [6]. در این فرآیند، اعمال کرنش برشی

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی¹ به عنوان یک تکنیک جدید برای بهبود و تقویت خواص مکانیکی لایه های سطحی قطعات، معرفی شده است [1 و 2]. فرآیند FSP در ابتدا برای اصلاح میکروساختار لایه های سطحی قطعات فلزی استفاده

² Friction stir welding (FSW)

¹ Friction stir processing (FSP)

Please cite this article using:

Vahdati, M., "Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by FSA via RSM", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1207-1216, 2021.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

بهبود مقاومت سایشی و فرسایشی آلیاژ آلومینیوم می‌شود [19]. از این رو، برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم می‌توان از فرآیند FSA بهره گرفت [20].

بدین منظور، می‌شرا و همکاران [21]، کامپوزیت‌های سطحی $Al5083/SiC$ را با کسرهای حجمی متفاوتی از ذرات SiC به صورت موفقیت آمیزی تولید کردند. ذرات SiC به صورت یکنواخت در زمینه آلومینیومی توزیع شدند. نتایج نشان داد که سختی کامپوزیت سطحی با استفاده از 27 درصد حجمی از ذرات SiC با اندازه 0.7 میکرون، تقریباً دو برابر سختی فلز پایه است. گروه دیگری از محققان، تأثیر هندسه و ابعاد پین را بر روی تشکیل کامپوزیت سطحی $Al1050-H24$ با استفاده از ذرات SiC مورد مطالعه قرار دادند [22]. در این پژوهش، ذرات SiC با استفاده از ایجاد شیار و فرارگیری صفحه پوششی از جنس آلومینیوم به ضخامت 2 میلیمتر، در فلز پایه جایگذاری شدند. نتایج نشان داد که پین ابزار با هندسه مربعی بدون در نظر گرفتن تأثیر سرعت دورانی ابزار، موجب توزیع همگن‌تری از ذرات SiC در منطقه اغتشاشی می‌شود. همچنین، ابعاد پین تأثیر اندکی بر توزیع همگن ذرات SiC در منطقه اغتشاشی داشت.

شفیعی و همکاران [23] کامپوزیت سطحی زمینه فلزی $Al6082$ را با استفاده از نانو ذرات اکسید آلومینیوم تولید کردند. آن‌ها دریافتند که افزایش تعداد پاس‌های فرآیند موجب توزیع یکنواخت‌تری از نانو ذرات آلومینا می‌شود. همچنین میکروسختی و مقاومت سایشی کامپوزیت سطحی در مقایسه با فلز پایه، به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. در مطالعه دیگری، آلیاژ $Al2024$ پوشش‌دهی شده توسط پودر آلومینا، تحت فرآیند FSA قرار گرفت [24]. نتایج نشان داد که ذرات آلومینا به صورت یکنواخت و با متوسط عمق نفوذ 600 میکرون در سطح فلز پایه توزیع شده‌اند. همچنین، میکروسختی و مقاومت سایشی نانوکامپوزیت سطحی ارتقاء یافت. گروهی از محققان، لایه‌های کامپوزیت سطحی $Al6360/(TiC+B_4C)$ را به صورت ترکیبی و با نسبت‌های حجمی متفاوتی از ذرات TiC و B_4C تولید کردند [25]. نتایج نشان داد که افزودن ذرات فوق‌الذکر با نسبت $TiC + 50\% B_4C$ موجب افزایش مقاومت سایشی $Al6360$ می‌شود. سلیمان و همکاران [26]، کامپوزیت سطحی $Al5083$ را با ترکیبی از ذرات SiC و MoS_2 تولید کردند. تحلیل میکروساختار کامپوزیت ترکیبی نشان داد که توزیع یکنواختی از ذرات تقویت‌کننده در منطقه فرآوری حاصل شده است و اتصال محکمی میان لایه کامپوزیتی و فلز پایه ایجاد شده است.

احمدی فرد و همکاران [27] کامپوزیت سطحی زمینه فلزی $Al5083/SiC$ را با استفاده از فرآیند FSA تولید کردند. آن‌ها دریافتند که میکروسختی و استحکام کششی نمونه کامپوزیتی نسبت به فلز پایه بهبود یافته است. آن‌ها در پژوهش دیگری، نانوکامپوزیت زمینه مسی را با استفاده از ذرات تقویت‌کننده SiO_2 تولید کردند [28]. نتایج نشان داد که رفتار سایشی، میکروسختی و استحکام کششی نانو کامپوزیت سطحی نسبت به فلز پایه ارتقاء یافته است.

میکروساختار ناحیه اصلاح شده در فرآیند FSA متناسب با سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار نیز دچار تغییر می‌شود. کورت و همکاران [29] نشان دادند که افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار منتج به توزیع یکنواختی از ذرات SiC در کامپوزیت سطحی $AA1050$ می‌شود. از سوی دیگر، کاهش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش حرارت ورودی می‌گردد که منجر به شکستن دندرت‌های درشت و بسته شدن خلل و فرج خواهد شد. همچنین، افزایش

بالا به جنس قطعه کار، موجب می‌شود تا میکروساختار فوق ریز دانه در دمایی زیر نقطه ذوب ماده، ایجاد شود. اصول فرآیند FSP در شکل 1 نشان داده شده است.

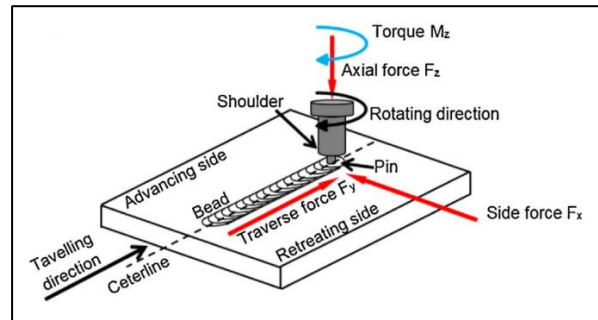


Fig. 1 Principles of FSP process [4]

شکل 1 اصول فرآیند FSP [4]

در این فرآیند، پین ابزار با سرعت دورانی بالا در قطعه کار نفوذ می‌کند. مرحله نفوذ تا زمانی که شانه ابزار در تماس با سطح قطعه کار قرار گیرد، ادامه می‌یابد. سپس، ابزار در یک جهت معین حرکت می‌کند. حرکت چرخشی پین موجب انتقال ماده از جلوی ابزار به پشت ابزار می‌گردد. در طی این پیمایش، حرارت ناشی از اصطکاک میان سطوح ابزار و قطعه کار موجب افزایش موضعی دما و تغییر شکل پلاستیک ماده می‌شود.

فرآیند FSP می‌تواند به همراه یک ماده مصرفی نیز انجام شود. این فرآیند جدید تحت عنوان آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی¹ شناخته می‌شود [7]. با استفاده از این فرآیند، خواص سطحی فلز پایه همچون سایش، مقاومت خوردگی، سختی، استحکام، انعطاف‌پذیری، عمر خستگی و قابلیت شکل‌پذیری، بهبود می‌یابد. روش‌های متداول برای جایگذاری پودر تقویت‌کننده در فرآیند FSA عبارتند از: ایجاد شیار [8]، سوراخ کاری [9] و استفاده از صفحه پوششی [10] (شکل 2).

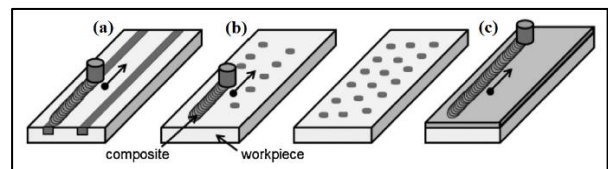


Fig. 2 Methods for placing the reinforcing powder (a) creating a groove (b) drilling (c) using a cover plate

شکل 2 روش‌های جایگذاری پودر تقویت‌کننده [4] (a) ایجاد شیار (b) سوراخ-کاری (c) استفاده از صفحه پوششی

فرآیند FSA اساساً برای تولید کامپوزیت‌های سطحی در آلیاژهای آلومینیوم [11 و 12] و منیزیم [13، 14] استفاده می‌شود. با این وجود، کامپوزیت‌های سطحی از مواد با نقطه ذوب بالا همچون مس [15]، فولاد [16] و تیتانیوم [17] نیز با استفاده از این فرآیند، تولید شده‌اند. در این راستا، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی²، گروه جدیدی از مواد هستند که در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم از خواص مطلوبی همچون: مقاومت سایشی، مقاومت خوردگی، سختی و سختی بالاتر برخوردار هستند [18]. در این گروه از کامپوزیت‌ها، افزودن مواد پُرکننده به ویژه ذرات تقویت‌کننده سرامیکی موجب

² Aluminum metal matrix composite (AMMC)

¹ Friction stir alloying (FSA)

دامنه تغییر هر یک از این عوامل بر اساس آزمون‌های اولیه که منتج به تولید سالم نمونه کامپوزیتی شد، تعیین گردید (جدول 1).

جدول 1 عوامل آزمایش و دامنه تغییر آن‌ها

Table 1 Experimental factors and their range of variation

متغیر	نماد	واحد	-1	0	+1
سرعت دورانی ابزار	N	rpm	400	800	1200
نرخ پیشروی ابزار	S	mm/min	20	60	100
قطر شانه ابزار	D	mm	9	15	21
اندازه ذرات تقویت‌کننده	P	μm	20	50	80

همچنین، به منظور ارزیابی استحکام کششی و انعطاف‌پذیری نمونه‌های کامپوزیتی به ترتیب از دو شاخص مهم استحکام کششی نهایی⁶ و درصد ازدیاد طول⁷ استفاده می‌شود. از این رو در پژوهش حاضر، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های تولیدی به عنوان متغیرهای پاسخ، انتخاب شدند.

3- انتخاب طرح آزمایش

در پژوهش پیش رو، متدولوژی سطح پاسخ به عنوان روش طراحی آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد [33-35]. در اکثر مسائل مربوط به متدولوژی سطح پاسخ، نحوه ارتباط میان پاسخ و متغیرهای ورودی، نامعلوم است. بنابراین اولین قدم در این روش، یافتن تقریبی مناسب از رابطه واقعی موجود میان متغیر پاسخ (Y) و مجموعه متغیرهای مستقل (X) است. در این پژوهش، از تابع تقریب-کننده به صورت مدل مرتبه دوم استفاده می‌گردد که به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

در تابع فوق، β_0 مقدار ثابت، β_i ضرایب خطی، β_{ii} ضرایب مرتبه دو، β_{ij} ضرایب تعامل اثر، k تعداد متغیرهای مستقل و ε مقدار خطای مشاهده شده در پاسخ است.

نرم افزار مورد استفاده به منظور طراحی آزمایش و تحلیل آماری، دیزاین اکسپرت⁸ [36] است. جدول 2، طراحی آزمایش را به صورت آزمون‌های کدگذاری شده و با تعداد 31 اجرا، نشان می‌دهد که از این میان، تعداد هفت آزمون در سطوح مرکزی پارامترها (سطح صفر)، تکرار خواهد شد.

به منظور آماده‌سازی آلیاژ Al7075، صفحات آلیاژی مطابق استاندارد AMSH6088 [38] تحت عملیات حرارتی پیرسختی قرار گرفتند. بدین منظور در ابتدا عملیات انحلال به مدت یک ساعت و در دمای 480°C بر روی قطعات انجام شد. سپس، صفحات آلیاژی برای دستیابی به محلول جامد فوق اشباع تحت عملیات آب‌دهی⁸ قرار گرفتند. در ادامه، عملیات پیرسازی مصنوعی به مدت 24 ساعت و در دمای 120°C بر روی قطعات انجام شد. در پایان، صفحات آلیاژی در معرض هوا خنک شدند.

سرعت دورانی ابزار نیز موجب افزایش حرارت ورودی و تغییر دانه‌بندی می‌شود [30]. بنابراین جهت دستیابی به میکروساختار ریزدانه و منطقه اغتشاشی عاری از عیب، سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار بایستی بهینه شوند.

نخعی و همکاران [31] نانو کامپوزیت PP/EPDM/nanoclay را با استفاده از فرآیند FSP تولید کردند. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند (سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار و دمای شانه ابزار) بر خواص کششی نانو کامپوزیت، از طرح باکس-بنکن¹ استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد که با افزایش سرعت دورانی ابزار، استحکام کششی از 15.8 مگاپاسکال به 18.2 مگاپاسکال افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش دمای شانه ابزار موجب کاهش درصد ازدیاد طول نسبی نمونه در نقطه شکست، می‌شود. آن‌ها در پژوهشی دیگر، به منظور تعیین تأثیر پارامترهای فرآیند بر چقرمگی شکست نانو کامپوزیت PP/EPDM/nanoclay و مدل‌سازی ریاضی آن، از متدولوژی سطح پاسخ و طرح باکس-بنکن استفاده نمودند [32]. آن‌ها دریافتند که با افزایش سرعت دورانی ابزار، افزایش تعداد پاس‌های فرآیند FSP و کاهش دمای شانه ابزار، چقرمگی شکست نمونه افزایش می‌یابد.

از این رو، با توجه به قابلیت و مزایای فرآیند آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی در تولید کامپوزیت سطحی زمینه فلزی و به منظور تکمیل و توسعه تحقیقات انجام شده در این حوزه، در مقاله پیش‌رو، کامپوزیت‌های سطحی زمینه آلومینیومی Al7075/Al₂O₃ با استفاده از ذرات تقویت‌کننده آلومینا و با به-کارگیری فرآیند FSA تولید شدند. بدین منظور، متدولوژی سطح پاسخ² به عنوان روش طراحی آزمایش³، انتخاب شد. در ادامه، تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر استحکام کششی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های سطحی، به انجام رسید. صحت و دقت معادلات رگرسیون با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز واریانس⁴ و تحلیل رگرسیون داده‌های تجربی، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، چگونگی تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند همچون: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده، بر استحکام کششی و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. در پایان، شرایط بهینه متغیرهای ورودی فرآیند با استفاده از روش مطلوبیت، استخراج شد.

با توجه به تحقیقات مرور شده در حوزه تولید و مطالعه کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیومی، مهمترین جوانب نوآوری مقاله پیش‌رو در مقایسه با تحقیقات منتشر شده، عبارتند از تمایز و تفاوت در: ترکیب جنس فلز پایه و نوع ذرات تقویت‌کننده، روش طراحی و تحلیل آزمون (متدولوژی سطح پاسخ)، استخراج مدل رگرسیون پارامترهای پاسخ، بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرآیند (روش مطلوبیت)، نوع متغیرهای ورودی فرآیند و نوع پارامترهای خروجی فرآیند.

2- انتخاب عوامل آزمایش و متغیرهای پاسخ

با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده در حوزه فرآیندهای FSP و FSA، چهار متغیر: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده به عنوان متغیرهای ورودی آزمایش انتخاب شدند و هر یک از آن‌ها در سه سطح پایین (-1)، میانه (0) و بالا (+1) مورد بررسی قرار گرفتند.

¹ Box-Behnken design
² Response surface methodology (RSM)
³ Design of experiment (DOE)
⁴ Analysis of variance (ANOVA)
⁵ Ultimate tensile strength (UTS)

⁶ Elongation (EI)
⁷ Design Expert
⁸ Quenching

به ترتیب مساوی 3.9 g/cm^3 و 2400 MPa است. این ذرات با خلوص بیش از 99% و در سه اندازه 20، 50 و 80 میکرون تهیه شدند [39]. ابزارهای FSA از جنس فولاد ابزار گرم‌کار H13 در سه قطر شانه 9، 15 و 21 میلی‌متر و به ترتیب در سه قطر پین 3، 5 و 7 میلی‌متر و با هندسه مخروطی شیاردار در بخش پین، طراحی و ساخته شدند. قطر شانه و پین به ترتیب با حروف a و d در نقشه ابزار مشخص شده اند (شکل 3).

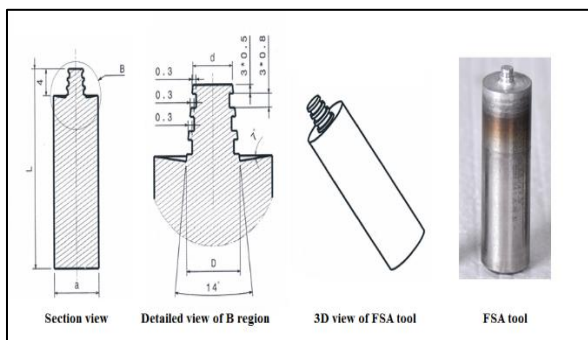


Fig. 3 Design and manufacture a sample of FSA tool

شکل 3 طراحی و ساخت نمونه‌ای از ابزار FSA

به منظور جایگذاری میکروذرات Al_2O_3 در سطح قطعه‌کار، تعداد 18 سوراخ به قطر 2 mm و عمق 3 mm در فواصل 4 میلی‌متری نسبت به یکدیگر ایجاد می‌شود (شکل 4). در صورتی که مجموع حجم 18 سوراخ ایجاد شده با V_h نشان داده شود و فرض شود که پودر آلومینا با توجه به وجود فضاهای خالی میان میکروذرات، با تراکم 90 درصدی در داخل سوراخ‌ها جایگذاری شده است، از این‌رو، حجم کلی پودر مصرفی (V_p) که مجموع حجم سوراخ‌ها را اشغال کرده است، مساوی $0.9V_h$ خواهد شد. بنابراین، درصد حجمی ذرات اضافه شده به فلز پایه مطابق رابطه زیر برابر با 47.37% می‌باشد:

$$\text{Volume percent} = \left(\frac{V_p}{V_p + V_h} \right) \times 100 = \left(\frac{0.9V_h}{1.9V_h} \right) \times 100 \quad (2)$$

پس از پُر نمودن سوراخ‌ها توسط پودر اکسید آلومینیوم، درب سوراخ‌ها توسط ابزار فاقد پین، بسته شد. سپس، آزمون‌های FSA منطبق بر اصول تشریح شده در بخش مقدمه و مطابق 31 ترکیب پارامتری مندرج در جدول 2 با استفاده از ماشین فرز اونیورسال انجام شدند. ماشین فرز اونیورسال از نوع دیجیتال، مدل FP4MK و ساخت ایران است. شکل 5، نمونه‌ای از کامپوزیت سطحی $\text{Al7075/Al}_2\text{O}_3$ تولید شده در آزمون شماره 11 را نشان می‌دهد.

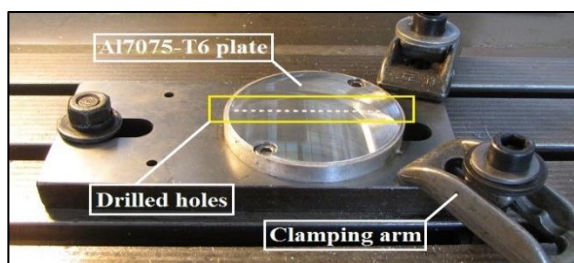


Fig. 4 Drilling the workpiece surface

شکل 4 سوراخ‌کاری سطح قطعه‌کار

جدول 2 طراحی آزمون‌ها و نتایج اندازه‌گیری

Table 2 Design of tests and measurement results

شماره آزمون	سرعت دورانی (N)	نرخ پیشروی (S)	قطر شانه (D)	اندازه ذرات (P)	متغیرهای خروجی	
					استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)
1	-1	-1	-1	1	380	8.12
2	-1	1	1	1	391	8.05
3	-1	1	1	-1	385	8.05
4	1	1	1	-1	490	8.00
5	1	1	-1	1	445	7.62
6	0	0	-1	0	410	7.80
7	-1	-1	1	1	375	8.12
8	0	0	0	0	510	7.50
9	0	0	0	0	510	7.50
10	0	1	0	0	515	7.20
11	0	-1	0	0	380	8.10
12	1	-1	-1	-1	270	8.80
13	1	-1	1	1	392	8.00
14	0	0	0	0	510	7.50
15	-1	-1	-1	-1	360	8.15
16	-1	1	-1	-1	371	8.10
17	1	-1	-1	1	368	8.12
18	-1	0	0	0	378	8.07
19	1	-1	1	-1	390	8.10
20	1	0	0	0	392	8.10
21	0	0	0	1	418	7.90
22	1	1	-1	-1	390	8.10
23	0	0	0	0	510	7.50
24	1	1	1	1	428	7.85
25	0	0	0	0	510	7.50
26	0	0	1	0	497	7.62
27	0	0	0	0	510	7.50
28	0	0	0	0	510	7.50
29	-1	-1	1	-1	362	8.15
30	0	0	0	-1	505	7.70
31	-1	1	-1	1	385	8.05

4- اجرای آزمایش

جدول 3، ترکیب شیمیایی ماده تحت آزمایش (Al7075-T6) را نشان می‌دهد.

جدول 3 ترکیب شیمیایی آلیاژ Al7075-T6 [37]

Table 3 Chemical composition of Al7075-T6 alloy [37]

نام عنصر	درصد وزنی (%)
آلومینیوم	87.1 - 91.4
روی	5.1 - 6.1
منیزیم	2.1 - 2.9
مس	1.2 - 2.0
آهن	0.50
سیلیسیم	0.40
منگنز	0.30
کروم	0.18 - 0.28
تیتانیوم	0.20

ذرات تقویت‌کننده مورد استفاده در فرآیند تولید کامپوزیت سطحی از جنس اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) هستند. چگالی و مقاومت فشاری پودر آلومینا

6- تجزیه و تحلیل نتایج

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از آنالیز واریانس⁴ انجام می‌شود. همچنین به منظور ایجاد توابع ریاضی میان متغیرهای پاسخ و پارامترهای موثر در فرآیند، تحلیل رگرسیون⁵ به کار گرفته خواهد شد [40]. میزان سطح ریسک⁶ (α) در فرآیند تحلیل، مساوی 0.05 در نظر گرفته شد. جداول 4 و 5، نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون را به ترتیب برای استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نشان می‌دهند.

با احتساب $\alpha = 0.05$ و بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر مرتبه اول S (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم D^2 (مجذور قطر شانه ابزار) به عنوان عبارات موثر بر استحکام کششی نهایی نمونه‌ها و پارامتر مرتبه اول S (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم P^2 (مجذور اندازه ذرات تقویت‌کننده) به عنوان عبارات موثر بر درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی، شناخته و معرفی شدند.

برای بررسی صحت مدل رگرسیون، از آزمون عدم برازش استفاده می‌شود. بنابراین با تأیید عدم معنی‌داری آزمون عدم برازش ($P_{\text{Lack of fit}} > 0.05$)، می‌توان دریافت که مدل به خوبی می‌تواند بر داده‌های مورد بررسی، برازش شود. همان‌طور که در جداول 4 و 5 مشاهده می‌شود، آزمون عدم برازش برای متغیرهای پاسخ، معنی‌دار نیست و در نتیجه مدل ارائه شده به خوبی روند داده‌ها را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، بهترین تحلیل زمانی صورت می‌گیرد که همزمان رگرسیون، موثر و عدم برازش، غیرموثر باشد [40]. از این رو، با توجه به مقادیر P مندرج در جداول فوق‌الذکر ملاحظه می‌شود که عبارت رگرسیون، موثر و عبارت عدم برازش، غیرموثر است. از این رو، توانایی مدل برازش یافته در توصیف و پیش‌بینی تغییرات متغیرهای پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی، مورد تأیید قرار می‌گیرد. همچنین، برای آزمون صحت توزیع نرمال مانده‌ها از نمودار احتمال نرمال استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل 7 (a) و (b) مشاهده می‌شود، مانده‌ها در هر دو نمودار، عموماً از یک خط راست پیروی می‌کنند و هیچ‌گونه شواهدی مبنی بر غیرنرمال بودن، عدم تقارن و نقاط دورافتاده وجود ندارد.

روابط (3) و (4) به ترتیب معادلات رگرسیون استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده، ارائه می‌کنند:

$$UTS = 499.38 + 1.96N + 29.06S + 18.39D - 54.36N^2 - 57.23D^2 \quad (3)$$

$$(\% EL)^{-0.16} = 0.72 - 4.072 \times 10^{-4}N + 2.114 \times 10^{-3}S + 1.021 \times 10^{-3}P - 3.347 \times 10^{-3}N^2 - 4.472 \times 10^{-3}P^2 \quad (4)$$

با توجه به استخراج معادلات رگرسیون برای استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی، می‌توان مقادیر متغیرهای پاسخ را پیش از اجرای فرآیند و بر حسب متغیرهای ورودی، پیش‌بینی نمود. از این رو، امکان انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی فرآیند برای دستیابی به ماکزیمم پارامترهای پاسخ، وجود دارد.

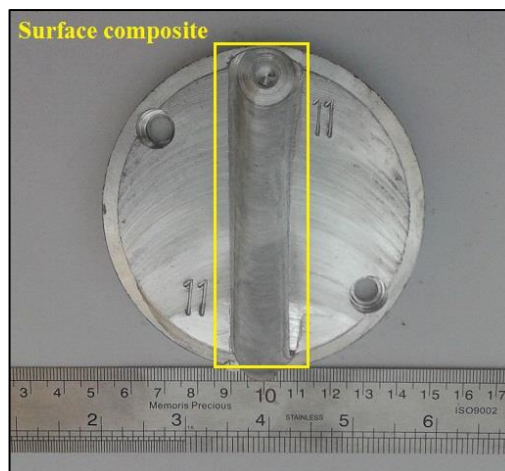


Fig. 5 A sample of Al7075/Al₂O₃ surface composite (test no. 11)

شکل 5 نمونه‌ای از کامپوزیت سطحی Al7075/Al₂O₃ (آزمون شماره 11)

5- اندازه‌گیری متغیرهای پاسخ

برای اندازه‌گیری استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی از آزمون کشش استفاده می‌شود. استحکام کششی نهایی عبارت است از بیشینه تنش کششی که نمونه آزمون پیش از این که مقطع آن به صورت قابل توجهی دچار باریک‌شدگی شود، تحمل می‌کند. همچنین، درصد ازدیاد طول معیاری از انعطاف‌پذیری و تغییر شکل پلاستیک نمونه است که می‌تواند قبل از شکست، از خود نشان دهد.

بدین منظور، نمونه‌های کشش مطابق استاندارد ASTM E8¹ در راستای عمود بر مسیر اجرای فرآیند FSA، با استفاده از وایرکات² استخراج و آماده شدند. سپس، هر یک از آن‌ها با استفاده از دستگاه کشش و با نرخ پیشروی 2 mm/min در دمای اتاق تحت آزمون کشش قرار گرفتند. دستگاه کشش از نوع اونیورسال، مدل اینسترون³ و ساخت کشور امریکا است. شکل 6، تعدادی از نمونه‌های گسیخته شده پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد.

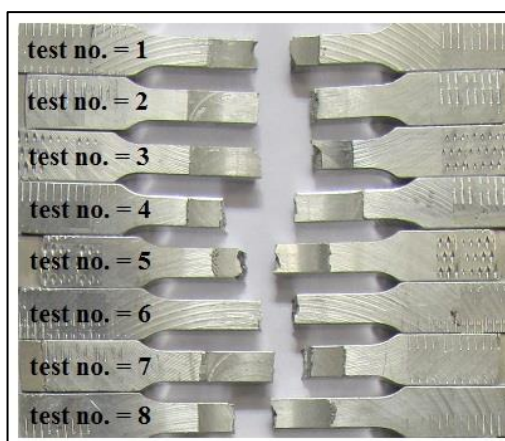


Fig. 6 A number of broken samples in the tensile test

شکل 6 تعدادی از نمونه‌های گسیخته شده در آزمون کشش

¹ American society for testing and materials

² Wire electrical discharge machining

³ INSTRON

⁴ Analysis of variance (ANOVA)

⁵ Regression analysis

⁶ Confidence level

شانه ابزار ثابت در نظر گرفته شود، افزایش نرخ پیشروی موجب افزایش استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. در این حالت، افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب کاهش مدت زمان مواجهه ابزار با قطعه کار می‌شود که منجر به کاهش حرارت ورودی به منطقه اغتشاشی خواهد شد.

چگونگی تغییرات متغیر پاسخ بر حسب متغیرهای ورودی را می‌توان به صورت نمودارهای سه بُعدی منحنی سطح پاسخ نشان داد. در این نمودارها تأثیرات متقابل دو متغیر ورودی بر روی متغیر پاسخ قابل مشاهده است و مقادیر سایر متغیرهای ورودی در سطوح مرکزی (سطح صفر) ثابت در نظر گرفته می‌شوند. ارتباط استحکام کششی نهایی با دو پارامتر نرخ پیشروی ابزار و قطر شانه ابزار در شکل (8-a) نشان داده شده است. در این وضعیت، در صورتی که قطر

جدول 4 نتایج آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون برای استحکام کششی نهایی

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
< 0.0001	9.14	16952.27	84761.37	5	مدل رگرسیون
0.8411	0.041	76.14	76.14	1	N (سرعت دورانی ابزار)
0.0084	8.19	15196.06	15196.06	1	S (نرخ پیشروی ابزار)
0.0821	3.28	6086.72	6086.72	1	D (قطر شانه ابزار)
0.0106	7.62	14140.62	14140.62	1	N ²
0.0045	9.75	18084.40	18084.40	1	D ²
-	-	1854.62	46365.41	25	خطای مانده
0.5795	0.94	1828.92	34749.41	19	عدم برازش
-	-	1936	11616	6	خطای خالص
-	-	-	1.311E+5	30	مجموع

جدول 5 آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون برای درصد ازدیاد طول

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
< 0.0001	8.41	8.541E-5	4.271E-4	5	مدل رگرسیون
0.5743	0.32	3.290E-6	3.290E-6	1	N (سرعت دورانی ابزار)
0.0094	7.92	8.043E-5	8.043E-5	1	S (نرخ پیشروی ابزار)
0.1864	1.85	1.875E-5	1.875E-5	1	P (اندازه ذرات)
0.0303	5.28	5.360E-5	5.360E-5	1	N ²
0.0029	10.87	1.104E-4	1.104E-4	1	P ²
-	-	1.016E-5	2.539E-4	25	خطای مانده
0.3677	1.37	1.086E-5	2.064E-4	19	عدم برازش
-	-	7.916E-6	4.750E-5	6	خطای خالص
-	-	-	6.810E-4	30	مجموع

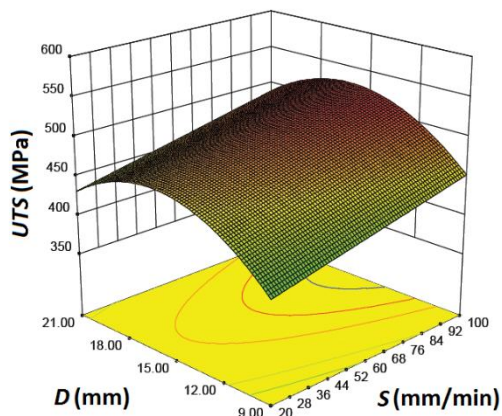
از سوی دیگر، ارتباط استحکام کششی نهایی با دو پارامتر سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار در شکل (8-b) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنظیم مقادیر سرعت دورانی و قطر شانه ابزار به ترتیب در مقادیر 800 rpm و 15 mm منتج به دستیابی به ماکزیمم استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. همچنین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در سطح میانه تنظیم شود، افزایش قطر شانه ابزار از 9 mm به 15 mm باعث افزایش استحکام کششی می‌شود. در این وضعیت، افزایش قطر شانه ابزار موجب نرم شدن ماده و افزایش نرخ سیلان آن می‌شود که در پی آن، توزیع بهتری از ذرات تقویت کننده در فلز پایه ایجاد می‌شود. توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه فلزی موجب تجمع نایجابی‌ها در همسایگی ذرات می‌شود که منجر به افزایش چگالی نایجابی‌ها در زمینه فلزی و فصل مشترک "زمینه - پودر" خواهد شد. از این‌رو، استحکام کششی نمونه کامپوزیتی بهبود می‌یابد [44].

از این‌رو، انحلال و رشد دانه‌ها کاهش یافته و منتج به بهسازی دانه‌بندی میکروساختار و افزایش استحکام کششی می‌شود. ارتباط میان شاخص حرارتی (HI) با سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار در فرآیند FSW به صورت زیر ارائه شده است [41]:

$$(HI) \text{ or } \left(\frac{T}{T_m} \right) = K \left(\frac{N^2}{S \times 10^4} \right)^\alpha \quad (5)$$

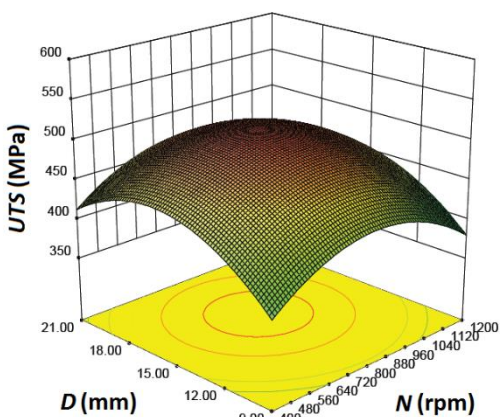
در این رابطه، T : بیشینه دما، T_m : دمای ذوب ماده، N : سرعت دورانی ابزار، S : نرخ پیشروی ابزار و K و α به عنوان ثوابت ماده هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص حرارتی مستقیماً با سرعت دورانی ابزار متناسب است و به صورت معکوس با نرخ پیشروی ابزار، تغییر می‌کند. بنابراین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در مقدار معینی تثبیت شود، افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب تقلیل شاخص حرارتی خواهد شد که منجر به کاهش نرخ انحلال رسوبات تقویت کننده می‌شود [42]. از این‌رو، خواص کششی نمونه بهبود می‌یابد [43].

¹ Heat index



(a) Investigation the effect of S and D

بررسی تأثیر S و D



(b) Investigation the effect of N and D

بررسی تأثیر N و D

Fig. 8 Influence of input variables on the ultimate tensile strength
شکل 8 تأثیر متغیرهای ورودی بر استحکام کششی نهایی

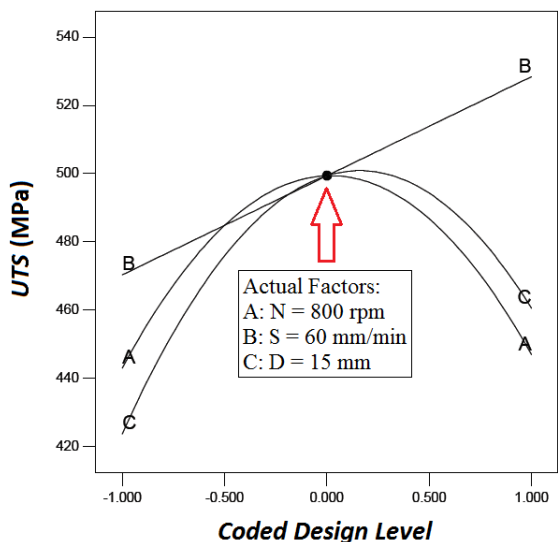
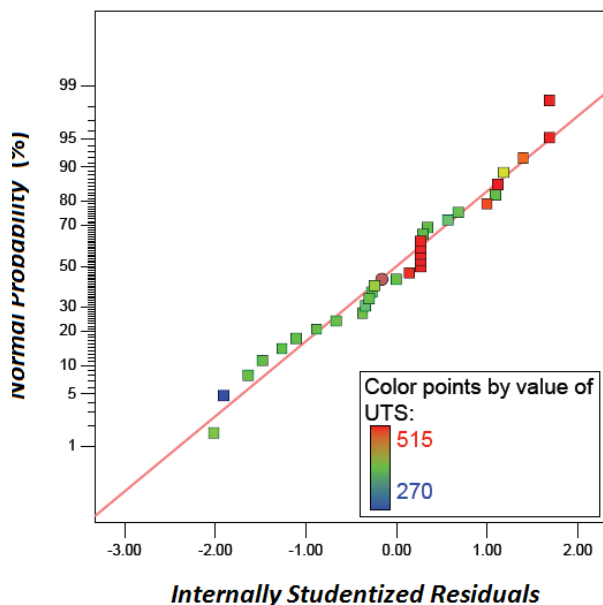


Fig. 9 The effect of N, S, and D variables on the ultimate tensile strength

شکل 9 تأثیر متغیرهای N, S و D بر استحکام کششی نهایی

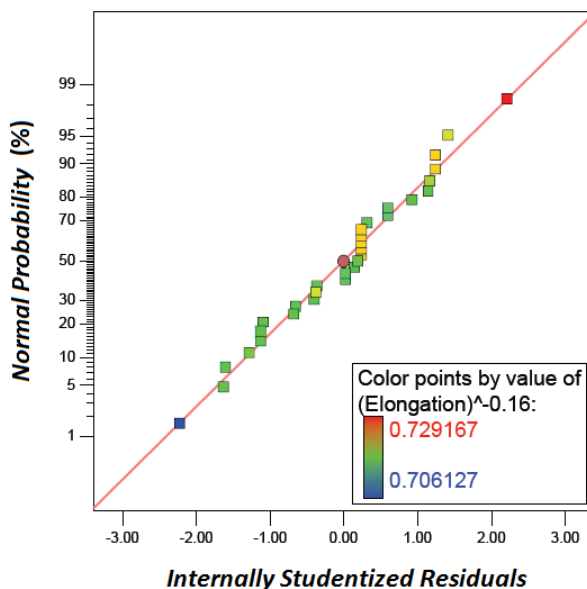
از سوی دیگر، افزایش قطر شانه ابزار از 15 mm به 21 mm باعث کاهش استحکام کششی می‌شود. در این وضعیت، افزایش قطر شانه ابزار موجب افزایش حرارت اصطکاکی و دمای منطقه اغتشاشی می‌شود که منجر به رشد دانه‌ها و انحلال رسوبات خواهد شد.

تأثیر متغیرهای سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار و قطر شانه ابزار بر استحکام کششی نهایی نمونه‌های کامپوزیتی علاوه بر شکل 8، در شکل 9 نیز نشان داده شده است.



(a) Ultimate tensile strength {UTS}

{UTS} استحکام کششی نهایی (a)



(b) Percentage of elongation { (% El)^{-0.16} }

{ (% El)^{-0.16} } درصد ازدیاد طول (b)

Fig. 7 Normal probability plot

شکل 7 نمودار احتمال نرمال

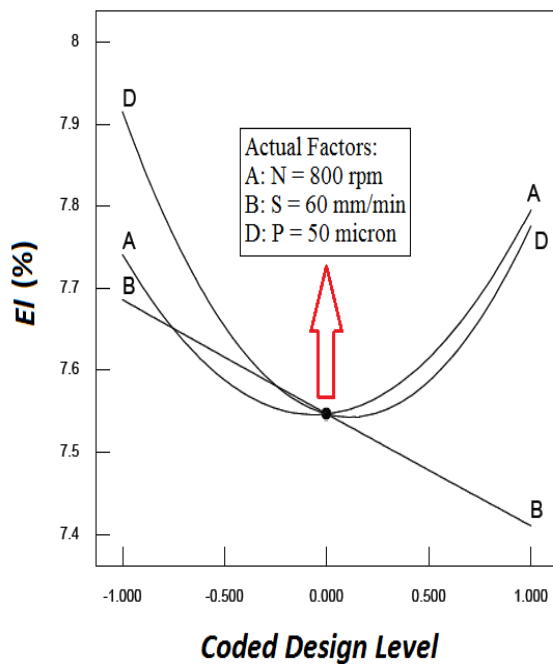


Fig. 10 The effect of N, S, and P variables on the percentage of elongation

شکل 10 تأثیر متغیرهای N، S و P بر درصد ازدیاد طول

جدول 6 ترکیب بهینه از متغیرهای ورودی فرآیند

Table 6 Optimal combination of process input variables

نوع متغیر	نام متغیر	واحد	مقدار بهینه
ورودی	سرعت دورانی ابزار	rpm	629.66
	نرخ پیشروی ابزار	mm/min	99.99
	قطر شانه ابزار	mm	15.73
	اندازه ذرات تقویت‌کننده	μm	20
پاسخ	استحکام کششی نهایی	MPa	519.13
	ازدیاد طول	%	7.8

جدول 7 مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمون صحت‌گذاری

Table 7 Comparison of the results obtained from optimization and verification test

پاسخ خروجی	بهینه‌سازی	صحت‌گذاری	درصد اختلاف
استحکام کششی (MPa)	519.13	510.5	1.66 %
ازدیاد طول (%)	7.8	7.2	7.69 %

8- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر استحکام کششی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت سطحی $\text{Al7075/Al}_2\text{O}_3$ تولید شده در فرآیند آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از متدولوژی سطح پاسخ و تابع مطلوبیت، به انجام رسید. نتایج مهم حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر مرتبه اول S (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم D^2 (مجذور قطر شانه ابزار) به عنوان عبارات موثر بر استحکام کششی نهایی نمونه‌های کامپوزیتی معرفی شدند. همچنین، پارامتر مرتبه اول S (نرخ پیشروی ابزار) و

در ادامه، با توجه به نتایج تحلیل واریانس مدل رگرسیون برای درصد ازدیاد طول (جدول 5)، تأثیر سه متغیر: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده بر انعطاف‌پذیری نمونه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل 10 نشان داده شده است، کاهش نرخ پیشروی ابزار و کاهش اندازه ذرات آلومینا نسبت به سطح میانه، منتج به افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی می‌شود. در این حالت، کاهش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش مدت زمان تماس ابزار با فلز پایه می‌شود که منجر به افزایش حرارت اصطکاکی خواهد شد. از این‌رو، افزایش دمای منطقه اغتشاشی منتج به رشد دانه‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری نمونه می‌شود. حذف خوشه‌ها و حفرات و انحلال و توزیع آن‌ها در زمینه فلزی به همراه کاهش کسر عیوب در فصل مشترک "زمینه - پودر" نیز می‌تواند به عنوان بخشی از دلایل افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی مطرح شود [45]. همچنین با کاهش نرخ پیشروی، توزیع یکنواخت‌تری از ذرات آلومینا در فلز پایه حاصل می‌شود که این موضوع با کاهش اندازه ذرات آلومینا، تقویت می‌شود.

به‌کارگیری ابزار در سرعت دورانی بالاتر نسبت به سطح میانه موجب افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی می‌شود. یکی از دلایل وقوع این پدیده می‌تواند افزایش دما در منطقه اغتشاشی باشد که منجر به انحلال موضعی فازهای سخت و نرم‌شدگی ماده می‌شود. این پدیده غالباً در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی-پذیر رخ می‌دهد

7- بهینه‌سازی و صحت‌گذاری

در این پژوهش، روش مطلوبیت¹ به عنوان روش بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [33]. در این پژوهش، هدف تابع مطلوبیت، بیشینه‌سازی متغیرهای پاسخ است. بنابراین، مطلوبیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{U-L}\right)^r & L \leq y \leq U \\ 1 & y > U \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه فوق، پارامترهای L و U به ترتیب، حدود پایینی و بالایی مقدار پاسخ y هستند. در این پژوهش، مقدار وزن مساوی یک فرض می‌شود و در نتیجه، تابع مطلوبیت در مود خطی تعریف خواهد شد. جدول 6، ترکیب بهینه از مقادیر متغیرهای ورودی فرآیند با بالاترین مقدار تابع مطلوبیت ($d = 0.915$) را جهت دستیابی همزمان به مقادیر بیشینه از استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نشان می‌دهد.

بنابراین با توجه به مقدار بالای تابع مطلوبیت، می‌توان دریافت که روند بهینه‌سازی به طور موفقیت‌آمیزی، اهداف از پیش تعیین شده را به صورت مناسب و مطلوب، محقق نموده است.

برای صحت‌گذاری ترکیب پارامتری مندرج در جدول 6، آزمون تجربی توسط ابزاری به قطر شانه 15 mm، با استفاده از ذرات Al_2O_3 به اندازه 20 میکرون و با تنظیم سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار در مقادیر نزدیک به مقادیر بهینه متغیرهای ورودی، به انجام رسید. جدول 7، نتایج حاصل از آزمون صحت‌گذاری و مقایسه آن با نتایج بهینه‌سازی را ارائه می‌کند. با توجه به اختلاف اندک میان نتایج بهینه‌سازی و آزمون تجربی، صحت و دقت فرآیند بهینه‌سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند، مورد تأیید قرار گرفت.

¹ Desirability method

- [4] Weglowski, M. S., "Friction stir processing - State of the art", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 114-129, 2018.
- [5] Zadali Kotiyani, M. and Ranjbar, Kh., "Effect of heat treatment on microstructure and wear behavior of in-situ formed Al 3003/Al3Zr + Al3Ti composite fabricated via friction stir processing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No.3, pp. 363-372, 2019.
- [6] Thomas, W. M. Nicholas, E. D. Needham, J. C. Murch, M. G. Templesmith, P. and Dawes, C. J., "Improvements to friction welding", International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, 1991.
- [7] Sahu, P. K. Singh, S. Chen, G. Yijun, L. Zhang, S. and Shi, Q., "Wear behavior of the friction stir alloyed AZ31 Mg at different volume fractions of Al particles reinforcement and its enhanced quality attributes", Tribology International, Vol. 146, pp. 106268, 2020.
- [8] Shafiei-Zarghani, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Gerlich, A. P., "Strengthening analyses and mechanical assessment of Ti/Al2O3 nano-composites produced by friction stir processing", Materials Science and Engineering: A, Vol. 631, pp. 75-85, 2015.
- [9] Sharma, V. Prakash, U. and Manoj Kumar, B. V., "Surface composites by friction stir processing: A review", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 224, pp. 117-134, 2015.
- [10] Avettand-Fénoël, M. N. Simar, A. Shabadi, R. Taillard, R. and de Meester, B., "Characterization of oxide dispersion strengthened copper based materials developed by friction stir processing", Material Design, Vol. 60, pp. 343-357, 2014.
- [11] Gopan, V. Sree Kumar, P. S. Chandran, J. P. Vijay, W. and Sanjay Kumar, M., "Experimental investigation on the effect of process parameters on friction stir processing of aluminium", Materials Today: Proceedings, Vol. 5, No. 5, pp. 13674-13681, 2018.
- [12] Bharti, S. Dutta, V. Sharma, S. and Kumar, R., "A study on the effect of Friction Stir Processing on the hardness of Aluminum 6000 series", Materials Today: Proceedings, Vol. 18, No. 7, pp. 5185-5188, 2019.
- [13] Faraji, G. Dastani, O. and Mousavi, S. A. A. A., "Effect of process parameters on microstructure and micro-hardness of AZ91/Al2O3 surface composite produced by FSP", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 20, pp. 1583-1590, 2011.
- [14] Khayyamin, D. Mostafapour, A. and Keshmiri, R., "The effect of process parameters on microstructural characteristics of AZ91/SiO2 composite fabricated by FSP", Materials Science and Engineering: A, Vol. 559, pp. 217-221, 2013.
- [15] Sathiskumar, R. Murugan, N. Dinaharan, I. and Vijay, S. J., "Characterization of boron carbide particulate reinforced in situ copper surface composites synthesized using friction stir processing", Materials Characterization, Vol. 84, pp. 16-27, 2013.
- [16] Ghasemi-Kahrizangi, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Moshref-Javadi, M., "Effect of friction stir processing on the tribological performance of Steel/Al2O3 nanocomposites", Surface and Coatings Technology, Vol. 276, pp. 507-515, 2015.
- [17] Shafiei-Zarghani, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Gerlich, A. P., "Strengthening analyses and mechanical assessment of Ti/Al2O3 nano-composites produced by friction stir processing", Materials Science and Engineering: A, Vol. 631, pp. 75-85, 2015.
- [18] Rao, V. R. Ramanaiah, N. and Sarcar, M. M. M., "Fabrication and investigation on properties of TiC reinforced Al7075 metal matrix composites", Applied Mechanics and Materials, Vol. 592-594, pp. 349-353, 2014.
- [19] Josyula, S. K. and Narala, S. K. R., "A brief review on manufacturing of Al-TiC MMC", Advanced Materials Research, Vol. 980, pp. 62-68, 2014.
- [20] Sharma, V. Prakash, U. and Manoj Kumar, B. V., "Surface composites by friction stir processing: A review", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 224, pp. 117-134, 2015.
- [21] Mishra, R. S. Ma, Z. Y. and Charit, I., "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite", Materials Science and Engineering: A, Vol. 341, No. 1-2, pp. 307-310, 2003.

عبارت مرتبه دوم P^2 (مجذور اندازه ذرات تقویت کننده) به عنوان عبارات موثر بر درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی، استخراج و مشخص شدند.

- بررسی نمودار منحنی سطح پاسخ نشان داد، در صورتی که قطر شانه ابزار ثابت در نظر گرفته شود، افزایش نرخ پیشروی ابزار از 60 mm/min به 100 mm/min موجب افزایش 5.81 درصدی استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. در این حالت، افزایش نرخ پیشروی موجب کاهش حرارت ورودی به منطقه اغتشاشی می‌شود که منتج به کاهش رشد دانه‌ها و بهسازی میکروساختار خواهد شد.
- با بررسی نمودار منحنی سطح پاسخ می‌توان دریافت که تنظیم مقادیر سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار به ترتیب در مقادیر 800 rpm و 15 mm، منتج به دستیابی به ماکزیمم استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. همچنین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در مقدار 800 rpm تنظیم شود، افزایش قطر شانه ابزار از 9 mm به 15 mm باعث افزایش 17.97 درصدی استحکام کششی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش بیشتر در قطر شانه ابزار موجب افزایش دمای منطقه اغتشاشی می‌شود که منجر به انحلال دانه‌ها و کاهش استحکام کششی خواهد شد.
- نتایج تحلیل واریانس نشان داد که کاهش نرخ پیشروی ابزار از 60 mm/min به 20 mm/min و کاهش اندازه ذرات آلومینا از 50 μm به 20 μm ، به ترتیب موجب افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی به میزان 1.85 % و 5.04 % می‌شود. همچنین با کاهش نرخ پیشروی، توزیع یکنواخت‌تری از ذرات آلومینا در فلز پایه حاصل می‌شود که این موضوع با کاهش اندازه ذرات آلومینا، تقویت می‌شود. از سوی دیگر، افزایش سرعت دورانی ابزار نسبت به سطح میانه منجر به انحلال موضعی فازهای سخت و نرم‌شدگی ماده می‌شود که منتج به افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی خواهد شد.
- مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند جهت دستیابی به مقادیر بیشینه از استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی، استخراج گردید. مقدار بالای تابع مطلوبیت (0.915)، نشان داد که روند بهینه‌سازی به طور موفقیت‌آمیزی، اهداف از پیش تعیین شده را به صورت مناسب و مطلوب، محقق نموده است.
- اختلاف اندک میان نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمون صحت-گذاری (کمتر از 8 درصد)، صحت و دقت روند بهینه‌سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند را تأیید نمود.

9- مراجع

- [1] Mironov, S. Sato, Y. S. and Kokawa, H., "Nanocrystalline titanium, Chapter 4: Friction-stir processing", Elsevier, ISBN 9780128145999, pp. 55-69, 2019.
- [2] Yousefpour, H. and Akbari Mousavi, S. A. A., "Investigations on microstructure, wear behavior and corrosion resistance of brass/graphite composite produced by friction stir processing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 253-260, 2016.
- [3] Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering: R: Reports, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.

- [40] Montgomery, D. C., "Design and analysis of experiments", 9th edition, John Wiley & Sons, ISBN 978-1-119-11347-8, 2017.
- [41] Arbegast, W. J., "Modeling friction stir joining as a metalworking process", Proceedings of Hot Deformation of Aluminum Alloys III, pp. 313-327, 2003.
- [42] Benavides, S., Li, Y., Murr, L. E., Brown, D. and McClure, J. C., "Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminium", Scripta Materialia, Vol. 41, No. 8, pp. 809-815, 1999.
- [43] Shanmuga Sundaram, N. and Murugan, N., "Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminium alloys", Materials & Design, Vol. 31, No. 9, pp. 4184-4193, 2010.
- [44] Ahmadi, A., Toroghinejad, M. R. and Najafizadeh, A., "Evaluation of microstructure and mechanical properties of Al/Al₂O₃/SiC hybrid composite fabricated by accumulative roll bonding process", Materials & Design, Vol. 53, pp.13-19, 2014.
- [45] Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "Experimental evaluation of forming limit diagram and mechanical properties of nano/ultra-fine grained aluminum strips fabricated by accumulative roll bonding", International Journal of Materials Research, Vol. 108, No. 12, pp.1036-1044, 2017.
- [22] Mahmoud, E. R. I. Takahashi, M. Shibayanagi, T. and Ikeuchi, K., "Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14, No. 5, pp. 413-425, 2009.
- [23] Shafiei-Zarghani, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Zarei-Hanzaki, A., "Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stir processing", Materials Science and Engineering: A, Vol. 500, No. 1-2, pp. 84-91, 2009.
- [24] Zahmatkesh, B. and Enayati, M. H., "A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing", Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, No. 24-25, pp. 6734-6740, 2010.
- [25] Maxwell Rejil, C. Dinaharan, I. Vijay, S. J. and Murugan, N., "Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/(TiC+B4C) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate", Materials Science and Engineering: A, Vol. 552, pp. 336-344, 2012.
- [26] Soleymani, S. Abdollah-zadeh, A. and Alidokht, S. A., "Microstructural and tribological properties of Al5083 based surface hybrid composite produced by friction stir processing", Wear, Vol. 278-279, pp. 41-47, 2012.
- [27] Ahmadifard, S. Shahin, N. Kazemi, S. Heidarpour, A. and Shirazi, A., "Fabrication of A5083/SiC surface composite by friction stir processing and its characterization", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 31-36, 2016.
- [28] Khodabakhshi, E. Kazemi, Sh. and Ahmadifard, S., "Investigation the mechanical and microstructural properties of copper surface composite Cu/SiO₂ fabricated by friction stir processing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 426-433, 2018.
- [29] Kurt, A. Uygur, I. and Cete, E., "Surface modification of aluminium by friction stir processing", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, pp. 313-317, 2011.
- [30] Azizieh, M. Kokabi, A. H. and Abachi, P., "Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al₂O₃ nanocomposites fabricated by friction stir processing", Materials and Design, Vol. 32, pp. 2034-2041, 2011.
- [31] Nakhaei, M. R., Naderi, G. and Mostafapour, A., "Effect of processing parameters on morphology and tensile properties of PP/EPDM/organoclay nanocomposites fabricated by friction stir processing", Iranian Polymer Journal, Vol. 25, pp. 179-191, 2016.
- [32] Mostafapour, A., Naderi G. and Nakhaei M. R., "Effect of process parameters on fracture toughness of PP/EPDM/nanoclay nanocomposite fabricated by novel method of heat assisted friction stir processing", Polymer Composites, Vol. 39, No. 7, pp. 2336-2346, 2018.
- [33] Myers, R. H. Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, C. M., "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments", 4th edition, John Wiley & Sons, ISBN 978-1-118 91601-8, 2016.
- [34] Vahdati, M. Mahdavejad, R. and Amini, S., "Statistical Analysis and Optimization of Factors Affecting the Spring-back Phenomenon in UVaSPIF Process Using Response Surface Methodology", International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, Vol. 8, No.1, pp. 13-23, 2015.
- [35] Choopani, Y. Khajehzadeh, M. and Razfar, M., "Optimization of parameters affecting the magnetic abrasive finishing process using response surface method", In Persian, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 52, No. 10, pp. 41-50, 2019.
- [36] Design Expert software, <http://www.statease.com>, available in 1, April 2020.
- [37] Online materials information resource, <http://www.matweb.com>, available in 1, April 2020.
- [38] Heat Treatment of Aluminum Alloys, Aerospace Material Specification, AMSH6088, 1997.
- [39] Pourian Chemical Institute, <http://pourian-chemical.com>, available in 22, May 2020.



محاسبه بارکمانش کلی پوسته‌های ساندویچی مخروطی کامپوزیتی با هسته مشبک تحت بار محوری با استفاده از یک روش معادل‌سازی جدید

مهدي زارعی¹، غلامحسین رحیمی^{2*}

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

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 111-14115، rahimi_gh@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله، مدلی تحلیلی براساس یک تکنیک معادل‌سازی جدید جهت پیش‌بینی کمانش کلی پوسته‌های ساندویچی مخروطی با هسته مشبک تحت بار محوری ارائه شده است. سازه ساندویچی از دو پوسته مخروطی داخلی و خارجی به همراه هسته‌ای مشبک از تقویت‌کننده‌ها که ما بین این دو پوسته قرار می‌گیرند، تشکیل می‌شود. از یک روش تحلیلی-تقریبی معادل‌سازی توسعه یافته جهت معادل کردن هسته مشبک با یک پوسته کامپوزیتی استفاده می‌گردد. در ابتدا سفتی معادل هسته مشبک با استفاده از آنالیز نیرو و ممان بر روی یک سلول واحد از ساختار مشبک به دست می‌آید و سپس با استفاده از روش جمع آثار و به منظور دستیابی به سفتی کل سازه، با سفتی‌های پوسته‌ها جمع می‌شوند. معادلات حاکم بر پوسته ساندویچی بر اساس تئوری کلاسیک دائل استخراج می‌شوند. از روش گالرکین برای محاسبه بارکمانش پوسته‌های ساندویچی مخروطی استفاده می‌شود. جهت صحت‌سنجی نتایج روش تحلیلی، یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی نیز در نرم افزار آباکوس ساخته می‌شود. مقایسه نتایج نشان داد که دو روش مذکور تطابق خوبی با هم داشته و مدل تحلیلی از دقت کافی برای پیش‌بینی رفتار کمانشی پوسته‌های مخروطی ساندویچی با هسته مشبک برخوردار است.

دریافت: 1399/01/20

پذیرش: 1399/11/10

کلیدواژه‌ها:

کمانش کلی
پوسته ساندویچی
روش معادل‌سازی
روش گالرکین
روش اجزای محدود

Global buckling load calculation of the of sandwich conical shells with lattice cores subjected to axial compression loading using a novel smeared method

Mehdi Zarei, Gholam Hossein Rahimi*

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

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, rahimi_gh@modares.ac.ir

Keywords

Global buckling,
Sandwich conical shell,
Smeared method,
Galerkin method,
FEM

Abstract

In the present paper, an analytical model was presented according to a novel smeared stiffener approach in order to predict the global buckling load of composite sandwich conical shells with lattice core subjected to axial compression loading. The sandwich panel was made up of two skins and a lattice core. A smeared method was developed to approximate the lattice core with an equivalent composite shell. First, using the forces and moments analyses of a unit cell, the stiffness contribution due to the lattice were determined and then superimposed with those of the inner and outer skins in order to obtain the stiffness parameters of the whole panel. The governing equations were extracted according to the classical shell theory of Donnell type. Galerkin method was employed to obtain the buckling loads of the composite sandwich conical shells. A 3-D finite element model was also created using ABAQUS software in order to validate the analytical results. The comparison of the results indicated a good agreement between the two implemented methods and revealed that the proposed analytical model is accurate enough to predict the buckling behavior of sandwich conical shells with lattice core.

1- مقدمه

استفاده از آنها شده است، به نحوی که هم اینک استفاده از این سازه‌ها اغلب محدود به سازه‌های خاص هوافضایی نظیر سازه‌های پرتابه‌های فضایی، تلسکوپ‌های فضایی و دماغه موشک‌ها شده است. این سازه‌ها متشکل از پوسته و تقویت‌کننده (به صورت تیر) می‌باشند که می‌تواند در دو طرف پوسته قرار گرفته و باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت و سفتی سازه شود بدون اینکه افزایش قابل توجهی در وزن آن ایجاد کند. سازه‌های مشبک کامپوزیتی به طور همزمان قابلیت‌های سازه‌های کامپوزیتی ساده و سازه‌های مشبک را

پوسته‌های تقویت‌شده (مشبک) کامپوزیتی به عنوان یکی از پرکاربردترین نمونه سازه‌های مشبک، بخاطر دارا بودن فوایدی همچون استحکام ویژه بالا، سبکی و خواص مقاومت به خوردگی، امروزه بطور وسیعی در صنایع هوابیماسازی، صنایع موشکی و دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ولی دشواری تولید و قیمت تمام شده آنها باعث تحت تأثیر قرار گرفتن موارد

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Zarei, M., Rahimi, G.H., "Global buckling load calculation of the of sandwich conical shells with lattice cores subjected to axial compression loading using a novel smeared method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1217-1226, 2021.

در سال 2013، رحیمی و همکاران [9]، توسط روش المان محدود و بر مبنای مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار انسیس، اثر تغییر سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها را بر مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده بررسی نمودند. شی و همکاران به مطالعه و بررسی رفتار کمانش پوسته‌های مخروطی تقویت‌شده تحت فشارهای جانبی خارجی پرداختند [10]. در روش تحلیلی، آنها با در نظر گرفتن توزیع غیر یکنواخت ساختار مشبک، سفتی معادل سازه را یافته و سپس به کمک اصل حداقل انرژی پتانسیل، بارهای کمانش محلی و کلی سازه را به دست آوردند. به منظور طراحی بهینه پوسته‌های تقویت شده مخروطی و بیشینه کردن مقاومت کمانش این سازه‌ها، از یک الگوریتم ژنتیک هیبریدی بهره جسته شده است.

همت نژاد و همکاران با توسعه مدل کیدانه و در نظر گرفتن اثرات برشی خارج از صفحه و خمش، ارتعاشات آزاد استوانه تقویت‌شده کامپوزیتی را بر مبنای تئوری تنش برشی مرتبه اول مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فرکانس ارتعاشات سازه تقویت‌شده از سازه تقویت‌نشده در ضخامت‌های پایین پوسته بیشتر است و ضخامت اثر مهمی روی فرکانس طبیعی دارد. این امر به این دلیل است که در ضخامت‌های پایین، اثر افزایش سفتی سازه در اثر وجود ساختار تقویت‌کننده بیشتر است [11]. همت نژاد و همکاران ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده را با کمک سه روش تحلیلی، تجربی و عددی مورد مطالعه قراردادند و تغییرات ضخامت و شرایط تکیه‌گاهی مختلف را مورد بررسی قرار دادند [12]. مقایسه نتایج روش تحلیلی با نتایج روش اجزای محدود (FEM) و نیز داده‌های به دست آمده از انجام آنالیز مودال تجربی بر روی نمونه‌های ساخته شده به کمک دستگاه پیچش‌الیاف، حاکی از دقت قابل قبول این مدل بود.

با اینکه مقالات زیادی در زمینه پوسته‌های استوانه‌ای وجود دارد، مطالعات کمتری به سازه‌های مخروطی پرداخته‌اند و در بیشتر آنها پوسته و ریب‌ها از مواد مدرج تابعی (FGM) تشکیل شده و یا تقویت‌کننده‌ها به صورت طولی و محیطی می‌باشند. قاسمی و همکاران پارامترهای موثر بر رفتار کمانشی پوسته مخروطی مشبک را بر مبنای تئوری تنش برشی مرتبه اول مورد بررسی قرار دادند [13]. نادری و همکاران اثر زاویه الیاف را بر روی کمانش پوسته‌های مخروطی بررسی کردند [14]. زارعی و رحیمی ارتعاشات مخروط کامپوزیتی مشبک را مورد مطالعه قرار داده و اثر پارامترهای مهم طراحی را با مطالعه پارامتری بررسی نمودند [15]. با افزودن یک پوسته به پوسته تقویت‌شده به طوری که تقویت‌کننده‌ها ما بین این پوسته قرار گیرند پوسته ساندویچی ایجاد می‌شود که نسبت سفتی به وزن بیشتری دارد. روش‌هایی جهت استخراج سفتی به منظور بررسی رفتار کمانشی و ارتعاشی این گونه سازه‌ها ارائه شده است [16].

در این تحقیق، مدلی تحلیلی جهت تحلیل رفتار کمانشی پوسته‌های مخروطی ساندویچی حاوی هسته مشبک ارائه شده است. این مدل تحلیلی از یک روش معادل‌سازی توسعه‌یافته به منظور استخراج ماتریس‌های سفتی تقویت‌کننده‌ها و در نتیجه کل سازه بهره جسته است. در این روش، نیروها و ممان‌های تقویت‌کننده‌ها بر اساس آنالیز نیرویی و گشتاوری یک سلول واحد محاسبه شده‌اند. برخلاف روش‌های معادل‌سازی قبلی که سازه مشبک را با یک پوسته معادل ایزوتروپیک تقریب می‌زدند، در تکنیک حاضر تقویت‌کننده‌ها با یک پوسته کامپوزیتی معادل‌سازی شده‌اند. در نتیجه، سفتی کل سازه ساندویچی با کمک روش جمع آثار و با اضافه کردن سفتی پوسته‌های درونی و بیرونی به هسته مشبک به دست می‌آیند. فرمول‌بندی مساله براساس تئوری پوسته دانل و به کمک روش گالرکین استخراج شده است.

دارند. یکی از ویژگی‌های اصلی سازه‌های مشبک کامپوزیتی، رخداد حالت‌های مختلف کمانش در آنها می‌باشد. کمانش پوسته‌های تقویت شده به سه نوع تقسیم می‌شود: ۱- کمانش پوسته، ۲- کمانش تقویت‌کننده‌های مورب (ریب-ها) و ۳- کمانش ریب و پوسته که کمانش کلی سازه نامیده می‌شود. اکثر تحقیقات انجام شده بر روی رفتار مکانیکی پوسته‌های تقویت‌شده محدود به تقویت‌کننده‌های متعامد بوده و تحقیقات کمتری به سازه‌های تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های مورب اختصاص یافته‌اند. واسیلیو و همکاران [1] تحقیقی در زمینه روش‌های ساخت، کاربردها و آنالیز کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی ساخته شده از روش پیچش الیاف کربن و آرامید-پوکسی، ارائه نمودند. سلینچنکو و همکاران [2]، روشی را برای آنالیز پوسته‌های شبکه-ای مدور بر مبنای روش معادل‌سازی ارائه نمودند. در بررسی ایشان، معادلات سازگاری و تانسورهای تنش و کرنش برای انواع مختلفی از شبکه‌های پوسته-های مدور ارائه گردید. کیدانه و همکاران با ارائه یک مدل تحلیلی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مشبک با تقویت‌کننده‌های مورب را به دست آوردند و نتایج حاصل از تحلیل را با نتایج تجربی و عددی مقایسه کردند [3]. برخلاف روش معادل‌سازی ارائه شده توسط جانکی [4]، در این روش معادلات بر مبنای صفحه میانی پوسته استوانه‌ای نوشته شده و بار کمانشی پوسته معادل با استفاده از کمینه کردن انرژی پتانسیل کل محاسبه گردید. در تکمیل این تحقیق، وُدسنبت و همکاران [5]، یک مطالعه پارامتریک را بر روی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیت تقویت‌شده ایزوگرید با کمک سه روش تجربی، عددی و تحلیلی به انجام رساندند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش تحلیلی بر مبنای روش توسعه‌یافته معادل‌سازی بسیار کارآمد بوده و به منظور پیش بینی بار کمانش عمومی سازه، از دقت بسیار خوبی برخوردار می‌باشد. هدف از این مطالعه پارامتریک، نتیجه‌گیری کلی در راستای تعیین ترکیب-های بهینه از پارامترهای طراحی مهم سازه‌های مشبک بود. لازم به ذکر است که فرمول‌بندی مسأله در دو تحقیق اخیر بر اساس تئوری کلاسیک پوسته جدار نازک می‌باشد. همچنین فرض شده بود که تقویت‌کننده‌ها تنها قادر به تحمل بار محوری بوده و بار از طریق نیروهای برشی در فصل مشترک پوسته و تقویت‌کننده‌ها منتقل می‌شود.

یزدانی و همکاران [6] بررسی‌های تجربی را بر روی رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیت انجام دادند. آنها همچنین اثرات تغییر شکل شبکه و نیز تعداد تقویت‌کننده‌ها را در نمونه‌هایی از پوسته‌های استوانه-ای تقویت‌شده‌ای که ضخامت پوسته آنها بسیار کم بود بررسی نمودند [7]. براساس نتایج این پژوهش، مشاهده گردید که در مقایسه با نمونه‌هایی که مقدار چگالی تقویت‌کننده‌ها در آنها کم بود، پوسته تقویت‌نشده عملکرد بهتری نسبت به وزن از خود بروز داد. همچنین مشخص گردید که برای استفاده بهینه از پوسته‌های تقویت‌شده نیاز به حداقل مقداری از چگالی شبکه است و از طرف دیگر پوسته‌هایی که با شبکه‌های لوزی شکل ساخته شده بودند، در بارگذاری محوری عملکرد مطلوب‌تری داشتند. در سال ۲۰۱۱، یزدانی و رحیمی یک مطالعه تجربی به منظور بررسی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای GFRP را تحت بارگذاری و بار برداری چرخه‌ای، ارائه دادند [8]. هر نمونه در ابتدا تحت فشار محوری خالص تا اندازه‌ای قرار گرفت که اولین نشانه‌های آسیب در آن دیده شود. پس از این، بارگذاری متوقف گردید و مرحله بار برداری تا مرحله رسیدن به مقدار بار صفر ادامه یافت. بر اساس نتایج این تحقیق، به نظر می‌رسد که تحت بارگذاری و بار برداری چرخه‌ای، عملکرد پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده بهتر بوده و سرعت رشد آسیب در آنها نسبت به پوسته‌های تقویت‌نشده آهسته‌تر است.

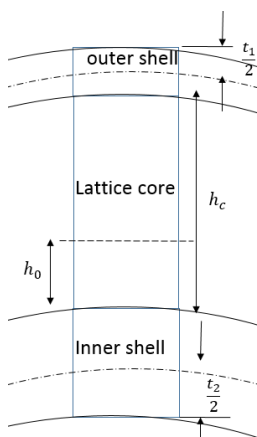


Fig. 2 Interfacing area and neutral surface

شکل 2 سطح مقطع پوسته ساندویچی و موقعیت سطح خنثی

در این تحقیق فرض می شود که تقویت کننده‌ها و پوسته‌ها دارای خواص مکانیکی مشابه می‌باشند. بنابراین رابطه 2 به صورت زیر ساده می‌شود.

$$h_0 = \frac{t_1 - t_2 + h_c}{2} = \frac{h_c - \Delta t}{2}, \quad \Delta t = t_2 - t_1 \quad (3)$$

که در آن \$t_1\$ و \$t_2\$ به ترتیب ضخامت پوسته‌های خارجی و داخلی می‌باشند. هنگامی که سازه ساندویچی تحت خمش خالص قرار می‌گیرند، عکس‌العمل ممان مربوط به تقویت کننده‌ها عبارت است از:

$$M_b = \int_{\frac{h_c - \Delta t}{2}}^{\frac{h_c + \Delta t}{2}} b_h z \sigma_l dz = \int_{\frac{h_c - \Delta t}{2}}^{\frac{h_c + \Delta t}{2}} E_c b_h z \kappa_l dz = E_c I_c \kappa_l + E_c A_c \kappa_l \frac{\Delta t^2}{4} \quad (4)$$

که در آن \$h_c, b_h, A_c\$ و \$I_c\$ به ترتیب ارتفاع، پهنا، سطح مقطع و ممان اینرسی مرتبط به تقویت کننده‌ها می‌باشند. همچنین انحنای مربوط به تقویت کننده‌ها در راستای طولی به وسیله رابطه زیر در مختصات مخروطی بیان می‌شود [17].

$$\kappa_l = \kappa_x c^2 + \kappa_{x\theta} s c + \kappa_{\theta s} s^2 \quad (5)$$

حال فرض می‌شود که سازه ساندویچی تحت نیروی محوری (کششی یا فشاری) قرار گیرد، در این صورت ممان عکس‌العمل در تقویت کننده‌ها با توجه به سطح خنثی به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$M_a = \int_{-h_0}^{h_c - h_0} b_h z \sigma_l dz = \int_{-h_0}^{h_c - h_0} E_c b_h \varepsilon_l^0 dz = E_c A_c \varepsilon_l^0 \left(\frac{h_c}{2} - h_0 \right) \quad (6)$$

کل ممان عکس‌العمل مربوط به تقویت کننده‌ها برابر است با مجموع ممان‌های ناشی از خمش خالص و نیروی محوری که به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$M = M_a + M_b = E_c I_c \kappa_l + E_c A_c \varepsilon_l^0 \frac{\Delta t}{2} + E_c A_c \kappa_l \frac{\Delta t^2}{4} \quad (7)$$

به همین ترتیب نیروی عکس‌العمل که ناشی از بارگذاری خمشی و محوری است به صورت زیر قابل محاسبه است

$$F = \int_{-h_0}^{h_c - h_0} b_h \sigma_l dz = \int_{-h_0}^{h_c - h_0} E_c b_h (\varepsilon_l^0 + z \kappa_l) dz = \quad (8)$$

دقت نتایج تحلیلی با مقایسه با نتایج عددی نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس سنجیده می‌شود.

2- روش معادل سازی

2-1- آنالیز سطح مشترک پوسته-تقویت کننده

شکل 1 سیستم مختصات قرار گرفته بر روی تقویت کننده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 2 مجموعه پوسته‌ها و تقویت کننده برای آنالیز ممان و نیرو در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا فرض می‌شود که سازه تحت خمش خالص قرار می‌گیرد. به منظور به دست آوردن سطح خنثی، بایستی نیروی محوری بر روی سطح تحت خمش خالص برابر صفر باشد. بنابراین با استفاده از روابط زیر سطح خنثی بدست می‌آید

$$\int_A \sigma_l dA = \int_{A_{f2}} \sigma_{f2} dA + \int_{A_c} \sigma_c dA + \int_{A_{f1}} \sigma_{f1} dA = 0$$

$$\int_{(-h_0 - t_2)}^{-h_0} E_{f2} \kappa_l z dz + \int_{-h_0}^{(h_c - h_0)} E_c \kappa_l z dz$$

$$+ \int_{(h_c - h_0)}^{(t_1 + h_c - h_0)} E_{f1} \kappa_l z dz = 0 \quad (1)$$

که در آن اندیس‌های \$l\$ و \$c\$ به ترتیب نشان‌دهنده جهت طولی تقویت کننده‌ها و هسته مشبک می‌باشد. \$\kappa_l\$ نشان‌دهنده انحنای تقویت کننده‌ها می‌باشد. با

$$h_0 = \frac{-E_{f2} t_2^2 + E_c h_c^2 + 2E_{f1} t_1 h_c + E_{f1} t_1^2}{2(E_{f1} t_2 + E_{f2} t_1 + E_c h_c)} \quad (2)$$

ساده‌سازی معادلات بالا، مکان سطح خنثی به صورت زیر به دست می‌آید

که در آن \$E_c, E_{f1}\$ و \$E_{f2}\$ به ترتیب مدول یانگ مربوط به تقویت کننده‌ها، پوسته داخلی و پوسته خارجی می‌باشند.

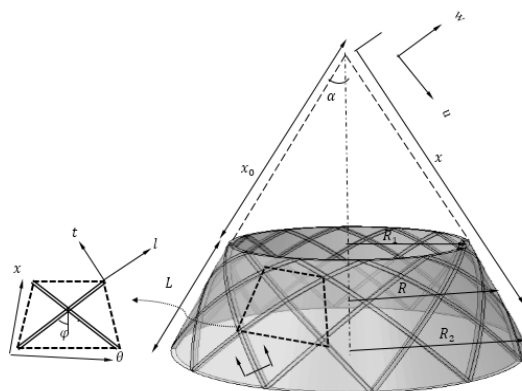


Fig. 1 Sandwich conical shell with lattice core

شکل 1 نمایی از پوسته ساندویچی مخروطی با هسته مشبک

با جمع برداری نیروها و ممان‌ها بر روی ضلع مربوطه در سلول واحد در راستای مختصات مخروطی، خواهیم داشت

$$\begin{aligned} F_x &= F_1 \cos(\varphi) + F_2 \cos(\varphi) \\ F_\theta &= F_1 \sin(\varphi) + F_2 \sin(\varphi) \\ M_x &= M_1 \cos(\varphi) + M_2 \cos(\varphi) \\ M_\theta &= M_1 \sin(\varphi) + M_2 \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

نیروها و ممان‌های برشی با جمع نیرو و ممان در راستای یکی از اضلاع راست یا چپ سلول واحد به دست می‌آیند

$$\begin{aligned} F_{x\theta} &= F_1 \sin(\varphi) - F_2 \cos(\varphi) \\ M_{x\theta} &= M_1 \sin(\varphi) - M_2 \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (12)$$

با تقسیم نیروها و ممان‌های به دست آمده بر طول‌های مربوطه، نیروها و ممان‌های منتجه به دست می‌آیند که در قالب ماتریسی به شکل زیر است

$$\begin{bmatrix} N_x^c \\ N_\theta^c \\ N_{x\theta}^c \\ M_x^c \\ M_\theta^c \\ M_{x\theta}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]^c & [B]^c \\ [B]^c & [D]^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{x\theta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

که در آن

$$\begin{aligned} [A(x)]^c &= 2E_c A_c \begin{bmatrix} \frac{c^3}{a(x)} & \frac{cs^2}{a(x)} & 0 \\ \frac{sc^2}{b(x)} & \frac{s^3}{b(x)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{sc^2}{b(x)} \end{bmatrix} \\ [B]^c &= E_c A_c \begin{bmatrix} \frac{c^3 \Delta t}{a(x)} & \frac{sc^2 \Delta t}{a(x)} & 0 \\ \frac{sc^2 \Delta t}{b(x)} & \frac{cs^2 \Delta t}{b(x)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t sc^2}{b(x)} \end{bmatrix} \\ [D]^c &= E_c A_c \begin{bmatrix} \left[\frac{c^3 \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{2I_c}{A_c} c^3}{a(x)} \right] & \left[\frac{sc^2 \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{2I_c}{A_c} sc^2}{a(x)} \right] & 0 \\ \left[\frac{sc^2 \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{2I_c}{A_c} sc^2}{b(x)} \right] & \left[\frac{s^3 \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{2I_c}{A_c} s^3}{b(x)} \right] & 0 \\ 0 & 0 & \left[\frac{sc^2 \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{2I_c}{A_c} sc^2}{b(x)} \right] \end{bmatrix} \end{aligned}$$

9

$$a(x) = \frac{\pi R(x) \cos \varphi(x)}{N}$$

$$b(x) = \frac{a(x)}{\tan \varphi(x)}$$

که در آن N نشان دهنده نصف تعداد کل تقویت کننده‌ها است. همانطور که مشاهده می‌شود، رابطه 13 با در نظر گرفتن شرایط خاص (پوسته داخلی با ضخامت صفر و کرنش یکنواخت در راستای عمق تقویت کننده که معادل ممان اینرسی صفر است) به مدل کیدانه (یک مدل ریاضی برای تعیین سفتی معادل تقویت کننده‌ها در سازه استوانه مشبک) [3] برای سفتی تقویت کننده‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، نیروها و ممان‌های منتجه برای پوسته‌های داخلی و خارجی بر حسب کرنش‌های مربوط به سطح خنثی به صورت زیر بیان می‌شوند

$$E_c A_c \varepsilon_l^0 + E_c A_c \kappa_l \frac{\Delta t}{2}$$

کرنش در راستای طولی تقویت کننده‌ها با استفاده از ماتریس انتقال در مختصات مخروطی به صورت زیر بیان می‌شود [17].

$$\varepsilon_l^0 = \varepsilon_x^0 c^2 + \varepsilon_\theta^0 s^2 + \gamma_{x\theta}^0 sc \quad (9)$$

که در آن $c = \sin \varphi$ و $s = \cos \varphi$ زاویه تقویت کننده با راستای طولی مخروط می‌باشد.

2-2- آنالیز نیرویی و گشتاوری سلول واحد

برای توسعه مدل ریاضی فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند.

- مدول عرضی تقویت کننده خیلی کوچکتر از مدول طولی آن است و ابعاد سطح مقطع تقویت کننده از طول آن کوچکتر است.
- کرنش در طول ارتفاع تقویت کننده به صورت خطی تغییر می‌کند.
- بار از طریق نیروهای برشی بین پوسته - تقویت کننده منتقل می‌شود.
- سطح خنثی تنها از آن قسمتی از پوسته که با تقویت کننده در تماس است متاثر می‌شود.

نیروها و ممان‌های مربوط به هسته در یک سلول واحد مطابق با شکل 3 نشان داده شده است. نیروها در راستای تقویت کننده‌ها و ممان‌های عمود بر تقویت کننده‌ها به صورت زیر بدست می‌آیند

$$\begin{aligned} F_1 &= K_1 \varepsilon_l^0(\varphi) + K_2 \kappa_l(\varphi) \\ F_2 &= K_1 \varepsilon_l^0(-\varphi) + K_2 \kappa_l(-\varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

$$M_1 = K_2 \varepsilon_l^0(\varphi) + K_3 \kappa_l(\varphi)$$

$$M_2 = K_2 \varepsilon_l^0(-\varphi) + K_3 \kappa_l(-\varphi)$$

که در آن

$$K_1 = E_c A_c$$

$$K_2 = E_c A_c \frac{\Delta t}{2}$$

$$K_3 = E_c I_c + E_c A_c \frac{\Delta t^2}{4}$$

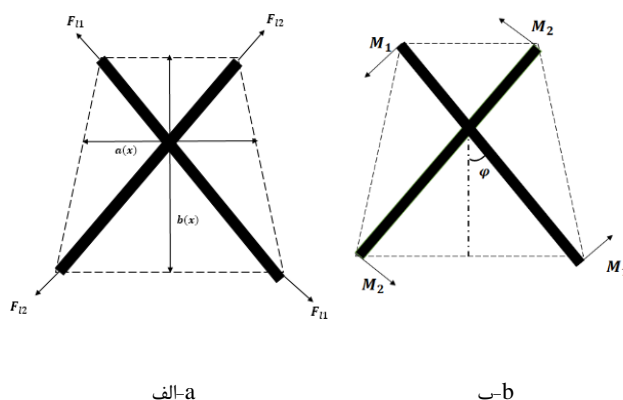


Fig. 3 Force (a) and moment (b) diagrams of a unit cell

شکل 3 دیاگرام (الف) نیروها و (ب) گشتاورهای یک سلول واحد از ساختار تقویت کننده

$$\kappa_{x\theta} = -2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)$$

معادلات حرکت برای یک پوسته مخروطی ناقص به صورت زیر است

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial N_{x\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{R(x)} (N_x - N_\theta) &= 0 \\ \frac{\partial N_{x\theta}}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{2 \sin \alpha}{R(x)} N_{x\theta} + \frac{\cos \alpha}{R(x)} Q_\theta &= 0 \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{R(x)} Q_x - \frac{\cos \alpha}{R(x)} N_\theta \\ + \frac{\partial}{R(x) \partial x} \left(R(x) N_{x0} \frac{\partial w}{\partial x} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

که در آن بار محوری به صورت زیر است:

$$N_{x0} = - \frac{P}{2\pi R(x) \cos \alpha} \quad (20)$$

با جایگذاری معادلات 17 و 18 در معادلات 19، معادلات حرکت بر

حسب جابجایی‌ها و مشتقات آنها به صورت زیر بدست می‌آیند

$$\begin{aligned} L_{11}u + L_{12}v + L_{13}w &= \Gamma_1 = 0 \\ L_{21}u + L_{22}v + L_{23}w &= \Gamma_2 = 0 \\ L_{31}u + L_{32}v + L_{33}w &= \Gamma_3 = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

که در آن Γ_i ها معادلات تعادل برحسب جابه جایی‌ها هستند.

برای یک پوسته مخروطی، میدان جا بجایی به صورت زیر در نظر گرفته

می‌شوند [12]

$$\begin{aligned} \psi(x) = \alpha_1 \cosh \left(\frac{\lambda_m(x-x_0)}{L} \right) \\ + \alpha_2 \cosh \left(\frac{\lambda_m(x-x_0)}{L} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} -\xi_m \left(\alpha_3 \sinh \left(\frac{\lambda_m(x-x_0)}{L} \right) \right. \\ \left. + \alpha_4 \sin \left(\frac{\lambda_m(x-x_0)}{L} \right) \right) \end{aligned}$$

$$u = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_m \frac{\partial \psi_m(x)}{\partial x} \sin(n\theta) \quad (23)$$

$$v = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_m \psi_m(x) \cos(n\theta)$$

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_m \psi_m(x) \sin(n\theta)$$

که در آن A_m ، B_m و C_m دامنه‌های ارتعاش و m و n به ترتیب نیم موج-های طولی و محیطی می‌باشد. همچنین، $\psi(x)$ تابع تیر است که شرایط

مرزی را ارضا کرده و به صورت زیر بیان می‌شود [12,20]

که ثابت‌های α_i ، λ_i و ξ_i با توجه به نوع شرایط مرزی در جدول 1 لیست شده‌اند [12,20].

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ N_{x\theta} \\ M_x \\ M_\theta \\ M_{x\theta} \end{Bmatrix}^{f1,f2} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix}^{f1,f2} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{\theta\theta}^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{x\theta} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

که در آن سفتی‌های کششی، خمش-کشش و خمشی پوسته‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند [17]

$$\begin{aligned} (A_{ij}, B_{ij}, D_{ij})^{f1,f2} &= \sum_{k=1}^n \int_{t^{k-1}}^{t^k} \bar{Q}_{ij}^{f1,f2}(1, z, z^2) dz, \\ k &= 1, 2, \dots \quad i, j = 1, 2, 6 \end{aligned} \quad (15)$$

با توجه به اینکه نیروها و ممان‌های منته به حساب کرنش‌های سطح

خنثی محاسبه می‌شوند، می‌توانند به صورت مستقیم با هم جمع شوند. با

استفاده از جمع آثار این امر طبق رابطه زیر میسر می‌شود

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N^{f1} + N^c + N^{f2} \\ M^{f1} + M^c + M^{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (16)$$

که در آن N^{f1} ، N^{f2} و N^c به ترتیب نشان‌دهنده نیروهای منته ناشی از

پوسته داخلی، خارجی و هسته مشبک می‌باشند. در نهایت، ماتریس‌های

سفتی کل سازه به صورت زیر به دست می‌آیند

$$[A(x)] = [A(x)]^c + [A]^{f1} + [A]^{f2}$$

$$[B(x)] = [B(x)]^c + [B]^{f1} + [B]^{f2} \quad (17)$$

$$[D(x)] = [D(x)]^c + [D]^{f1} + [D]^{f2}$$

3-کمانش پوسته مخروطی ساندویچی تحت بار محوری

شکل 1 نمایی از مخروط ساندویچی با شعاع کوچک R_1 ، شعاع بزرگ R_2 و

طول L و زاویه نیم راس α را نشان می‌دهد. u ، v و w به ترتیب مولفه‌های

جابجایی در راستاهای x ، θ و Z می‌باشند. روابط کرنش-جابجایی بر مبنای

تئوری پوسته دائل و با فرض تغییر شکل‌های کوچک به صورت زیر است [17]

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_\theta^0 &= \frac{u \sin \alpha + w \cos \alpha}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} \\ \gamma_{x\theta}^0 &= \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v \sin \alpha}{R} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \kappa_x &= - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \kappa_\theta &= - \frac{\sin \alpha}{R} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \end{aligned} \quad (18)$$

راستای الیاف 0 درجه مدل گردیدند. تکیه‌گاه گیردار-گیردار برای این آنالیز در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی و مکانیکی پوسته و تقویت‌کننده‌ها در جدول 2 و 3 داده شده‌اند.

جدول 2 خواص مکانیکی پوسته و تقویت‌کننده‌ها

Table 2 Material properties of the skin and lattice core

مقدار	خواص مکانیکی
5.5, 25	مدول کششی (GPa) E_{33}, E_{22}, E_{11}
1.8, 1.8, 0.76	مدول برشی (GPa) G_{12}, G_{13}, G_{23}
0.28, 0.28, 0.076	نسبت پواسون $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$
1420	چگالی (Kg/m^3) ρ

جدول 3 مشخصات هندسی پوسته مخروطی و تقویت‌کننده‌ها

Table 3 Geometrical properties for the skins and core

100	طول مخروط (mm)
100	شعاع کوچک (mm)
30	زاویه راس ($^\circ$)
2.4	ضخامت پوسته داخلی (mm)
2.4	ضخامت پوسته خارجی (mm)
40	زاویه تقویت‌کننده در شعاع بزرگ (mm)
4×4	مقطع تقویت‌کننده (mm^2)
24	تعداد تقویت‌کننده

5- نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل تحلیلی، چندین مقایسه صورت گرفته که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. در ابتدا استقلال از مش در شکل 5 آورده شده است همانطور که از شکل پیداست برای تعداد 4400 المان پوسته همگرایی لازم حاصل می‌شود همگرایی مش برای تقویت‌کننده‌ها تکرار گردید و تعداد 760 المان برای تقویت‌کننده لحاظ گردید. مقایسه‌ای برای بارهای کمانش بی‌بعد به دست آمده از روش‌های تحلیلی مختلف برای یک مخروط کامپوزیتی برحسب تعداد لایه‌های متفاوت (N) و نسبت طول به شعاع میانگین (L/R_0) در جدول 4 آورده شده است.

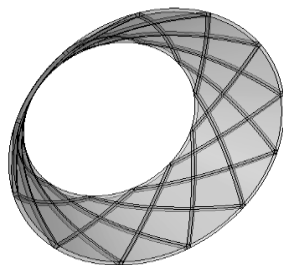


Fig. 4 3-D model built in ABAQUS 6.14 software

شکل 4 مدل سه‌بعدی ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس

همانطور دیده می‌شود توافق خوبی بین دو روش حل وجود دارد. جدول 5 مقایسه‌ای را بین نتایج حاصل از تحلیل و آنالیز اجزای محدود برای اثر لایه چینی‌های مختلف بر روی بارکمانش پوسته‌های ساندویچی مخروطی نشان

جدول 1 پارامترهای تابع تیر برای شرایط مرزی مختلف

Table 1 Beam function constants for different boundary conditions

شرط مرزی	ξ_m	λ_m	α_i
ساده-ساده	1	$m\pi$	$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$ $\alpha_3 = 0, \alpha_4 = -1$
گیردار-گیردار	$\frac{\cosh \lambda_m - \cos \lambda_m}{\sinh \lambda_m - \sin \lambda_m}$	$(m + 1/2)\pi$	$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = -1$ $\alpha_3 = 1, \alpha_4 = -1$

شرایط مرزی هندسی بر حسب تابع تیر به صورت زیر نوشته می‌شوند

$$\begin{aligned} \text{تکیه گاه ساده} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \psi = 0 \\ \text{تکیه گاه گیردار} \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = \psi = 0 \\ \text{تکیه گاه آزاد} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

برای سادگی در انتگرال‌گیری طرفین معادله 21 در R^i ضرب می‌شوند. سپس، روش گالرکین به منظور استخراج معادلات حاکم استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_0+L} \int_0^{2\pi} R^2 \Gamma_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} \sin(n\theta t) \, dx d\theta = 0 \\ \int_{x_0}^{x_0+L} \int_0^{2\pi} R^2 \Gamma_2 \psi \cos(n\theta) \, dx d\theta = 0 \\ \int_{x_0}^{x_0+L} \int_0^{2\pi} R^3 \Gamma_3 \psi \sin(n\theta) \, dx d\theta = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

با جایگذاری معادله 21 در 20 و سپس در 24، دستگاه معادلات همگن

زیر حاصل می‌شود

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \\ C_m \end{bmatrix} = 0 \quad (26)$$

برای رسیدن به یک حل غیر صفر لازم است دترمینان ماتریس ضرایب فوق برابر صفر شود. با این کار، یک چند جمله‌ای مشخصه برحسب m و n به دست می‌آید که مینیمم مقدا ریشه آن، به عنوان بار کمانش سازه ساندویچی در نظر گرفته می‌شود.

4- آنالیز اجزای محدود

یک مدل سه بعدی از پوسته ساندویچی با هسته مشبک در نرم‌افزار آباکوس نسخه 6.14 ساخته شد (شکل 4) که در آن ساختار تقویت‌کننده متشکل از 24 ریب می‌باشد که بر مبنای مسیر ژئودزیک تحت زاویه‌های 40 و 40- درجه نسبت به راستای طولی قرار گرفته‌اند. یک نقطه مرجع در قاعده بالا جهت اعمال بار محوری تعریف گردید. سپس برای اعمال بار یکنواخت به لبه های قاعده بالایی از قید coupling استفاده شد تقویت‌کننده‌ها با استفاده از قید tie به پوسته‌ها مقید شدند و بنابراین تقویت‌کننده و پوسته‌ها به صورت یک سازه یکپارچه مدل می‌شوند. از المان S8R برای پوسته‌ها و المان C3D20R برای مش‌بندی تقویت‌کننده‌ها استفاده شد. همگرایی مش نشان داد که 4400 المان برای هر یک از پوسته‌ها و حدود 760 المان برای هر یک از تقویت‌کننده‌ها دقت لازم را فراهم می‌کند. پوسته‌ها به صورت 4 لایه $[+30, -30]$ مدل گردیدند که هرلایه دارای ضخامت 0.6 میلی‌متر می‌باشد. تقویت‌کننده‌ها نیز به صورت یک تیر با ضخامت 4 میلی‌متر و

همانطور که مشاهده می‌شود در مقادیر کوچکتر زاویه نیم‌راس، افزایش زاویه تقویت‌کننده‌ها منجر به افزایش بیشتری در بار کمانش می‌شود ولی برای مقادیر بزرگتر زاویه نیم‌راس ($\alpha > 65$)، افزایش در زاویه تقویت‌کننده تأثیری بر روی بار کمانش ندارد. شکل 8 اثر افزایش تعداد تقویت‌کننده‌ها را بر روی بار کمانش را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در زاویه‌های نیم‌راس کوچکتر، افزایش تعداد تقویت‌کننده اثر بیشتری بر روی افزایش بار کمانش دارد.

جدول 5 مقایسه نتایج به دست آمده از روشهای عددی و تحلیلی پوسته ساندویچی برای لایه چینی‌های مختلف ($R_2 = 150mm, L = 100mm, \alpha = 30^\circ$)

Table 5. comparison of the results obtained by analytic approach and FEM for different lamination angle ($R_2 = 150mm, L = 100mm, \alpha = 30^\circ$)

Lamination		(KN)	FEM(KN)	خطا (%)	
specimen	Inner skin	Outer skin			
L1	[0/90] ₂	[30/-30] ₂	578.4(2,5)	592.5(2,5)	2.38
L2	[0/60] ₂	[0/60] ₂	552.0(1,5)	571.0(1,4)	3.33
L3	[0/90] ₂	[0/90] ₂	479.6(1,6)	530.4(1,5)	9.58
L4	[30/-30] ₂	[30/-30] ₂	471.9(2,0)	516.9(2,0)	8.71
L5	[60/-60] ₂	[60/-60] ₂	428.1(3,0)	464.4(3,0)	7.82
L6	[60/-60] ₂	[30/-30] ₂	483.5(3,0)	452.8(3,0)	6.78

جدول 6 مقایسه نتایج به دست آمده از روشهای عددی و تحلیلی پوسته ساندویچی برای ضخامت‌های متفاوت پوسته‌های داخلی و خارجی، ($[0/90]_2/core/[0/90]_2$), $R_2 = 150mm, L = 100mm, \alpha = 30^\circ$

Table 6. comparison of the results obtained by analytic approach and FEM for different thickness ($[0/90]_2/core/[0/90]_2$), $R_2 = 150mm, L = 100mm, \alpha = 30^\circ$

Thickness(mm)		present	FEM(KN)	خطا (%)
Inner skin	Outer skin			
2	2.2	386.6(1,6)	431.1(1,5)	10.32
2.2	2	397.1(1,6)	436.7(1,5)	9.07
2.4	2.2	446.5(1,6)	505.8(1,5)	11.72
2.8	2.5	570.0(1,5)	623.3(1,4)	8.55
2.5	3	606.1(1,5)	626.8(1,4)	3.30
3	2.5	620.7(1,5)	632.7(1,4)	1.90
2.8	3.2	720.5(1,5)	751.1(1,4)	4.07

6- نتیجه گیری

در این تحقیق، کمانش کلی پوسته‌های ساندویچی مخروطی با هسته مشبک توسط روش‌های تحلیلی و عددی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از یک روش معادل‌سازی توسعه‌یافته به منظور محاسبه پارامترهای سفتی تقویت‌کننده‌ها استفاده شد که سپس با اضافه کردن به سفتی‌های پوسته‌های درونی و بیرونی، سفتی معادل کل سازه ساندویچی به دست آمد. برای اعتبارسنجی نتایج تحلیلی، از مدل اجزای محدود سه‌بعدی در نرم افزار آباکوس بهره برده شد. مقایسه‌های متعدد نتایج نشان داد که روش تحلیلی می‌تواند به خوبی بار کمانش را پیش‌بینی کند. همچنین هزینه محاسباتی کمتری نسبت به روش عددی دارد. اختلاف بین نتایج دو روش در برخی از موارد بیشتر به خاطر فرضیات ساده‌سازی است که در مدل تحلیلی (مانند صرفه نظر کردن از

می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشینه اختلاف برابر با 9.58 در صد می‌باشد همچنین، مقایسه بارهای کمانش حاصل از آنالیز تحلیلی و اجزای محدود یک مخروط ساندویچی برای ضخامت‌های غیریکسان پوسته‌ها در جدول 6 ارائه شده است. این اختلاف ضخامت ممکن است در حین فرآیند ساخت پوسته‌های داخلی و خارجی و در کنار سایر خطاها روی دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود خطای کمی بین دو روش حل وجود دارد و بار کمانش برای نمونه‌ای که دارای پوسته داخلی با ضخامت بیشتری است، بزرگتر است.

جدول 4 مقایسه نسبت بار کمانش $\left(\frac{P}{2\pi E_1 t^2 / 3\sqrt{1-v_{12}^2}}\right)$ برای یک پوسته مخروطی کامپوزیتی ($E_1/E_2 = 40, G_{12} = .5E_2, v_{12} = 0.25, \alpha = 30^\circ$)

Table 4 Comparison of the buckling load ratio $\left(\frac{P}{2\pi E_1 t^2 / 3\sqrt{1-v_{12}^2}}\right)$ for a cross ply laminated conical shell ($E_1/E_2 = 40, G_{12} = .5E_2, v_{12} = 0.25, \alpha = 30^\circ$)

$\alpha=45$				
L/R ₀	N	present	[18]	[19]
0.2	2	0.1158(1,8)	0.1146(1,8)	0.1146(1,8)
	4	0.2489 (1,7)	0.2488 (1,7)	0.2487 (1,7)
	∞	0.2934(1,7)	0.2927(1,7)	-
0.5	2	0.0696(1,7)	0.0675(1,7)	0.0673(1,7)
	4	0.1068(1,5)	0.1054(1,5)	0.1054(1,5)
	∞	0.1186(1,5)	0.1158(1,5)	-

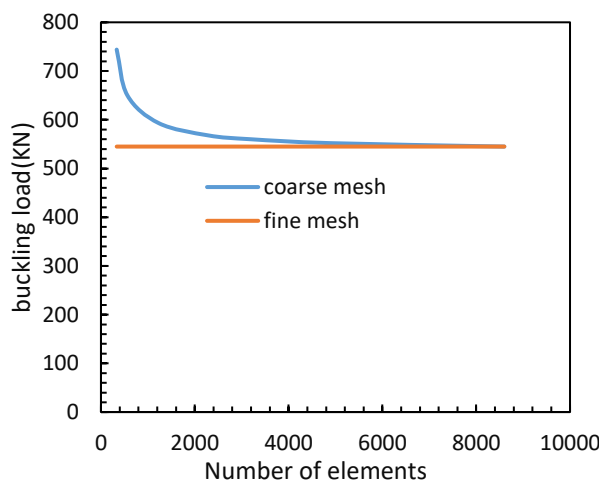


Fig. 5 Mesh convergency for inner and outer skins

شکل 5 همگرایی مش برای پوسته‌های داخلی و خارجی

همچنین دیده می‌شود با افزایش ضخامت اختلاف نتایج کمتر می‌شود این بدان دلیل است که در ضخامت‌های پایین کمانش موضعی در پوسته رخ می‌دهد و هرچه ضخامت کمتر باشد اختلاف بیشتر می‌شود انطباق خوب بین نتایج تحلیلی و عددی نشان داد که مدل تحلیلی حاضر قادر است بدون صرف زمان و هزینه‌های ساخت تجربی و محاسبات عددی، بارکمانش کلی مخروط ساندویچی با هسته مشبک را به خوبی تخمین بزند. شکل 6 شکل مودهای کمانش برای نمونه‌هایی که در جدول 5 لیست شده‌اند را نشان می‌دهد که به دلیل مشابهت از نمایش همه آنها صرف‌نظر شده است. شکل 7 تغییرات بار کمانش برحسب زاویه نیم‌راس مخروط و زاویه ننده‌ها را نشان می‌دهد

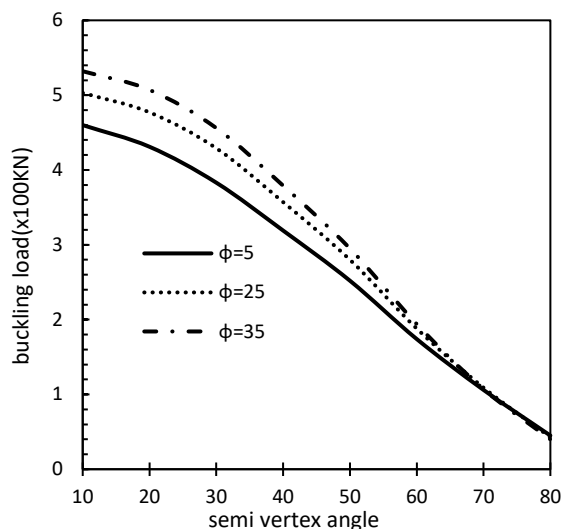


Fig. 7 Effect of the semi-vertex angle on the buckling load for various stiffener angle. ($R_2 = 150mm, L = 100mm, \alpha = 30^\circ$)

شکل 7 اثر زاویه نیم راس بر روی بار کمانش برای زاویه های مختلف تقویت کننده‌ها ($R_2 = 150mm, L = 100mm, \alpha = 30$)

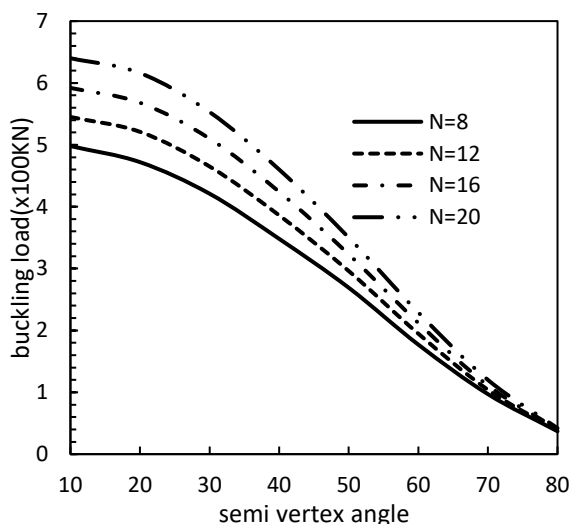


Fig. 8 Effect of the stiffener number and semi vertex angle on the buckling load ($R_2 = 150mm, L = 100mm, \alpha = 30^\circ$)

شکل 7 اثر زاویه نیم راس و تعداد تقویت کننده‌ها بر روی بار کمانش ($R_2 = 150mm, L = 100mm, \alpha = 30$)

5- مراجع

- [1] Vasiliev, V.V. Barynin, V.A. Rasin, A.F., "Anisogrid lattice structures – Survey of development and application", Composite Structures, Vol. 54, pp. 361-370, 2001.
- [2] Slinchenko, D. Verijenko, V.E., "Structural analysis of composite lattice shells of revolution on the basis of smearing stiffness", Composite Structures, Vol. 54, pp. 341-348, 2001.
- [3] Kidane, S. Li, G. Helms, J. Pang, S.S. and Woldesenbet, E., "Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders", Composites part B, Vol. 34, pp. 1-9, 2003.
- [4] Jaunky, N. Knight, N.F. Ambur, D.R., "Optimal Design of General Stiffened Composite Circular Cylinders for Global

اثرات پیچشی و برشی) و همچنین خطاهایی که در جریان ساخت مدل اجزای محدود ممکن است رخ داده باشد، می‌باشد. نتایج حاکی از این مطلب بود که بار کمانش نمونه‌ای که دارای پوسته داخلی با ضخامت بیشتری است، بزرگتر است. خطای نسبی برای ضخامت های پایین به دلیل کمانش موضعی پوسته بیشتر است. در زاویه نیم راس کوچکتر، افزایش زاویه بین تقویت کننده‌ها و تعداد تقویت کننده‌ها بار کمانش سازه را به میزان بیشتری افزایش می‌دهد.

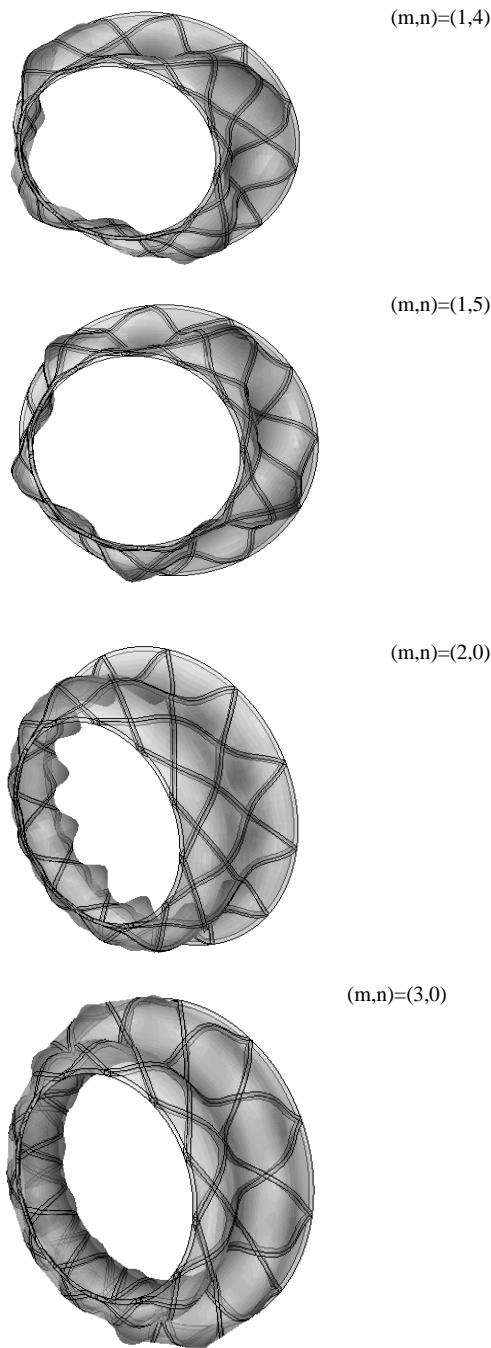


Fig. 6 Mode shapes of the sandwich conical shell under clamped-clamped end conditions

شکل 6 شکل مدهای کمانشی پوسته ساندویچی مخروطی با شرایط مرزی دو سر گیردار

- Buckling With Strength Constraints”, *Composite Structures*, Vol. 41, pp. 243-252, 1998.
- [5] Wodesenbet, E. Kidane, S. Pang., “. Optimization for buckling loads of grid stiffened composite panels”, *Composite Structures*, Vol. 60, pp. 159-169, 2003.
- [6] Yazdani, M. Rahimi, G.H. Afaghi Khatibi, A. and Hamzeh, S., “An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading”, *Scientific Research and Essays*, Vol. 4, No. 9, pp. 914-920, 2009.
- [7] Yazdani, M. and Rahimi, G.H., “The effects of helical ribs’ number and grid types on the buckling of thin-walled GFRP-stiffened shells under axial loading”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 29, No. 17, pp. 2568-2575, 2010.
- [8] Yazdani, M. and Rahimi, G.H., “The behavior of GFRP-stiffened and -unstiffened shells under cyclic axial loading and unloading”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 5, pp. 440-445, 2011.
- [9] Rahimi, G.H. Zandi, M. and Rasouli, S.F., “Analysis of the effect of stiffener profile on the buckling strength in composite isogrid stiffened shell under axial loading”, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 24, pp. 198-203, 2013.
- [10] Shi, S. Sun, Z. Ren, M. Chen, H. and Hu, X., “Buckling resistance of grid-stiffened carbon fiber thin-shell structures”, *Composites part B*, Vol. 45, pp. 888-896, 2013.
- [11] Hemmatnezhad, M. Rahimi, G.H. and Ansari, R., “On the free vibrations of grid-stiffened composite cylindrical shells”, *Acta Mechanica*, Vol. 225, pp. 609-623, 2014.
- [12] Hemmatnezhad, M. Rahimi, G.H. Tajik, M. and Pellicano, F., “Experimental, numerical and analytical investigation of free vibrational behavior of GFRP-stiffened composite cylindrical shells”, *Composite Structures*, Vol. 120, pp. 509-518, 2015.
- [13] Ghasemi, M.A. Yazdani, M. and Hoseini, S.M., “Analysis of effective parameters on the buckling of grid stiffened composite shells based on first order shear deformation theory”, In *Persian, Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 51-61, 2013.
- [14] Naderi, A.A. Rahimi, G.H. and Arefi, M., “Influence of fiber paths on buckling load of tailored conical shells”, *Steel and Composite Structures*, Vol. 16, No. 4, pp. 375-387, 2014.
- [15] Zarei, M. and Rahimi, G.H., “Free Vibration Analysis of Grid Stiffened Composite Conical Shells”, In *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-8, 2017.
- [16] Sun, F. Fan, H. Zhou, C. and Fang, D., “Equivalent analysis and failure prediction of quasi-isotropic composite sandwich cylinder with lattice core under uniaxial compression”, *Composite Structures*, Vol. 101, pp. 180-190, 2013.
- [17] Xu, Y. Tong, Y. Liu, M. Suman, B. “A new effective smeared stiffener method for the global buckling analysis of grid stiffened composite panels.”, *Composite Structures*, Vol.158, pp.83-91, 2016.
- [18] Tong, L. Wang, T.K., “Simple solutions for buckling of laminated conical shells”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 34, pp. 93-111, 1992.
- [19] Kazemi, M.E. Kouchakzadeh, M.A. Shakouri., “Stability analysis of generally laminated conical shells with variable thickness under axial compression”, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 14, pp. 1-14, 2018.
- [20] Fares, M.E. Youssif, Y.G. and Alamir, A.E. “Design and control optimization of composite laminated truncated conical shells for minimum dynamic response including transverse shear deformation” *Composite Structures*, Vol.64, pp.139-50, 2004.



استحکام خزشی کامپوزیت‌های هیبریدی مورد استفاده در هادی‌های خطوط انتقال برق

محسن مالمراد¹، خسرو رحمانی^{2*}، روح‌اله سرفراز³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران، صندوق پستی 16765-1719، kh_rahmani@sbu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله، استحکام خزشی کامپوزیت هیبریدی مورد استفاده در نسل جدید هادی‌های پر ظرفیت خطوط انتقال برق در دماهای عملکردی پیش‌بینی شده است. میله‌های کامپوزیت هیبریدی مورد استفاده در مغزی این هادی‌ها به صورت تک‌جهتی و متشکل از هسته کربن-اپوکسی و پوسته شیشه-اپوکسی به روش پالتروژن ساخته شده‌اند. جهت تعیین مقادیر مدول ذخیره و مدول اتلاف بر حسب دما، آنالیز دینامیکی-مکانیکی بر روی نمونه‌های برش داده شده از هسته کربن-اپوکسی در فرکانس‌های مختلف صورت گرفته است. همچنین آزمون خمش سه نقطه‌ای متناسب با دمای کارکرد هادی‌ها، در چند دمای مختلف با نرخ بارگذاری ثابت بر روی نمونه‌های میله‌ای کامپوزیت هیبریدی انجام شده است. با استفاده از اصل برهم‌نهی دما-زمان و استفاده از نتایج آنالیز دینامیکی-مکانیکی، نمودار مادر مدول ذخیره در دمای مرجع دلخواه ایجاد شده است. با استفاده از عامل انتقال دما-زمان بدست آمده از نمودار مادر مدول ذخیره و نیز استحکام‌های خمشی کامپوزیت هیبریدی در دماهای مختلف، نمودار مادر استحکام خمشی با نرخ کرنش ثابت ساخته شده است. سپس با استفاده از روش‌های موجود، نمودار مادر استحکام خزشی در دمای کاری دلخواه رسم شده است که می‌تواند جهت ارزیابی دوام هادی‌های مذکور در صنعت انتقال برق مورد استفاده قرار گیرد. پیش‌بینی عمر خزشی در شرایط بارگذاری حدی نشان می‌دهد که این هادی‌ها رفتار خزشی خوبی در شرایط عملکردی در مدت طولانی دارند.

دریافت: 1399/01/24

پذیرش: 1399/11/10

کلیدواژگان:

کامپوزیت هیبریدی

خزش

آنالیز دینامیکی-مکانیکی

دما

Creep strength of hybrid composites used in power transmission line conductors

Mohsen Malmorad, Khosrow Rahmani*, Roohollah Sarfaraz

Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-1719, Tehran, Iran, kh_rahmani@sbu.ac.ir

Keywords

Hybrid composites,
Creep,
DMA,
Temperature

Abstract

In this paper, the creep strength of hybrid composites used in the new generation of power transmission line conductors is predicted. The hybrid composite rods consist of carbon fiber/epoxy composite core surrounded by a glass fiber/epoxy composite shell. The hybrid rods were fabricated by using the pultrusion process. Dynamic mechanical analysis was carried out at various frequencies on specimens cut from the carbon/epoxy fiber composite core. In addition, the hybrid composite rods were subjected to three-point bending experiments at constant loading rate and different temperatures. The master curve of the storage modulus corresponding to carbon/epoxy composite core was derived at the desired reference temperature based on the time-temperature superposition principle. Consequently, the master curve of the constant strain rate flexural strength was constructed using the time-temperature shift factors and the monotonic flexural strengths of hybrid composites at different temperatures. Based on these data, the creep strength master curve was developed at the operating temperature. The prediction of creep life based on the constructed master curve shows a proper response of these conductors at service condition.

1- مقدمه

تحمل‌کننده‌ی بار تشکیل شده‌اند. مغزی کامپوزیت هیبریدی شامل دو قسمت هسته و پوسته است که به ترتیب از کامپوزیت تک‌جهتی الیاف کربن-اپوکسی و، کامپوزیت تک‌جهتی الیاف شیشه-اپوکسی تشکیل شده است (شکل 1). لایه شیشه-اپوکسی به منظور جلوگیری از تشکیل پیل گالوانیک الیاف کربن با آلومینیوم، به دور هسته داخلی پوشانده می‌شود. از ویژگی‌های مهم این هادی‌ها می‌توان به شکم‌دهی کم، کاهش تلفات خطوط شبکه و

در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری در نسل جدید هادی‌های استحکام بالا و شکم‌دهی پایین¹ مورد استفاده در صنعت انتقال برق مورد توجه قرار گرفته است. این نوع هادی‌ها، از مفتول‌های دوزنقه‌ای آلومینیوم به عنوان هادی جریان برق و مغزی کامپوزیت هیبریدی به عنوان المان اصلی

¹ High Strength Low Sag Conductors (HSLs)

Please cite this article using:

Malmorad M., Rahmani, Kh., Sarfaraz, R., "Creep strength of hybrid composites used in power transmission line conductors", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1227-1234, 2021.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

عبور بیش از دو برابری جریان برق نسبت به هادی‌های معمولی اشاره نمود [1]. استفاده از هادی‌های ساخته شده با مغزی کامپوزیتی موجب افزایش بهره‌وری سرمایه، صرفه‌جویی عملیاتی به وسیله تلفات کمتر خطوط انتقال و کاهش تولید گاز دی اکسید کربن به میزان 2.5 برابر خواهد شد [2]. کاهش تلفات خطوط انتقال نه تنها باعث کاهش مصرف سوخت در نیروگاه‌ها می‌شود بلکه می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای و دیگر گازهای مضر را نیز به طور چشمگیری کاهش دهد. هادی‌های هوایی مورد استفاده در شبکه انتقال برق در معرض بارگذاری‌های مکانیکی نظیر بارهای ناشی از نیروی باد و وزن هادی قرار دارند و دمای کاری آن‌ها متناسب با جریان برق عبوری بین 100 تا 180 درجه سانتیگراد متغیر است [3]. جایگزینی هادی‌های مرسوم با هادی‌های نسل جدید به منظور افزایش عمر و بهره‌وری شبکه انتقال برق مستلزم بررسی و پیش‌بینی عمر بلند مدت این نوع هادی‌ها به ویژه هسته کامپوزیتی به کار رفته در آن‌ها در شرایط و دمای کاری واقعی است.

2- روش‌شناسی^۶

یکی از مدل‌های پیش‌بینی رفتار بلند مدت کامپوزیت‌های پلیمری، استفاده از روش‌های شتابدار است. در این روش‌ها، نتایج آزمون‌های کوتاه مدت، با استفاده از اصل برهم‌نهی دما-زمان به زمان‌های طولانی‌تر برون‌یابی می‌شود [9].

2-1- اصل برهم‌نهی دما-زمان

در کامپوزیت‌های پلیمری با افزایش دما، زمان آسایش^۷ به علت ایجاد انرژی لازم برای حرکت ملکول‌های زمینه پلیمر کاهش می‌یابد و اثر زمان طولانی (فرکانس پایین) بر حرکت ملکول‌ها با اثر دمای بالا معادل در نظر گرفته می‌شود [13]. به معادل بودن تاثیر زمان و دما بر فرآیند آسایش اصل برهم‌نهی دما-زمان گفته می‌شود. بر اساس این اصل، نمودارهای خواص مکانیکی مواد پایه پلیمری در دماهای مختلف می‌توانند در طول محور لگاریتمی زمان انتقال یابند و نمودار مادر در دمای مرجع انتخابی را تشکیل دهند. نمودار به دست آمده از برهم‌نهی در زمان‌ها (فرکانس‌ها) و دماهای متفاوت (نسبت به دمای دلخواه انتخابی) نمودار مادر نامیده می‌شود که زمان‌های طولانی و خارج از گستره آزمایش را نیز پوشش می‌دهد [14]. به مقدار انتقال بر روی محور لگاریتمی زمان، عامل انتقال دما-زمان^۸ گفته می‌شود و با رابطه (1) بیان می‌گردد:

$$a_T = \frac{t_{T_0}}{t_T} \quad (1)$$

a_T عامل انتقال دما-زمان و t زمان آسایش و اندیس‌های T و T_0 به ترتیب دمای آزمایش و دمای مرجع را نشان می‌دهند.

روابط آرهینوس^۹ و ویلیامز-لندل-فری^{۱۰} (WLF) از مهمترین مدل‌های ارائه شده برای ارتباط بین دما و زمان بر اساس اصل TTS می‌باشند [15]. رابطه آرهینوس در دماهای خارج از دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) پلیمرها و رابطه WLF در محدوده دمای انتقال شیشه‌ای و بالاتر صادق است

شکل 1 نمونه‌ای از یک هادی با استحکام بالا و شکم‌دهی پایین، شامل مفتول‌های آلومینیومی و مغزی کامپوزیت هیبریدی



Fig. 1 A high strength low sag conductor consisting of aluminum wires and a hybrid composite core

شکل 1 نمونه‌ای از یک هادی با استحکام بالا و شکم‌دهی پایین، شامل مفتول‌های آلومینیومی و مغزی کامپوزیت هیبریدی

استحکام خمشی کامپوزیت هیبریدی اشاره شده پس از پیرسازی^۱ و نیز تحت تاثیر ازون^۲ توسط کاموسا و همکاران [4-5] بررسی شده است. نوت و همکاران [3 و 6] تاثیر دما بر استحکام کششی و اثر رطوبت بر استحکام خمشی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. همچنین عمر خزشی کامپوزیت هیبریدی تحت بارگذاری کششی به وسیله روش‌های شتابدار پیش‌بینی شده است [7]. استحکام خزشی این نوع کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی، که بسیار مهم بوده و در حین کارکرد به تناوب رخ می‌دهد، در دماهای عملکردی تاکنون بررسی نشده است که یکی از دلایل اصلی آن پرهزینه و وقت‌گیر بودن انجام این‌گونه آزمون‌ها است.

به منظور کاهش هزینه‌ها و زمان لازم برای تخمین عمر درازمدت تحت شرایط عملکردی، از روش‌های مدل‌سازی و شتابدار تخمین عمر استفاده می‌شود [8-10]. ناکادا و همکاران [11] روش شتابداری را بر اساس اصل برهم‌نهی دما-زمان^۳ (TTS) برای پیش‌بینی استحکام خزشی کامپوزیت‌های پلیمری توسعه دادند. پیش‌بینی استحکام خزشی و خستگی کامپوزیت‌های

⁴ Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

⁵ Master curve

⁶ Methodology

⁷ Relaxation time

⁸ Time-Temperature Shift Factor

⁹ Arrhenius

¹⁰ Williams-Landel-Ferry

¹ Aging

² Ozone

³ Time-Temperature Superposition (TTS) Principle

میله‌ای به قطر 7 میلی‌متر و از دو قسمت داخلی و پوسته خارجی تشکیل شده است. هسته از الیاف تک‌جهته کربن از نوع T700-12k و زمینه اپوکسی و پوسته از الیاف تک‌جهته شیشه ECR و زمینه اپوکسی تشکیل شده است. زمینه‌ی استفاده شده در هسته و پوسته یکسان و از نوع اپوکسی دمای بالا Ly-5210 شرکت هانستمن و هاردنر مربوطه Hy-5158 با نسبت وزنی رزین به هاردنر 1:4 است. مقطع نمونه کامپوزیت ساخته شده در شکل 3 نشان داده شده است. قطر هسته کامپوزیت در حدود 5 میلی‌متر و ضخامت بخش شیشه‌ای در حدود 1 میلی‌متر است. درصد حجمی الیاف در هر دو قسمت کربن و شیشه تقریباً 70 درصد است.

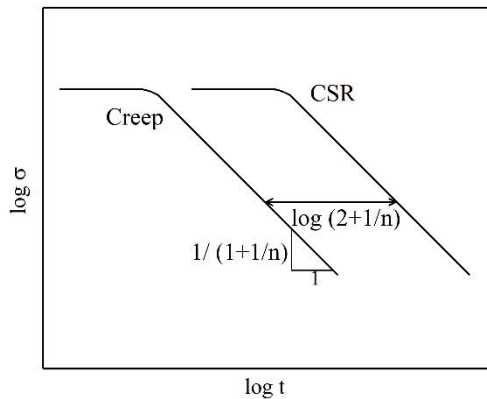


Fig.2 Schematic relationship between CSR and creep master curves [18]

شکل 2 رابطه‌ی بین نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت و استحکام خزشی [18]

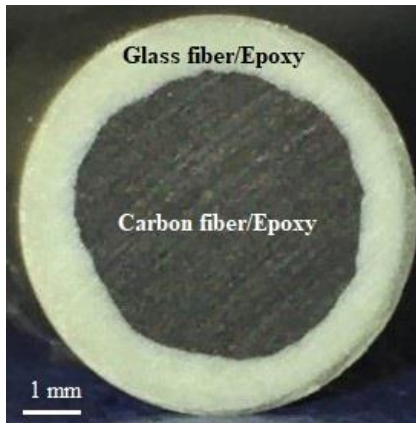


Fig.3 Cross section of hybrid composite core

شکل 3 سطح مقطع مغزی کامپوزیت هیبریدی

2-3 آنالیز دینامیکی-مکانیکی

نمونه‌های آنالیز دینامیکی-مکانیکی به صورت مستطیلی از قسمت هسته کامپوزیت کربن-اپوکسی به ابعاد $40 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ برش داده شدند و توسط دستگاه آنالیز ساخت شرکت متلر تولدو⁵ موجود در پژوهشگاه پلیمر ایران مورد آزمون قرار گرفتند. نمونه‌ها تحت بارگذاری نوسانی با دامنه ثابت

[16]. از آنجا که دمای انتقال شیشه‌ای به عنوان حداکثر دمای کاری کامپوزیت‌ها در صنایع در نظر گرفته می‌شود [17] رابطه آرهینوس (رابطه 2) برای به‌دست آوردن نمودار مادر خواص مکانیکی این مواد در دماهای کاری استفاده می‌شود.

$$\log a_T = \frac{\Delta H}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2)$$

ΔH انرژی فعال‌سازی برای حرکت ملکول‌ها و R ثابت جهانی گازها می‌باشد. در رابطه 2 دماها بر حسب کلوین می‌باشند.

2-2 روش آزمون شتابدار¹

یکی از روش‌های تخمین عمر خزشی کامپوزیت‌های پلیمری، روش آزمون شتابدار توسعه یافته توسط ناکادا و همکاران [11] است که برای انواع کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و کربن با زمینه‌های گرم‌انرم² و گرم‌سخت³ در بارگذاری‌های طولی، عرضی و خمشی اعمال شده و نتایج مطلوبی از آن به‌دست آمده است. این روش بر اساس اصل برهم‌نهی دما-زمان و با این فرض که واماندگی زمینه پلیمری کنترل‌کننده واماندگی نهایی در کامپوزیت‌ها است، توسعه یافته است. در این روش، پس از بررسی خواص ویسکوالاستیک زمینه، عامل انتقال دما-زمان در دمای مرجع انتخابی به‌دست می‌آید و سپس استحکام‌های مکانیکی در بارگذاری با نرخ ثابت در دماهای مختلف توسط آزمون‌های ساده کوتاه مدت تعیین می‌گردند. استحکام‌های به‌دست آمده در دماهای مختلف به اندازه عامل انتقال دما-زمان، که نسبت به دمای مرجع نرمال می‌شوند، در طول محور لگاریتمی زمان انتقال داده می‌شوند. نمودار ساخته شده، نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت⁴ در دمای مرجع می‌باشد. کریستسن و میانو [18] نشان دادند که برای کامپوزیت‌های پلیمری، شیب نمودارهای استحکام با نرخ کرنش ثابت و استحکام خزشی با هم برابر هستند. بنابراین، نمودار مادر استحکام خزشی در بارگذاری خمشی می‌تواند بر مبنای نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت به‌دست آید. اگر شیب نمودار مادر لگاریتم استحکام با نرخ کرنش ثابت نسبت به لگاریتم زمان انتقال یافته $\frac{1}{1+1/n}$ باشد، نمودار مادر لگاریتم استحکام خزشی با انتقال افقی به اندازه $\log \left(2 + \frac{1}{n} \right)$ در طول محور لگاریتم زمان به سمت چپ ساخته می‌شود (شکل 2).

3 مواد و آزمون

3-1 مواد

در این مطالعه، کامپوزیت‌های هیبریدی با الیاف تک‌جهته در راستای طولی به روش پالترژن ساخته شده‌اند. نمونه کامپوزیت ساخته شده به صورت

¹ Accelerated Testing Methodology (ATM)

² Thermo-plastic

³ Thermoset

⁴ Constant Strain Rate (CSR) Strength Master Curve

⁵ Mettler Toledo

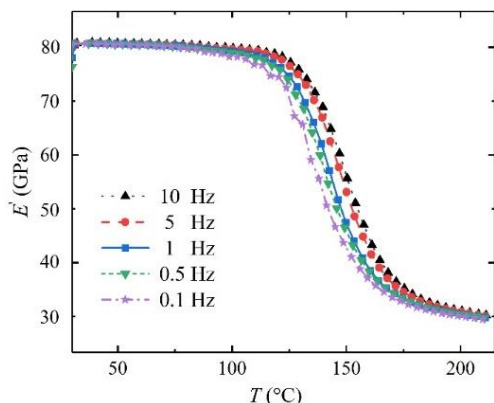


Fig. 4 DMA results of Carbon/epoxy composite for various frequencies at 3 °C/min: storage modulus vs temperature

شکل 4 مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی نسبت به دما در فرکانس‌های مختلف و نرخ دما دهی 3 °C/min

مقادیر مدول اتلاف کامپوزیت کربن-اپوکسی در فرکانس‌های مختلف نسبت به دما در شکل 5 آمده است. در تمامی فرکانس‌ها، با افزایش دما، مدول اتلاف ابتدا افزایش می‌یابد و به مقدار بیشینه خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. معمولاً برای کامپوزیت‌ها دمای متناظر با مقدار بیشینه مدول اتلاف به عنوان دمای انتقال شیشه‌ای گزارش می‌شود [20]. نقطه پیک نمودارهای اتلاف با افزایش فرکانس، به سمت راست (دماهای بالاتر) و بالا (مقادیر مدول اتلاف بیشتر) انتقال پیدا می‌کنند. نکته قابل ذکر این است که مستقل از فرکانس اعمالی، مدول ذخیره و مدول اتلاف در دماهای بالا به مقادیر خاصی همگرا می‌شوند.

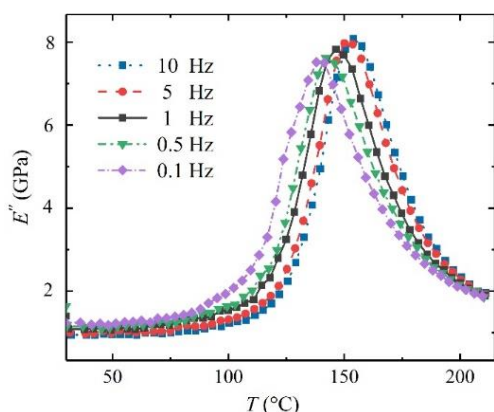


Fig. 5 DMA results of carbon/epoxy composite for various frequencies at 3 °C/min: loss modulus vs temperature

شکل 5 مدول اتلاف کامپوزیت کربن-اپوکسی نسبت به دما در فرکانس‌های مختلف و نرخ دما دهی 3 °C/min

1-1-4-2 نمودار مادر مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی

مقادیر لگاریتم مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی نسبت به زمان t (معکوس فرکانس) در سمت چپ شکل 6 آورده شده است. با انتقال افقی نمودارها در دماهای مختلف نسبت به دمای مرجع ($T_0 = 50^\circ\text{C}$)، نمودار مادر مدول ذخیره نسبت به زمان انتقال یافته t' ساخته شده است (شکل 6

20 میکرومتر و با فرکانس‌های 0.1، 0.5، 1، 5 و 10 Hz و در حالت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای با فاصله تکیه‌گاه‌های ثابت برابر با 20 mm قرار داده شدند. آزمون‌ها در دماهای مختلف، از دمای محیط تا دمای 210 °C، با نرخ 3 °C/min انجام شد. با استفاده از داده‌های آزمون، مدول ذخیره و مدول اتلاف کامپوزیت به عنوان توابعی از دما اندازه‌گیری شدند.

3-3 آزمون خمش

آزمون‌های خمشی مطابق با استاندارد ASTM-D790 [19] انجام گردید. به منظور کاهش اثرات برش در نتایج آزمون، نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی به طول 170 میلی‌متر برش داده شدند و تحت آزمون خمشی سه نقطه‌ای با فاصله بین تکیه‌گاه‌های ثابت 120 mm قرار داده شدند (نسبت طول به قطر نمونه برابر با 16). آزمون توسط دستگاه یونیورسال 10 تن مجهز به محفظه‌ی حرارتی ساخت شرکت سنتام موجود در دانشگاه علم و صنعت در دماهای محیط، 120، 140، 160 و 180 °C صورت گرفت. در دمای محیط، یک نمونه و در بقیه دماها، دو نمونه آزمایش شدند. تمامی نمونه‌ها قبل از انجام آزمون به مدت 30 دقیقه در دمای مورد نظر قرار داده شدند تا از یکنواختی دما در تمامی نقاط نمونه اطمینان حاصل شود. آزمون‌ها به صورت جابجایی کنترل و با نرخ 2 mm/min انجام شدند. تنش خمشی با اعمال رابطه 3 به داده‌های نیرو (F) - جابه‌جایی (δ) به دست آمده از آزمون خمشی سه نقطه‌ای محاسبه شدند.

$$\sigma_f = \frac{8Fl}{\pi d^3} \quad (3)$$

در این رابطه F ، L و d به ترتیب نیروی اعمال شده، فاصله بین تکیه‌گاه‌های ثابت و قطر میله‌ی کامپوزیتی در آزمون خمشی سه نقطه‌ای می‌باشند.

4- نتایج و بحث

1-1-4 آنالیز دینامیکی-مکانیکی

1-1-4 رفتار دینامیکی-مکانیکی

مقادیر مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی در فرکانس‌های مختلف نسبت به دما در شکل 4 آمده است. با افزایش دما، مدول ذخیره کاهش می‌یابد. روند کاهش مدول ذخیره با دما را می‌توان در سه ناحیه مجزا بیان نمود. در ناحیه اول، از دمای محیط تا 120 °C، افت مدول ذخیره با دما کم و قابل صرف‌نظر کردن است و می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت (ناحیه ی شیشه‌ای-ای). در ناحیه دوم، بین دماهای 120 تا 170 °C، که به آن ناحیه انتقال شیشه‌ای گفته می‌شود، کاهش مدول ذخیره با دما شدید است. در ناحیه سوم، دماهای بالاتر از 170 °C، مدول ذخیره با نرخ کمی کاهش می‌یابد و می‌توان فرض نمود که با دما، ثابت می‌ماند (ناحیه رابری). مدول ذخیره از دمای محیط تا دمای 210 °C حدود 63 درصد کاهش می‌یابد. با افزایش فرکانس در کل محدوده‌ی دمای، مدول ذخیره به سمت راست محور دما یعنی دماهای بالاتر انتقال پیدا می‌کند و در دمای ثابت مقادیر مدول ذخیره برای فرکانس‌های بالاتر، بیشتر است.

افزایش دما، شروع رفتار غیرخطی در جابه‌جایی‌های کمتر اتفاق می‌افتد. همچنین شیب نمودارها که نشان‌دهنده سفتی ظاهری نمونه‌ها است با افزایش دما کاهش می‌یابد. نقاط پیک نمودارها به عنوان شروع واماندگی در نظر گرفته شده است و تنش‌های متناظر با آن (رابطه 4) به عنوان استحکام خمشی کامپوزیت در شکل 9 با نشانه‌ها نشان داده شده است.

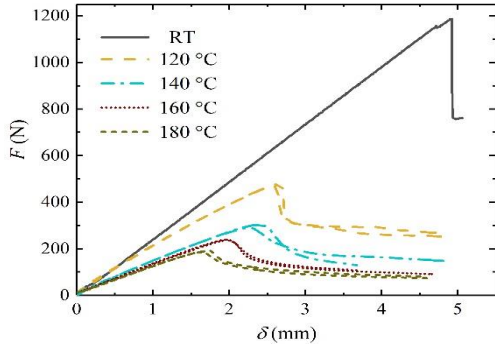


Fig. 8 Force-deflection curves of hybrid composite rods for various temperatures

شکل 8 نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای میله‌ی کامپوزیت هیبریدی در دماهای مختلف

3-4 نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت و استحکام خزشی

با انتخاب دمای مرجع 120 °C، متناسب با جریان عبوری 1400 آمپر [1] در هادی‌های خطوط انتقال برق، استفاده از مقادیر انرژی فعال‌سازی به‌دست آمده در بخش 4-1-2 و استفاده از رابطه آرهینوس (رابطه 2)، مقادیر عامل انتقال دما-زمان برای دماهای مختلف نسبت به دمای مرجع محاسبه شدند. با انتقال مقادیر استحکام خمشی در دماهای مختلف بر روی محور لگاریتم زمان به اندازه مقادیر عامل انتقال دما-زمان، نمودار مادر استحکام خمشی با نرخ کرنش ثابت ایجاد گردید (شکل 9).

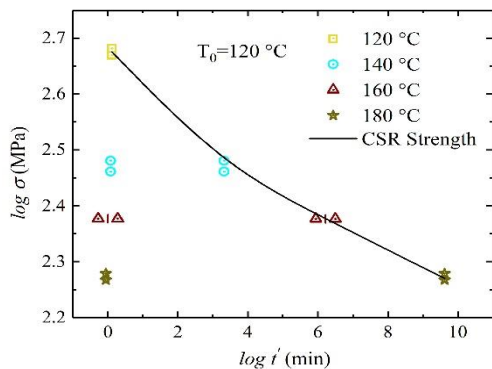


Fig. 9 Variation of flexural strength at different temperatures and CSR strength master curve at reference temperature 120 °C

شکل 9 مقادیر استحکام خمشی کامپوزیت هیبریدی در دماهای مختلف و نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت در دمای مرجع 120 °C

با رسم نمودار لگاریتم استحکام با نرخ کرنش ثابت نسبت به لگاریتم زمان انتقال یافته و محاسبه n از شیب آن $(\frac{1}{1+n})$ ، مقدار انتقال افقی نمودار مادر استحکام خزشی با توجه به رابطه $\log(2 + \frac{1}{n})$ 1.40 محاسبه شد.

سمت راست). تشکیل یک نمودار یکنواخت، صحت اصل برهم‌نهی دما-زمان برای کامپوزیت کربن-اپوکسی را نشان می‌دهد [11].

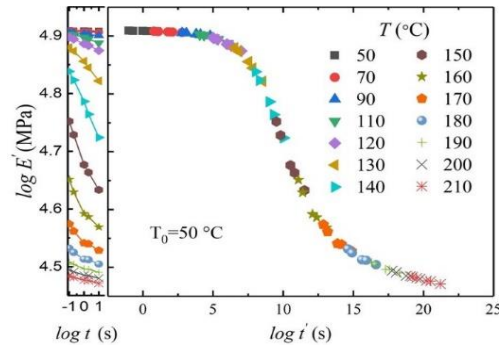


Fig. 6 Storage modulus master curve of Carbon/epoxy composite at reference temperature 50 °C

شکل 6 نمودار مادر مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی نسبت به دمای مرجع 50 °C

مقادیر عامل دما-زمان به‌دست آمده برای کامپوزیت مورد مطالعه در دماهای مختلف در شکل 7 آورده شده است. شیب نمودار مقادیر عامل دما-زمان نسبت به معکوس دما (1000/T) در مراحل مختلف (شیشه‌ای، انتقال شیشه‌ای و رابری) متفاوت است. شیب نمودار با مقدار انرژی تولید شده توسط دما برای حرکت و چرخش ملکول‌های پلیمر متناسب است. با استفاده از رابطه 2 برای دماهای مرتبط با مرحله شیشه‌ای، مقدار انرژی فعال‌سازی 204 kJ/mol به‌دست می‌آید. این مقدار برای مرحله انتقال شیشه‌ای و مرحله رابری به ترتیب 494 و 648 kJ/mol می‌باشد. با استفاده از رابطه 2 و مقادیر انرژی فعال‌سازی محاسبه شده می‌توان عامل انتقال دما-زمان خواص مکانیکی کامپوزیت را برای هر دمایی در سه مرحله ذکر شده نسبت به دمای مرجع دلخواه به‌دست آورد.

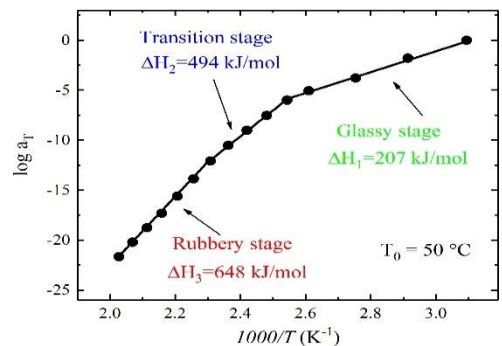


Fig. 7 Time-temperature shift factors of carbon/epoxy composite at reference temperature 50 °C

شکل 7 عامل انتقال دما-زمان کامپوزیت کربن-اپوکسی در دمای مرجع 50 °C

2-4 آزمون خمش

نمودارهای نیرو-جابجایی به‌دست آمده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای میله‌ی کامپوزیت هیبریدی در شکل 8 نشان داده شده‌اند. تمامی نمودارها در ابتدا رفتار خطی داشته و با افزایش دما، رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند و با

- نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اصل برهم‌نهی دما-زمان می‌تواند به شکل مناسبی برای مدل‌سازی خزشی کامپوزیت هیبریدی مورد مطالعه استفاده شود.
- عمر خزشی پیش‌بینی شده برای میله‌ی کامپوزیت هیبریدی مورد مطالعه در دمای متناظر با عبور جریان 1400 آمپر و تنش خمشی معادل با 20% استحکام خمشی در دمای محیط و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان 1.7 در حدود 4 سال است. با توجه به اینکه عمده سیکل‌های بارگذاری هادی‌ها در تنش‌های به مراتب پایین‌تری اتفاق می‌افتد نتایج به‌دست آمده، استحکام خزشی مناسب این نوع هادی‌ها در عمرهای طولانی را تایید می‌کند.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تشکر صمیمانه خود را از آقای دکتر فتح‌اله طاهری بهروز که با همکاری در برنامه آزمایشگاهی ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام می‌نمایند.

5- مراجع

- [1] Alawar, A., Bosze, E.J., Nutt, S.R., "A composite core conductor for low sag at high temperatures," IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 20, No. 3, pp. 2193-2199, 2005.
- [2] Jones, W. D., "More heat, less sag [power cable upgrades]," IEEE Spectrum, Vol. 43, No. 6, pp. 16-18, 2006.
- [3] Bosze, E.J., Alawar, A., Bertschger, O., Tsai, Y.I., Nutt, S.R., "High-temperature strength and storage modulus in unidirectional hybrid composites," Composites Science and Technology. Vol. 66, No. 13, pp.1963-1969, 2006.
- [4] Middleton, J., Hoffman, J., Burks, B., Predecki, P., and Kumosa, M., "Aging of a polymer core composite conductor: Mechanical properties and residual stresses". Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 69, pp. 159-67, 2015.
- [5] Middleton, J., Burks, B., Wells, T., Setters, A.M., Jasiuk, I., Kumosa, M., "The effect of ozone and high temperature on polymer degradation in polymer core composite conductors". Polymer Degradation and Stability, Vol. 98, pp. 2282-90, 2013.
- [6] Tsai, Y.I., Bosze, E.J., Barjasteh, E., Nutt, S.R., "Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites", Composites Science and Technology, Vol. 69, No. 3, pp. 432-437, 2009.
- [7] Zhao, G., Wang, J., Hao, W., Luo, Y., Guo, G., "Creep life evaluation of aluminum conductor composite core utilized in high voltage electric transmission," Polymer Testing, Vol. 63, pp. 573-581, 2017.
- [8] Khalili, S.M.R., Eslami Farsani, R., Dastmard, R., "Experimental investigation of creep behavior in phenolic based polymer composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 2, pp. 37-42, 2015.
- [9] Rafiee, R. and Mazhari, B., "Modeling creep in long fiber reinforced laminated composites using micromechanical rules," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 409-418, 2017.
- [10] Ahmadi I., and Ataei, N., "Micromechanical modeling for prediction of the creep behavior of fibrous composite materials," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 249-260, 2016.
- [11] Nakada, M., "Accelerated testing methodology for predicting long-term creep and fatigue in polymer matrix composites," Creep and fatigue in polymer matrix composites, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pp. 439-460, 2011.

نمودار مادر استحکام خزشی بی‌بعد شده نسبت به استحکام خمشی دمای محیط کامپوزیت هیبریدی در شکل 10 رسم شده است. با توجه به نمودار، اگر کامپوزیت مورد نظر در دمای 120°C تحت تنش خمشی معادل 20% استحکام خمشی در دمای محیط قرار گیرد، با در نظر گرفتن ضریب اطمینان 1.7 [9] پس از 4 سال دچار واماندگی خواهد شد. البته این تنش حدی معادل حداکثر باری است که تحت شرایط کاری عادی گهگاه ممکن است به وجود آید و در نتیجه عمر به‌دست آمده بسیار محتاطانه است. برای به‌دست آوردن عمر خزشی در تنش‌های پایین‌تر می‌توان بر روی نمودار مادر استحکام خزشی برون‌یابی انجام داد [11].

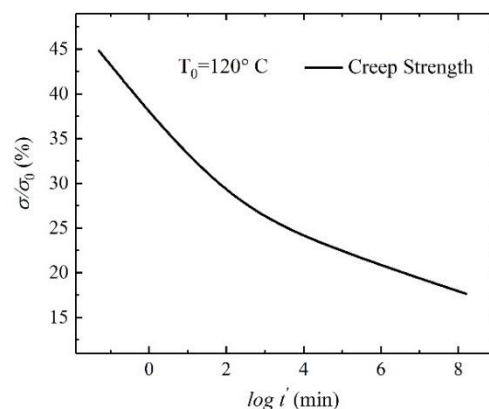


Fig. 10 Creep strength master curve of hybrid composite rod at reference temperature 120°C normalized to its flexural strength at room temperature

شکل 10 نمودار مادر استحکام خزشی میله‌ی کامپوزیت هیبریدی در دمای مرجع 120°C بی‌بعد شده نسبت به استحکام خمشی آن در دمای محیط

5- نتیجه‌گیری

استحکام خزشی کامپوزیت هیبریدی مورد استفاده در هادی‌های پرتزرفیت خطوط انتقال برق، با استفاده از روش‌های شتابدار موجود پیش‌بینی شد. به این منظور آنالیز دینامیکی-مکانیکی در فرکانس‌های بارگذاری متفاوت و آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای در چند دمای مختلف بر روی نمونه‌های کامپوزیتی انجام گردید. خلاصه نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

- آنالیز دینامیکی-مکانیکی کامپوزیت هیبریدی مورد مطالعه در دماهای بالا (دماهای بالاتر از دمای شیشه‌ای)، از لحاظ تغییرات مدول ذخیره و مدول اتلاف با تغییرات دما، رفتار نوعی کامپوزیت‌های پایه پلیمری را از خود نشان می‌دهد. همچنین افزایش فرکانس بارگذاری به صورت محسوسی موجب افزایش مدول ذخیره و انتقال دمای انتقال شیشه‌ای به دماهای بالاتر می‌شود. تاثیرات دما در بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بر روی مغزی کامپوزیت هیبریدی مورد استفاده در هادی‌های پرتزرفیت به شکل کاهش قابل ملاحظه در سفتی خمشی و نیز گسترش رفتار غیرخطی کامپوزیت بروز می‌کند.

- [12] Miyano, Y., Nakada, M., "Accelerated testing methodology for durability of CFRP," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 191, pp. 107977, 2020.
- [13] Zho, J., You, F., Su, L., Yang, Z., Chen, G., Guo, S., "Failure mechanism of time-temperature superposition for poly(vinyl chloride)/dicotylylphthalate(100/70) system," *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 124, pp. 452-458, 2011.
- [14] Leaderman, H., "Elastic and creep properties of filamentous materials and other high polymers," Washington, Dc: The Textile Foundation, 1943.
- [15] Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D., "The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids," *Journal of the American Chemical Society* , Vol. 77, pp. 3701-3707, 1955.
- [16] Naya, S., Meneses, A., Tarrio-Saavedra, J., Artiaga, R., Lopez-Beceiro, J., Gracia-Fernandez, C., "New method for estimating shift factors in time-temperature superposition models," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 113, pp. 453-460, 2013.
- [17] Pascault, J.P., Sautereau, H., Verdu, J., Williams, R., *Thermosetting Polymers*, New York, Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [18] Christensen, R., and Miyano, Y., "Stress intensity controlled kinetic crack growth and stress history dependent life prediction with statistical variability," *International Journal of Fracture*, Vol. 137, pp. 77-87, 2006.
- [19] *Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA: D 790-10, 2010.
- [20] *Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: determination and report of procedures*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA: D 4065-01, 2004.



مقایسه عددی و تحلیلی مدل‌های محاسبه طول ناحیه چسبناک در جدایش بین لایه‌های چندلایه‌های کامپوزیتی

علی اسمعیلی¹، فتح‌اله طاهری بهروز^{2*}

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

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

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، Taheri@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در دهه‌های اخیر، استفاده از مواد کامپوزیتی در سازه‌های مهندسی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. بنابراین درک ساختار و مکانیزم‌های آسیب در این مواد ضروری است. در میان آسیب‌های رایج مواد کامپوزیتی، آسیب تورق یا جدایش بین‌لایه‌ای از مودهای خطرناک آسیب است. مدل ناحیه چسبناک یکی از ابزارهای مناسب برای بررسی و تحلیل پدیده تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای است. مدل ناحیه چسبناک با ردیابی آسیب از شروع تا تکامل آن، به تحلیل تورق می‌پردازد. در مدل ناحیه چسبناک، ناحیه پشت نوک ترک که در آن نیروهای چسبیده فعال هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. این ناحیه به‌طور مستقیم تحت تاثیر مود بارگذاری، انرژی شکست، تنش بیشینه ناحیه چسبناک، مدول الاستیک موثر و هندسه سازه است. مدل‌های بسیاری برای تخمین طول ناحیه چسبناک پیشنهاد شده است. در این پژوهش طول ناحیه چسبناک در مود بارگذاری یک و دو خالص، با استفاده از تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس استخراج شد. این نتیجه‌ها با مدل‌های تحلیلی تخمین طول ناحیه چسبناک مقایسه شد. در مدل‌هایی که علاوه بر اثر نوع ماده، اثر هندسه سازه نیز در تخمین طول ناحیه چسبناک در نظر گرفته شد، تخمین دقیق‌تری از طول این ناحیه مشاهده شد.

دریافت: 1399/02/04

پذیرش: 1399/06/25

کلیدواژگان:

مدل ناحیه چسبناک

طول ناحیه چسبناک

جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌ها

Comparison of numerical and analytical cohesive zone length models in the delamination of composite laminates

Ali Esmaili, Fathollah Taheri-Behrooz*

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

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, Taheri@iust.ac.ir

Keywords

Cohesive Zone Model
Cohesive Zone Length
Delamination in Composites

Abstract

In recent decades, the use of composite materials in engineering structures has increased dramatically. Therefore, it is necessary to understand the structure and mechanisms of damage to these materials. Among the most common damages in composite materials, delamination is one of the catastrophic failure modes. Cohesive zone model is one of the appropriate tools for analyzing the phenomenon of delamination in the laminated composites. The cohesive zone model analyzes the delamination by tracking the damage from its onset to its evolution. In the cohesive zone model, the area behind the crack tip, where the cohesive forces are active, is of great importance. This zone is directly affected by loading mode, fracture energy and cohesive strength, active elastic modulus, and structural geometry. Many models have been proposed to estimate the length of the cohesive zone. In this study, the length of the cohesive zone in first and second pure mode was obtained by using finite element analysis in Abaqus software. The results of the simulation were compared with the analytical models for estimating the length of the cohesive zone. It was observed a more accurate estimate of the cohesive zone length in models that consider the material type and effect of structural geometry.

1- مقدمه

جدایش بین لایه‌ای جزو مودهای آسیب خطرناک در نظر گرفته می‌شود. زیرا در این حالت چند لایه کامپوزیتی قادر به انتقال تنش بین لایه‌های مختلف نیست. آسیب جدایش بین لایه‌ای در بارگذاری فشاری باعث افزایش احتمال پدیده کماتش در سازه می‌شود. یکی از دلایل تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای استحکام ضعیف بین لایه‌های کامپوزیت است. در پژوهشی که توسط پاگانو¹ و شاپنر¹ انجام شده است دلایل ایجاد تورق را به سه دسته اصلی

با گسترش استفاده از مواد کامپوزیتی در عصر حاضر، لزوم شناخت رفتار مکانیکی این مواد حائز اهمیت است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این مواد می‌توان به نسبت استحکام به وزن بالاتر نسبت به فلزها اشاره کرد. مودهای آسیب در سازه‌های کامپوزیتی نسبت به فلزات بیش‌تر و دارای مکانیزم پیچیده‌تری هستند. از جمله مودهای رایج آسیب در سازه‌های کامپوزیتی می‌توان به ترک در زمینه، شکست الیاف، کماتش الیاف و جدایش بین لایه‌ای اشاره کرد.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Esmaili, A. and Taheri-Behrooz, F., "Comparison of numerical and analytical cohesive zone length models in the delamination of composite laminates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1235-1242, 2021.

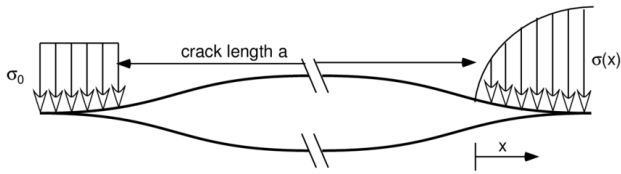


Fig. 1 Barenblatt (right) and Dugdale (left) models [8]

شکل 1 مدل برنبلات (سمت راست) و مدل داگدایل (سمت چپ) [8]

1-2- مدل ناحیه چسبناک

در بین مدل‌های ارائه شده مدل ناحیه چسبناک⁷ دوخطی به دلیل سادگی و دقت در شبیه‌سازی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل 2 مدل ناحیه چسبناک دو خطی نشان داده شده است. پارامترهای مهم در مدل ناحیه چسبناک، انرژی شکست، استحکام ناحیه چسبناک و سفتی جبرانی هستند. سفتی جبرانی شیب قسمت الاستیک منحنی کشش - جدایش را مشخص می‌کند. رفتار فیزیکی و عددی مدل ناحیه چسبناک به صورت شکل 2 است. در مدل عددی یک سفتی اولیه برای غلبه بر مشکلات حل عددی در نظر گرفته می‌شود. این پارامتر نشان دهنده سفتی نمونه قبل از جدایش است.

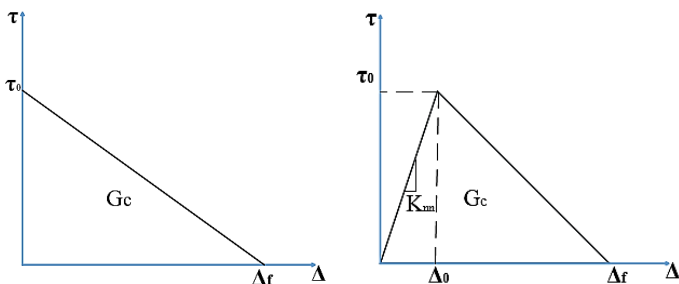


Fig. 2 Physical (Left) and numerical (Right) cohesive zone model [9]

شکل 2 مدل فیزیکی (سمت چپ) و مدل عددی (سمت راست) ناحیه چسبناک [9]

بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در حوزه کاربرد مدل ناحیه چسبناک برای شبیه‌سازی جدایش بین‌لایه‌ای از مقدار 10^6 N/mm^3 که توسط کامانها⁸ [10] ارائه شده است استفاده کرده‌اند. با این حال، رابطه‌ها (1) تا (6) برای محاسبه سفتی بین‌لایه‌ای پیشنهاد شده است [9].

$$K_{nm} = \frac{50E'_i}{h} \quad (1)$$

$$K_{sn} = \frac{50E'_{II}}{h} \quad (2)$$

$$E'_i = E_1 \lambda^{0.75} \sqrt{\frac{2}{1+\rho}} \quad (3)$$

تقسیم کرده‌اند. گروه اول شامل تورق در مقاطع منحنی، مقاطع دایروی مثل لوله‌ها و مقاطع کروی می‌شوند. در موارد ذکر شده تنش‌های عمودی و برشی بین وجهی دو لایه چسبیده موجب کاهش چسبندگی و شروع ترک بین‌لایه‌ای می‌شوند. در گروه دوم، تغییر ناگهانی در مقطع، اثر لبه آزاد و اتصالات پیچی جای می‌گیرند. در گروه سوم می‌توان به اثر دما و رطوبت محیط اشاره کرد. از دیگر عوامل تورق می‌توان به ضربه سرعت پایین اشاره کرد. تفاوت ضریب انبساط حرارتی رزین و الیاف در هنگام پخت کامپوزیت نیز می‌تواند عامل ایجاد تنش پسماند و در نتیجه جدایش لایه‌ها در هنگام سرویس‌دهی سازه باشد. با توجه به موارد ذکر شده شناخت و مدل‌سازی پدیده جدایش بین‌لایه‌ای اهمیت فراوانی دارد. برای مدل‌سازی این پدیده به طور معمول از دو رویکرد مکانیک شکست و مدل ناحیه چسبناک استفاده می‌شود. در بررسی ترک نیاز است که حالت‌های مختلف بارگذاری برای تغییر شکل نسبی سطح‌های ترک فرض شود که به این حالت‌ها در اصطلاح موده‌های شکست می‌گویند. در مکانیک شکست سه نوع مود شکست وجود دارد. مود اول یا مود بازشدگی سطوح ترک که رایج‌ترین مود رشد ترک است. در این مود سطح‌های ترک در جهت مخالف یک‌دیگر از هم دور می‌شوند. مود برش داخل صفحه‌ای که به مود دوم شکست نیز معروف است. در این حالت دو سطح ترک نسبت به هم و موازی با جبهه ترک دچار لغزش می‌شوند. مود سوم یا برش خارج از صفحه نیز نشان‌دهنده لغزش سطح‌های ترک نسبت به هم و عمود بر جبهه ترک است رویکرد مکانیک شکست، با توجه به تکینگی تنش در نوک ترک دارای پیچیدگی‌های بیش‌تری نسبت به مدل ناحیه چسبناک است. هم‌چنین در تحلیل‌های عددی استفاده از رویکرد مکانیک شکست سبب هزینه تحلیل بالاتر می‌شود. در مقابل مدل ناحیه چسبناک عیب تکینگی تنش را رفع کرده و هم‌چنین در این مدل برخلاف مدل‌های مکانیک شکست، نیاز به ترک اولیه نیست. در مواد همسان‌گرد به‌طور معمول از مفهوم ضریب شدت تنش برای بیان چقرمگی و مقاومت ماده نسبت به رشد ترک استفاده می‌شود. با توجه به این موضوع که ضریب شدت تنش بسیار وابسته به توزیع تنش در نوک ترک است و محاسبه تنش در نوک ترک در مواد کامپوزیتی دارای پیچیدگی است، استفاده از نرخ رهاسازی انرژی کرنشی در مواد کامپوزیتی مفیدتر است و نتایج بهتری ارائه می‌دهد [1]. داگدایل² [2] و برنبلات³ [3] پیشگامان توسعه و استفاده از مدل ناحیه چسبناک بودند. داگدایل برای مواد پلاستیک ایده آل این مفهوم را با فرض وجود تنش ثابت در نوک ترک توسعه داد. برنبلات فرض تنش ثابت داگدایل را در طول ناحیه چسبیده تصحیح کرد و مدل ناحیه چسبناک که امروزه استفاده می‌شود را توسعه داد. برنبلات فرض کرد که تنش در ناحیه چسبیده ثابت نیست بلکه با دور شدن از نوک ترک، تنش به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. در شکل 1 مدل برنبلات و داگدایل نشان داده شده است. پس از برنبلات و داگدایل محققین بسیاری به پژوهش در این حوزه پرداختند. از جمله مهم‌ترین پژوهش‌ها مربوط به نیدلمن⁴ [4] است که از این مدل با استفاده از روش اجزای محدود بهره برد. در ادامه پژوهشگرانی مانند تورگارد⁵ [5] و گوبل⁶ [6] از مدل‌های مختلف برای بیان رابطه کشش - جدایش استفاده کردند.

1 Schoeppner
2 Dugdale
3 Barenblatt
4 Needleman
5 Tvegaard
6 Geubelle

7 Cohesive zone model
8 Camanho

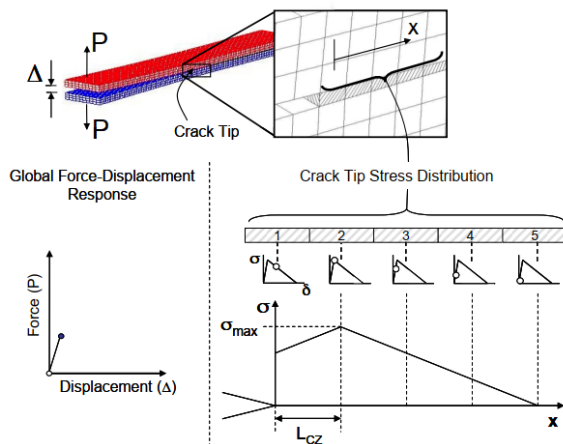


Fig. 3 Cohesive zone length [11]

شکل 3 طول ناحیه چسبناک [11]

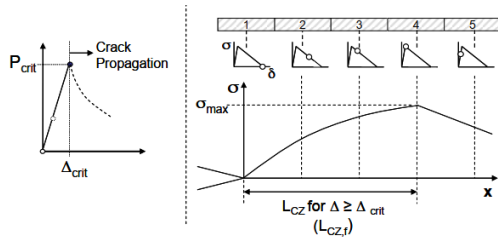


Fig. 4 Extended cohesive zone length [11]

شکل 4 طول ناحیه چسبناک توسعه یافته [11]

با توجه به این که تمام مکانیزم رشد و تکامل آسیب در این ناحیه رخ می‌دهد، ناحیه چسبناک مهم‌ترین ناحیه در پشت ترک است. برای محاسبه تقریبی این مقدار مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است. تمامی مدل‌های ارائه شده به شکل رابطه (7) هستند.

$$L_{cz} = M \frac{EG_c}{\tau_0} \quad (7)$$

در این رابطه G_c انرژی شکست، E مدول یانگ موثر و τ_0 مقدار استحکام ناحیه چسبناک را نشان می‌دهد که در مود یک، استحکام عمودی ناحیه چسبناک بوده و در مود دو، استحکام برشی ناحیه چسبناک است. تفاوت مدل‌های پیشنهاد شده در ضریب بی‌بعد M است. هیلبرگ⁴ [13] به‌عنوان فردی پیشگام در زمینه استفاده از مدل ناحیه چسبناک به روش اجزای محدود رابطه (8) را پیشنهاد داد که بعدها توسط یانگ⁵ [14] طول مشخصه نامیده شد. در این رابطه E مدول یانگ موثر برای مواد ارتوتروپیک است که توسط سیه⁶ [15] پیشنهاد شده است. در جدول 1 مدل‌های مختلف پیشنهادی را که شامل روابط (9) تا (13) هستند، نشان داده شده است.

$$L_{ch} = \frac{EG_c}{\tau_0^2} \quad (8)$$

$$E'_{II} = E_2 \lambda^{0.25} \sqrt{\frac{2}{1+\rho}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\sqrt{E_1 E_2}}{2G_{12}} - \sqrt{v_{12} v_{21}} \quad (6)$$

که در روابط ذکر شده G_{12} مدول برشی داخل صفحه تک‌لایه، E_1 مدول یانگ در جهت الیاف، E_2 مدول یانگ در جهت عمود بر الیاف، E'_{II} مدول یانگ موثر برای مود اول بارگذاری، E'_{II} مدول یانگ موثر برای مود دوم بارگذاری است. λ و ρ پارامترهای بی‌بعدی هستند که نشان‌دهنده درجه ارتوتروپی مواد هستند. h ضخامت بازوی نمونه و K_{sn} و K_{nn} به ترتیب بیان‌گر سفتی عمودی و برشی بین لایه‌ای هستند. تنش بیشینه ناحیه چسبناک نشان‌دهنده مقدار تنش است که آسیب شروع می‌شود. هارپر¹ و هلت² [11] اثر استحکام ناحیه چسبناک را بر روی نمودار نیرو-جابجایی در نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار (DCB) بررسی کردند. با اندازه المان 0.125 میلی‌متر مشاهده شد که از استحکام 45 تا 30 مگاپاسکال نتایج عددی با نتایج تحلیلی مطابقت خوبی دارد. با کاهش استحکام از 30 مگاپاسکال تا 10 مگاپاسکال سفتی به‌صورت تدریجی کم می‌شود ولی تاثیر زیادی در دقت نتایج در ناحیه گسترش آسیب ندارد. با کاهش استحکام از 10 مگاپاسکال تا 5 مگاپاسکال مقدار سفتی بیش‌تر افت می‌کند و شروع آسیب نسبت به حالت تحلیلی تاخیر دارد. تحلیل قبلی با اندازه المان 1 میلی‌متر نیز انجام شد. در این حالت افت سفتی با کاهش استحکام بیش‌تر شده و نقطه شروع آسیب با حالت تحلیلی اختلاف بیش‌تری پیدا می‌کند. انرژی شکست در مدل ناحیه چسبناک از تست‌های رایج مکانیک شکست به‌دست می‌آید. مهم‌ترین پارامتر انرژی در مدل ناحیه چسبناک انرژی شکست است. پس از شروع آسیب در موده‌های خالص از مقایسه نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی و انرژی شکست، تکامل آسیب بررسی می‌شود. در موده‌های بارگذاری ترکیبی از مقدار انرژی شکست معادل برای بررسی تکامل آسیب استفاده می‌شود. رایج‌ترین مدل محاسبه انرژی شکست در مود ترکیبی مدل بنزگاق و کنان³ [12] است.

1-2- طول ناحیه چسبناک

به ناحیه ایجاد شده در پشت نوک ترک که پارامتر آسیب به مقدار بیشینه خود نرسیده است طول ناحیه چسبناک⁴ می‌گویند. یعنی پارامتر آسیب مقداری بین 0 تا 1 خواهد داشت. در شکل 3 طول ناحیه چسبناک در یک نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار نشان داده شده است. هنگامی که اولین المان در نوک ترک به‌طور کامل تخریب می‌شود و استحکام و سفتی آن به صفر می‌رسد، ناحیه‌ای پشت این المان ایجاد می‌شود که شامل المان‌هایی با پارامتر آسیب بین صفر و یک است. به طول این ناحیه، طول ناحیه چسبناک توسعه یافته می‌گویند. در شکل 4 طول ناحیه چسبناک توسعه یافته نشان داده شده است

1 Harper
2 Hallet
3 B-K

4 Hillerborg
5 Yang
6 Sih

بررسی های عددی [23,11] نشان داد که در بسیاری از نمونه‌ها، رابطه‌های (14) و (15) نمی‌توانند پیش‌بینی مناسبی از طول ناحیه چسبناک داشته باشند. بنابراین سوتو و همکاران رابطه (16) را برای محدوده وسیعی از ضخامت‌ها و طول مشخصه‌های مختلف ارائه دادند. این رابطه یک تابع تقریبی بر مبنای درون‌یابی بین حد طول ناحیه چسبناک قطعه با ابعاد بی‌نهایت و قطعه نازک است.

$$l_{czI} = (l_{czI}^0)^{-n_I} + l_{czI}^\infty)^{-1/n_I} \quad (16)$$

بر همین مینا، رابطه (17) برای بارگذاری مود دو خالص پیشنهاد شده است. در روابط (16) و (17)، n_I و n_{II} پارامترهای بی‌بعد هستند که از برازش منحنی محاسبه می‌شوند.

$$l_{czII} = (l_{czII}^0)^{-n_{II}} + l_{czII}^\infty)^{-1/n_{II}} \quad (17)$$

برای مود یک بارگذاری، سوتو و همکاران با تحلیل عددی 75 نمونه تیر دولبه یک‌سرگیردار و استفاده از مدل ناحیه چسبناک دوخطی، نقاطی روی نموداری بر حسب پارامترهای بی‌بعد شده l_{chl}^0 و l_{chl}^∞ استخراج کردند. این نمونه‌ها در گستره وسیعی از درجه ارتوتروپیک (ρ) و ضخامت‌های مختلف شبیه‌سازی شده‌اند. نمودار شکل 5 نقاط استخراج شده از هر تحلیل را نشان می‌دهد. با استفاده از برازش منحنی بر نقاط استخراج شده از تحلیل عددی، رابطه (18) به‌دست آمده است. این رابطه علاوه بر اثرات ماده، اثر هندسه نمونه را نیز در نظر گرفته است.

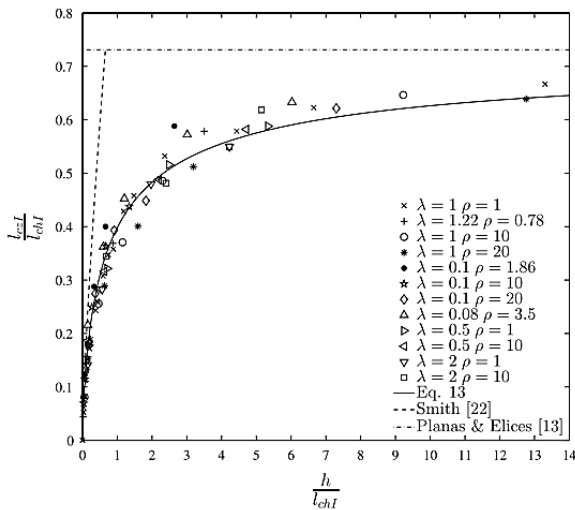


Fig. 5 Chart of extracted point from numerical analysis for mode I [16]

شکل 5 نمودار نقاط استخراج شده از تحلیل عددی برای مود یک [16]

$$\frac{l_{czI}^0}{l_{chl}} = \left(\left(\frac{h}{l_{chl}} \right)^{0.75} \right)^{-0.9204} + 0.731^{-0.9204} \frac{-1}{0.9204} \quad (18)$$

برای مود دوم بارگذاری نیز با تحلیل عددی 75 نمونه خمشی چهار نقطه‌ای با ترک انتهایی و استفاده از مدل ناحیه چسبناک دوخطی، مقدار طول ناحیه چسبناک را برای هر نمونه استخراج کردند. برای بی‌بعد سازی از نسبت $\frac{l_{czII}}{l_{chl}}$

در هیچ‌یک مدل‌های ارائه شده در جدول 1 اثر هندسه سازه در تخمین طول ناحیه چسبناک در نظر گرفته نشده است.

جدول 1 مدل‌های مختلف طول ناحیه چسبناک
Table 1 Different models of cohesive zone length

نام مدل	طول ناحیه چسبناک	
هیلبرورگ [13]	$L_{cz} = \left(\frac{EG_c}{\tau_0^2} \right)$	(9)
اروین [20]	$L_{cz} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{EG_c}{\tau_0^2} \right)$	(10)
داگدایل [2]، برنبلات [21]	$L_{cz} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{EG_c}{\tau_0^2} \right)$	(11)
رایس [22]	$L_{cz} = \frac{9\pi}{32} \left(\frac{EG_c}{\tau_0^2} \right)$	(12)
بانو [19]	$L_{cz} = 0.732 \left(\frac{EG_c}{\tau_0^2} \right)$	(13)

در مدلی که توسط سوتو^۲ و همکاران [16] ارائه شده است نقص مدل‌های پیشین برطرف شده و دقت پیش‌بینی طول ناحیه چسبناک افزایش یافته است. در این مدل یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی طول ناحیه چسبناک در مواد ارتوتروپیک همگن پیشنهاد شده است. حد بالایی و پایینی طول ناحیه چسبناک برای نمونه با ابعاد بی‌نهایت و نمونه نازک است. مدل‌های ارائه شده در جدول 1 برای قطعه با ابعاد بی‌نهایت است. برای قطعات نازک مثل نمونه تیر دولبه یک‌سرگیردار که طول ناحیه چسبناک با ضخامت بازوی نمونه قابل مقایسه است و گاهی بیش‌تر است، اسمیت^۴ [17] با استفاده از تئوری تیر اویلر-برنولی و در نظر گرفتن یک ترک اولیه با طول زیاد نسبت به ضخامت نمونه، رابطه (14) را برای محاسبه طول ناحیه چسبناک در مود یک خالص پیشنهاد داد.

$$l_{cz}^0 = (M_I^0 l_{chl})^{0.25} h^{0.75} \quad (14)$$

در رابطه (14)، l_{chl} ، طول مشخصه، h ، ضخامت قطعه و M_I^0 یک ضریب بی‌بعد است. اسمیت برای مدل چسبناک با نرم شوندگی ثابت و نرم شوندگی خطی مقدار M_I^0 را به ترتیب 0.33 و 1 در نظر گرفت.

برای محاسبه طول ناحیه چسبناک در نمونه‌های نازک و بارگذاری مود دو خالص، ماسابو^۵ و کاکس^۶ [18] رابطه (15) را پیشنهاد دادند.

$$l_{cz}^0 = (M_{II}^0 l_{chl} h)^{0.5} \quad (15)$$

ماسابو و کاکس مقدار M_{II}^0 برای قانون چسبناک با نرم شوندگی ثابت را 0.5 در نظر گرفتند. بانو [19] برای قانون چسبناک با نرم شوندگی ثابت مقدار 0.33 را برای M_{II}^0 پیشنهاد داد. اسمیت [17] مقدار M_{II}^0 را برای قانون چسبناک با نرم‌شوندگی خطی 1 در نظر گرفت.

1 Rice
2 Bao
3 Soto
4 Smith
5 Maassabo
6 Cox

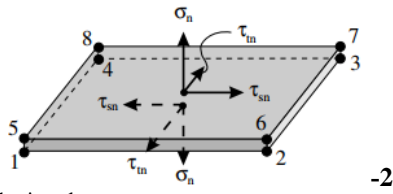


Fig. 7 Cohesive element

شکل 7 المان چسبناک [24]

1-3-1 معیارهای شروع آسیب در ناحیه چسبیده

رفتار الاستیک در المان چسبناک به صورت رابطه (21) تعریف می‌شود.

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{sn} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{tn} & k_{ts} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{bmatrix} \quad (21)$$

که در این رابطه t ماتریس بردار تنش اسمی بوده که مؤلفه t_n در جهت نرمال و دو مؤلفه t_s و t_t در جهت برشی می‌باشند. ماتریس k ماتریس الاستیک و ε ماتریس کرنش‌ها است که مؤلفه‌های این ماتریس به صورت رابطه (22) محاسبه می‌شوند. در این رابطه δ مقدار جابجایی و T_0 ضخامت لایه چسب است. برای تعیین شروع آسیب دومعیار بر اساس تنش و دومعیار بر اساس کرنش در المان چسبناک وجود دارد.

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}, \quad \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0}, \quad \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0} \quad (22)$$

1-3-1-1 معیار تنش اسمی بیشینه

در این معیار، آسیب زمانی شروع می‌شود، که مقدار تنش بین لایه‌ای به مقدار بیشینه تنش ناحیه چسبناک رسیده باشد. رابطه (23) معیار تنش اسمی بیشینه را نشان می‌دهد. در این رابطه پارامترهای با بالانویس صفر نشان دهنده استحکام ناحیه چسبناک هستند.

$$\text{Max} \left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \cdot \frac{t_s}{t_s^0} \cdot \frac{t_t}{t_t^0} = 1 \right\} \quad (23)$$

1-3-2 معیار کرنش اسمی بیشینه

در این معیار، شروع آسیب با استفاده از مقدار کرنش در المان بین لایه‌ای، مشخص می‌شود. هنگامی که نسبت مقدار بیشینه کرنش در المان بین لایه‌ای به مقدار کرنش اسمی، به عدد یک برسد، آسیب شروع خواهد شد که در رابطه (24) مشخص شده است. در این رابطه پارامترهای با بالانویس صفر نشان دهنده کرنش اسمی هستند.

$$\text{Max} \left\{ \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n^0} \cdot \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \cdot \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} = 1 \right\} \quad (24)$$

و $\frac{h\lambda^{0.25}\sqrt{1+\rho}}{\lambda^{0.25}l_{chII}}$ به عنوان پارامترهای بی بعد برای رسم نمودار استفاده شده است. نمودار شکل 6 نقاط استخراج شده از هر تحلیل را برای مود دوم بارگذاری نشان می‌دهد. با استفاده از برازش منحنی بر نقاط استخراج شده از تحلیل عددی، رابطه (19) به دست آمده است. این رابطه نیز علاوه بر اثرات ماده، اثر هندسه نمونه را در نظر گرفته است.

$$\frac{l_{czII}}{l_{chII}} = \left(\left(\frac{h}{l_{chII}} \sqrt{\frac{1+\rho}{2\lambda}} \right)^{-1.1587} + \left(\frac{9\pi}{32} \right)^{-1.1587} \right)^{-\frac{1}{1.1587}} \quad (19)$$

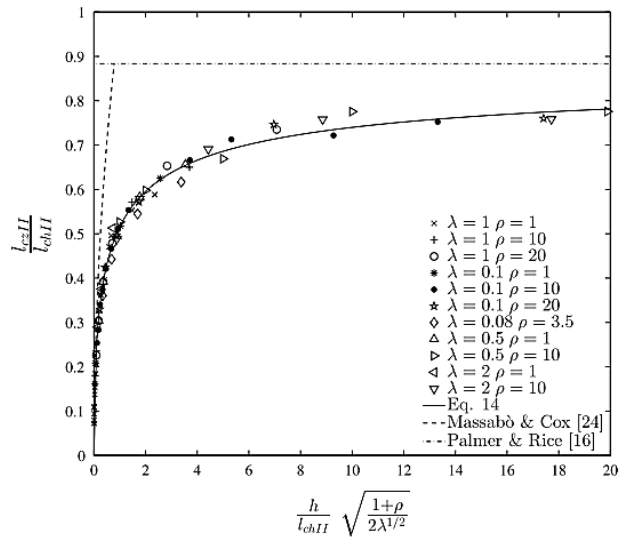


Fig. 6 Chart of extracted point from numerical analysis for mode II [16]

شکل 6 نمودار نقاط استخراج شده از تحلیل عددی برای مود دو [16]

تعداد المان‌های استفاده شده در ناحیه چسبناک بسیار مهم است. حداقل تعداد المان مورد نیاز برای این ناحیه 3 المان است که توسط تورو [9] پیشنهاد شده است.

برای محاسبه حداکثر طول المان در این ناحیه می‌توان از رابطه (20) استفاده کرد. یعنی اگر مش بندی ساختار به اندازه L_e باشد از وجود 3 المان در ناحیه چسبناک اطمینان حاصل می‌شود.

$$L_e = \frac{L_{cz}}{3} \quad (20)$$

3- ساختار المان چسبناک

المان چسبناک نشان داده شده در شکل 7 دارای 8 گره است. در این نوع المان فقط تنش‌هایی که موجب جدایش بین دو لایه می‌شوند محاسبه می‌شوند، یعنی یک تنش عمودی در جهت ضخامت و دو تنش برشی خارج از صفحه. مقدار ضخامت این المان بسیار محدود و کوچک است و باید در حدی انتخاب شود که گشتاور خمشی ناشی از عدم هم‌مرکزی نیروهای گرهی صفر شود [24].

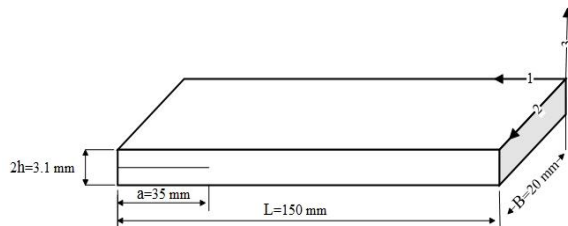


Fig. 9 Geometry of DCB model

شکل 9 هندسه نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار

در شبیه‌سازی نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار تعداد 7950 المان کرنش صفحه‌ای چهار گره‌ای استفاده شده است. در شبیه‌سازی نمونه خمشی چهار نقطه‌ای نیز از 7956 المان کرنش صفحه‌ای چهار گره‌ای استفاده شده است. خواص مکانیکی کامپوزیت و خواص بین لایه‌ای المان چسبانک در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی کامپوزیت کربن/اپوکسی [7]

Table 2 Mechanical properties of carbon/epoxy composite [7]			
E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{12} (GPa)	ν_{12}
120	10.5	5.25	0.3
G_{Ic} (Kj/m ²)	σ_{nm} (MPa)	σ_{sn} (MPa)	$K_{nn} = K_{sn}$ (N/mm ³)
0.26	30	60	1000000

شرایط مرزی و بارگذاری روی نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار در شکل 10 نشان داده شده است. بارگذاری در هر دو نمونه به صورت جابه‌جایی-کنترل اعمال شده است. در شکل 11 وضعیت شرایط مرزی و بارگذاری نمونه خمشی چهار نقطه‌ای نشان داده شده است.

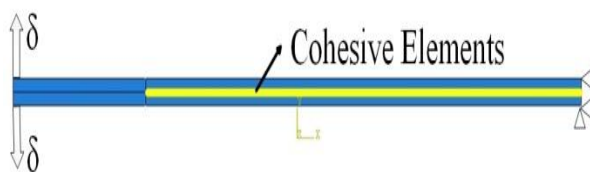


Fig. 10 Loading and boundary condition of DCB sample

شکل 10 شرایط مرزی و بارگذاری نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار

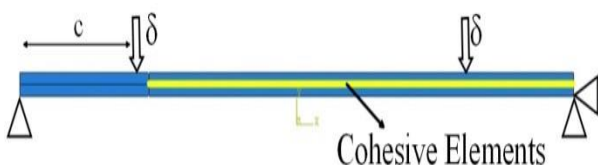


Fig. 11 Loading and boundary condition of 4ENF sample

شکل 11 شرایط مرزی و بارگذاری نمونه خمشی چهار نقطه‌ای

3-1-3- معیار تنش اسمی درجه دوم

در این معیار اثر تنش‌ها بر یکدیگر در نظر گرفته شده است. در این معیار آسیب زمانی آغاز می‌شود که رابطه (25) برقرار شود.

$$\left\{\frac{t_n}{t_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_s}{t_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_t}{t_t^0}\right\}^2 = 1 \quad (25)$$

4-1-3- معیار کرنش اسمی درجه دوم

این معیار نیز بر هم‌کنش کرنش‌ها را در نظر گرفته است. رابطه‌ی (26) معیار آغاز جدایش را نشان می‌دهد.

$$\left\{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0}\right\}^2 = 1 \quad (26)$$

4- تحلیل عددی

به منظور تحلیل عددی جدایی بین لایه‌ای در مود یک و دو از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. برای ساده‌سازی و کاهش حجم محاسبات، تحلیل دوبعدی در حالت کرنش صفحه‌ای انجام شده است. در ناحیه اتصال دو لایه از المان‌های چسبانک استفاده شده است. به منظور بررسی حساسیت نتایج به اندازه المان چسبانک، نیروی شروع آسیب با مقدار 52 نیوتن حاصل از حل تحلیلی، به عنوان مینا در نظر گرفته شد. در شکل 8 نمودار تغییرات مقدار نیروی شروع آسیب با تغییرات اندازه المان نمایش داده شده است. مشاهده شد که در اندازه المان 0.1 میلی‌متر نتایج از اندازه المان مستقل شده و به جواب تحلیلی هم‌گرا می‌شود.

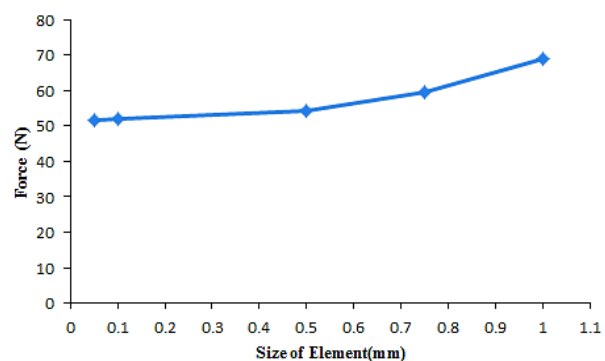


Fig. 8 Mesh sensitivity of numerical results

شکل 8 حساسیت نتایج عددی به اندازه المان

در شکل 9 مشخصات هندسه نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار برای شبیه‌سازی مود یک بارگذاری نشان داده شده است. مشخصات هندسی نمونه خمشی چهار نقطه‌ای نیز مانند نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار است.

رابطه پیشنهاد شده توسط سوتو و همکاران مقدار طول ناحیه چسبناک را برای نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار ذکر شده 1.18 میلی‌متر پیش‌بینی می‌کند. این رابطه خطای بسیار کمی در مقایسه با مدل‌های دیگر دارد. همچنین در مدل خمشی چهار نقطه‌ای با استفاده از تحلیل عددی مقدار طول ناحیه چسبناک برای مود دوم بارگذاری 4.7 میلی‌متر استخراج شد و رابطه پیشنهادی سوتو و همکاران برای این نمونه، طول ناحیه چسبناک را 4.81 میلی‌متر پیش‌بینی کرد. در مود دوم بارگذاری نیز رابطه سوتو و همکاران از دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است. در جدول 4 مقادیر طول ناحیه چسبناک در مدل‌های مختلف برای مود دوم بارگذاری نشان داده شده است.

جدول 4 مقایسه مقادیر طول ناحیه چسبناک در مدل‌های مختلف مود دو

Table 4 Comparison of CZL models in mode II

نام مدل	L_{czII} (mm)
بانو	4.36
اسمیت	13.21
ماسابو و کاکس	3.2
سوتو	4.7

6- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عددی و تحلیلی طول ناحیه چسبناک در مودهای اول و دوم بارگذاری در کامپوزیت‌های لایه‌ای پرداخته شد. برای شبیه‌سازی مود یک بارگذاری، از نمونه استاندارد تیر دولبه یک‌سرگردار و برای مود دو بارگذاری، از نمونه استاندارد خمشی چهار نقطه‌ای استفاده شد. مدل‌های تحلیلی پیش‌بینی طول ناحیه چسبناک بررسی شد و دقت رابطه‌های پیشنهادی با یکدیگر مقایسه شدند. مشخص شد که مدل‌هایی که علاوه بر اثرات مادی، اثر هندسه را نیز در نظر می‌گیرند دقت قابل توجه‌تری نسبت به مدل‌هایی که فقط اثر جنس ماده را در نظر می‌گیرند، دارند. با مقایسه نتایج تحلیلی مدل‌های مختلف با نتایج تحلیل عددی مشخص شد که نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی سوتو و همکاران پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

7- فهرست علائم

E	مدول یانگ موثر (Pa)
G_c	انرژی شکست
h	ضخامت بازو
L_{czI}	طول ناحیه چسبناک مود یک (m)
L_{czII}	طول ناحیه چسبناک مود دو (m)
L_{czI}^0	طول ناحیه چسبناک مود یک در نمونه نازک (m)
L_{czI}^∞	طول ناحیه چسبناک مود یک در نمونه با عرض بی‌نهایت
L_{chI}	طول مشخصه مود یک
L_{chII}	طول مشخصه مود دو
L_e	طول المان چسبناک
K_{nm}	سفتی عمودی المان چسبناک
K_{sh}	سفتی برشی المان چسبناک
Δ_0	مقدار جابجایی در شروع آسیب
Δ_r	مقدار جابجایی در لحظه جدایش

در شکل 12 نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار پس از بارگذاری نشان داده شده است. تعداد المان‌های پشت نوک ترک که مقدار پارامتر آسیب در آن‌ها بین صفر و یک هستند، طول ناحیه چسبناک را مشخص می‌کنند که در شکل 12 اندازه مجموع این المان‌ها اندازه‌گذاری شده است. در شکل 13 نیز نمونه خمشی چهار نقطه‌ای پس از بارگذاری نمایش داده شده است.

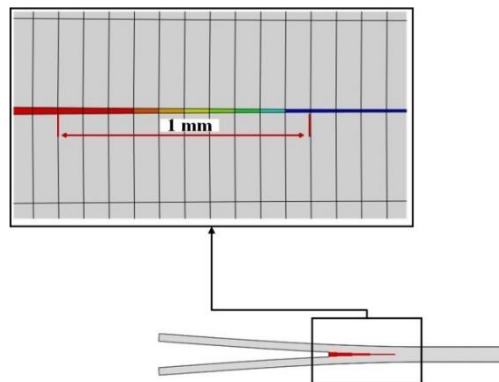


Fig. 12 DCB sample after loading in abaqus

شکل 12 نمونه تیر دولبه یک‌سرگردار در نرم افزار آباکوس پس از بارگذاری

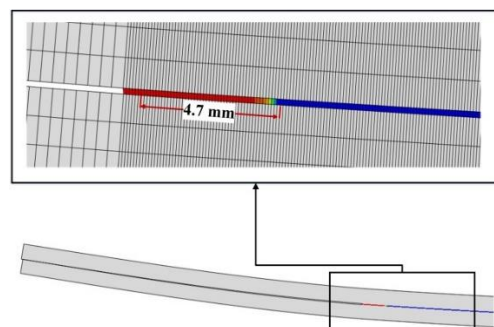


Fig. 13 4ENF sample after loading in abaqus

شکل 13 نمونه خمشی چهار نقطه‌ای در نرم‌افزار آباکوس پس از بارگذاری

5- مقایسه نتایج عددی و تحلیلی

طول ناحیه چسبناک عددی در مدل تیر دولبه یک‌سرگردار 1.1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. جدول 3 مقادیر طول ناحیه چسبناک محاسبه شده توسط مدل‌های مختلف را برای مود یک بارگذاری نشان می‌دهد.

جدول 3 مقایسه مقادیر طول ناحیه چسبناک در مدل‌های مختلف مود یک

Table 3 Comparison of CZL models in mode I

نام مدل	L_{czI} (mm)
بانو	3.31
اروین	1.44
رایس	3.99
هیلمبورگ	4.52
داگدایل	1.77
سوتو	1.18
اسمیت	2.02

ضریب بی‌بعد	M
ضریب بی‌بعد	M_I^0
ضریب بی‌بعد	M_I^∞
ضریب بی‌بعد	M_{II}^0
ضریب بی‌بعد	M_{II}^∞
ضریب بی‌بعد	n_I
ضریب بی‌بعد	n_{II}
	علائم یونانی
ضریب بی‌بعد	ρ
ضریب بی‌بعد	λ
استحکام شروع آسیب	τ_0

5- مراجع

- [1] Pagano N. J. and Schoeppner, G. a “Delamination of Polymer Matrix Composites : Problems and Assessment,” *Compr. Compos. Mater.*, 2000, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00073-5>.
- [2] Dugdale, D. S. “Yielding of steel sheets containing slits,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 8, no. 2, pp. 100–104, 1960, doi: 10.1016/0022-5096(60)90013-2.
- [3] Barenblatt, G. I. “Self-similarity: Dimensional analysis, and intermediate asymptotics,” *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 44, no. 2, pp. 267–272, 1980, doi: 10.1016/0021-8928(80)90161-6.
- [4] Needleman, A. “Numerical modeling of crack growth under dynamic loading conditions,” *Comput. Mech.*, vol. 19, no. 6, pp. 463–469, 1997, doi: 10.1007/s004660050194.
- [5] Tvergaard, V. and Hutchinson, J. W. “The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 40, no. 6, pp. 1377–1397, 1992, doi: 10.1016/0022-5096(92)90020-3.
- [6] Geubelle, P. H. and Baylor, J. S. “Impact-induced delamination of composites: a 2D simulation,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 29, no. 5, pp. 589–602, 1998, doi: 10.1016/S1359-8368(98)00013-4.
- [7] Turon Travesa, A. Costa, J. P. M. P. R. de, Balanzat, C. Camanho, and Girona, d. Departament d’Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial., *Simulation of delamination in composites under quasi-static and fatigue loading using cohesive zone models*. Universitat de Girona, 2007.
- [8] Ingo, S., “Cohesive model for crack propagation analyses of structures with elastic–plastic material behavior Foundations and implementation,” GKSS research center Geesthach, Dept. WMS, 2001.
- [9] Turon, A. Dávila, C. G. Camanho, P. P. and Costa, J. “An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 74, no. 10, pp. 1665–1682, 2007, doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.08.025.
- [10] Camanho, P. Dávila, P. C. G. and Moura, M. F. De “Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials,” *J. Compos. Mater.*, vol. 37, no. 16, pp. 1415–1438, 2003, doi: 10.1177/0021998303034505.
- [11] Harper, P. W. and Hallett, S. R. “Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 75, no. 16, pp. 4774–4792, 2008, doi: 10.1016/J.ENGFRACMECH.2008.06.004.
- [12] Kenane, M. and Benzeggagh, M. L. “Mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites under fatigue loading,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 57, No. 5, pp. 597–605, 1997, doi: 10.1016/S0266-3538(97)00021-3.



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



کاهش نوسانات صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی بر روی بستر الاستیک به روش کنترل فعال

امیر امینی¹، علیرضا فرجی^{2*}، مهدی محمدی مهر³

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان

2- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

* کاشان، کد پستی 87317-53153، arfaraji@kashanu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

موضوع کاهش نوسانات صفحات خورشیدی ماهواره‌ها که بیشترین سطح تماس را با تشعشعات خورشیدی و نیروهای آیرودینامیکی دارند، دارای اهمیت است. استفاده از ساختارهای کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بر استحکام این صفحات می‌افزاید. از جمله نیروهای اغتشاشی تاثیرگذار بر صفحات خورشیدی، نیروهای آیرودینامیکی و تشعشعات خورشیدی است که می‌توان به کمک پیژوالکتریک‌ها و طراحی کنترل‌کننده مستقل از سیستم کنترل ماهواره برای آنها، نوسانات را کاهش داد. پیژوالکتریک‌ها المان‌هایی با قابلیت کنترل فعال هستند که به دو صورت سنسور و عملگر مورد استفاده قرار می‌گیرند و مدل دقیق و کارا از خواص فیزیکی، الکتریکی و الاستوالکتریک آن‌ها مورد نیاز است. در این مطالعه، ابتدا مدل دینامیکی صفحه‌ی دارای ساختار جدید در فضای حالت بدست آمده و معادلات خطی سازی شده است. سپس کنترل‌کننده فعال تنظیم‌کننده خطی-درجه دوم برای آن طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده کاهش نوسانات صفحه و رفتار مقاوم کنترل‌کننده پیشنهادی در برابر انواع عدم قطعیت و اغتشاشات محیطی وارده به صفحه است.

دریافت: 1399/02/14
پذیرش: 1399/11/27
کلیدواژه‌گان:
کنترل فعال،
صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی،
کاهش نوسانات،
وصله‌های پیژوالکتریک،
بستر الاستیک

Vibration Suppression of Composite Plate Reinforced by Carbon Nanotubes on Elastic Foundation Using Active Control Method

Amir Amini¹, Alireza Faraji^{1*}, Mehdi Mohammadimehr²

1- Department of Control, Faculty of Computer and Electrical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Department of Solid Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

* P.O.B. 87317-53153, Kashan, Iran, arfaraji@kashanu.ac.ir

Keywords

Active control,
Composite plate reinforced by carbon nanotube,
Vibration suppression,
Piezoelectric patches,
Elastic foundation

Abstract

The issue of reducing the oscillations of the solar panels of satellites, which have the highest level of contact with solar radiation and aerodynamic forces, is important. Using of composite structures reinforced with carbon nanotubes increases the strength of these plates. The solar panels are vibrated by aerodynamic forces and solar radiations, and vibrations can be reduced with the help of piezoelectric patches and a controller design independent of the satellite control system. piezoelectric patches are active controllable elements that are used in both sensors and operators, and the use of an accurate and efficient model of their physical, electrical, and elastoelectric properties is required. In this study, first the dynamic model of the plate with a new structure in the state space is obtained and the equations are linearized. Then an active linear quadratic regulator controller is designed. The simulation results show vibration suppression of the plate and robust performance of the proposed controller in presence of the model uncertainties and environmental disturbances.

1- مقدمه

است این نوسانات و ارتعاشات کوچک به کمک روش‌های کنترل فعال همچون استفاده از پیژوالکتریک‌ها در صفحات کامپوزیتی، کنترل شوند تا از مقدار خاصی کوچکتر شوند [1,2]. در مراجع [3,4] جایابی بهینه جفت سنسور و عملگر پیژوالکتریک نصب شده بر روی یک تیر انعطاف پذیر مدنظر بوده که از کنترل‌کننده رگولاتور مربعی خطی برای این منظور استفاده شده است. و یک روش المان محدود بر پایه تئوری تیر اولیر-برنولی جهت مدل

امروزه بحث کاهش میکرونوسانات در صفحه‌های خورشیدی از جهت تاثیر گذاری بر روی تجهیزات حساس در فرکانس‌های پایین حائز اهمیت می‌باشند. حتی کوچکترین عوامل نوسانی ناشی از تشعشعات خورشیدی، نیروهای آیرودینامیکی و امواج مغناطیسی می‌تواند روی تجهیزات نصب شده در روی ماهواره از جمله سنسورهای نوری و لیزری ایجاد خطا نماید. از این رو لازم

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Amini, A., Faraji, A.R., Mohammadimehr, M., "Vibration Suppression of Composite Plate Reinforced by Carbon Nanotubes on Elastic Foundation Using Active Control Method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1243-1254, 2021.

ارزیابی قرار گرفته و تحلیل فرکانس طبیعی سیستم در زمان تغییر پارامتر ضخامت صفحه بر روی بستر الاستیک بررسی شده است. سرانجام پایدارسازی و رسیدن به سطح قابل قبولی از ارتعاشات با یک کنترل کننده LQR نشان داده شده است.

در اکثر مقالات تنها به ارتعاشات صفحه‌های کامپوزیتی پرداخته‌اند در حالی که در این مقاله ارتعاشات صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی مد نظر بوده است و متناسب با آن روابط مربوطه و ویژگی‌های نانولوله‌های کربنی در معادلات دینامیکی و پارامترهای شبیه‌سازی گنجانده شده است. 36 مد اول از روش تحلیلی شکل مود ارتعاشی استخراج شده تا رفتار دینامیکی صفحه مورد ارزیابی دقیق‌تر قرار گیرد. در اکثر مقالات تنها رفتار سیستم در برابر اغتشاشات خارجی مانند نیروهای آیرودینامیکی و تشعشعات خورشیدی تحلیل می‌شود در حالی که در این مقاله به تاثیر عدم قطعیت مکانی و وزنی جسم متمرکز نیز پرداخته شده است. همچنین تحلیل صفحه بر روی یک بستر الاستیک پاسترناک بیان شده است و روابط آن در معادلات گنجانده شده است.

2- خصوصیات لایه‌های صفحه نانو کامپوزیت کربنی با بستر الاستیک

صفحه از جنس کامپوزیت با درصد حجمی مختلف نانولوله‌ی کربنی تشکیل شده است که بر روی یک بستر الاستیک قرار گرفته است. صفحه کامپوزیتی دارای طول a ، عرض b و ضخامت h می‌باشد که در شکل 1-الف قابل مشاهده می‌باشد. پارامترهای K_g و K_w به ترتیب ضریب ارتجاعی وینکلر و ضریب لایه برشی پاسترناک می‌باشند [15]. همچنین شکل 1-ب نحوه توزیع یکنواخت نانو لوله‌های کربنی در سطح مقطع صفحه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

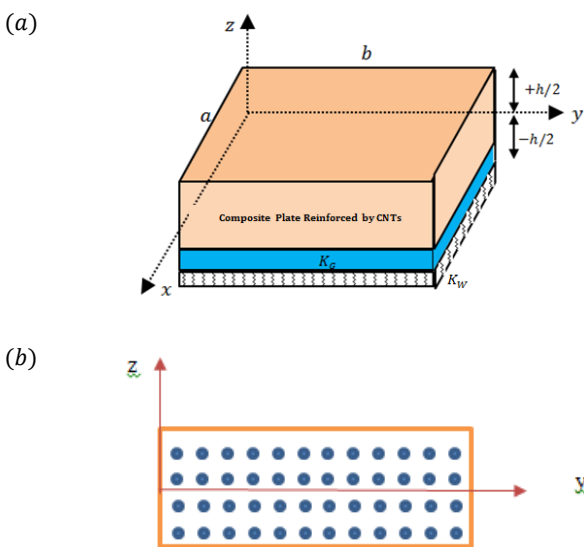


Fig1: the view of a composite plate reinforced by carbon nanotube a) with an elastic foundation b) the uniform distribution method of carbon nanotube

شکل 1-الف نمای از یک صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی (الف) با بستر الاستیک (ب) نحوه توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی

سازی به کار گرفته شده و موقعیت بهینه سنسورها و عملگرها بر پایه شرایط مرزی متفاوت تعیین شده است. در مرجع [5] راهبرد کنترل بر پایه فیدبک جابجایی و روش تنظیم کننده خطی-درجه دوم 1LQR بر روی یک صفحه به کمک مواد پیزوالکتریک پیاده شده است. معادلات سیستم به همراه عملگرهای پیزو بر اساس اصل هامیلتون پایه گذاری شده‌اند.

جهت تعیین نوع کنترل کننده نیاز است تا یک مدل دقیق از دینامیک صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی با بستر الاستیک به همراه وصله‌های پیزوالکتریک و جسم متمرکز (تجهیزات الکترونیکی و مخایراتی نصب شده بر روی ماهواره) به دست آید. تئوری‌های تغییر شکل برشی مرتبه بالا و یا تئوری صفحه ساندویچی مرتبه بالا از جمله روش‌هایی هستند که به تحلیل یک جسم متمرکز بر روی صفحات کامپوزیتی بر پایه اصل هامیلتون می‌پردازند. البته این روش‌ها با افزایش بعد مسئله مواجه هستند [6,7]. استفاده از ساختارهای هوشمند از جمله صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی در بستر الاستیک به خاطر استحکام و سختی بالا به طور چشمگیری افزایش یافته‌اند. یکی از این دلایل مهم در استفاده از آن‌ها وجود خواص پیزوالکتریک در لایه‌هایشان می‌باشد. این صفحه‌ها اصولاً از موادی با خصوصیات استحکامی بالا و وزن سبک ساخته می‌شوند [8,9].

در مقاله [10] جهت بهبود رفتار خمشی و کرنشی، صفحه ساندویچی به صورت صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی در نظر گرفته شده است که در کاهش جرم سازه و استحکام آن نقش به سزایی را ایفا می‌کند. نانولوله‌های کربنی از مدول الاستیک و استحکام بالاتری نسبت به فولاد برخوردارند در حالی که جرم آن‌ها بسیار کمتر می‌باشد. کامپوزیت‌های دارای نانو لوله‌های کربنی در بسیاری از کاربردها همچون ابزارهای الکتروشیمیایی، میکرو سنسورها، صنایع هوایی و نوابری مورد استفاده می‌باشند. توزیع نانولوله‌ها در صفحه با بستر الاستیک می‌تواند به صورت متقارن و یا نامتقارن انجام پذیرد. لذا خصوصیات مواد به کار رفته در صفحات کامپوزیتی بر مبنای قانون اختلاط تعمیم یافته بدست آمده است [11].

اما برای وصله‌های پیزو الکتریک نیاز است تا یک تحلیل دقیق تر بر روی خواص فیزیکی و الکتریکی آنها صورت پذیرد و معادلات آن‌ها بر اساس توابع ریتز بدست آید [12]. در مرجع [13]، یک مدل ریاضی پیچیده بر اساس یک سیستم الکترومکانیک که مجموعی از یک صفحه با بستر الاستیک مجهز به جسم متمرکز و وصله‌های سنسور و عملگر پیزو الکتریک می‌باشد استخراج شده است و نتایج شبیه سازی با روش المان محدود صحت سنجی شده است. براساس تحلیل دینامیکی سیستم و تعیین محل قطب‌های آن، می‌توان با انتخاب LQR رفتار سیستم را کنترل نمود تا به دامنه‌ی قابل قبول ارتعاشات دست یابد [14]. همچنین می‌توان رفتار مقاوم سیستم را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌هایی همچون موقعیت اعمالی نیروی اغتشاشی و یا تغییر جرم جسم متمرکز مورد ارزیابی و تحلیل قرار داد.

در این مقاله، ابتدا پارامترهای دینامیکی یک صفحه نانو کامپوزیتی کربنی با بستر الاستیک بر اساس روابط قانون اختلاط تعمیم یافته بدست آمده و سپس به کمک بیان روابط لاگرانژ بر اساس اصل همیلتونین، معادلات دینامیکی صفحه با بستر الاستیک استخراج می‌شود. با بکارگیری یک رابطه خطی براساس آنالیز شکل مود ارتعاشی می‌توان معادلات حالت مساله را حل نمود. سپس پایداری سیستم نسبت به تغییر جرم و مکان جسم متمرکز، مکان اعمال نیروی اغتشاشی خارجی و جابجایی سنسور و عملگر پیزو مورد

¹ Linear Quadratic regulator

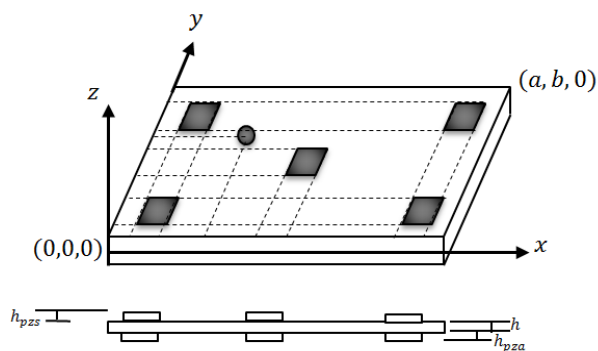


Fig 3 The position of piezoelectric patches and lumped mass in the Cartesian coordinate

شکل 3 مختصات وصله‌های پیزو الکتریک و جسم متمرکز در دستگاه کارتزین

همان طور که از شکل 3 نمایان است از پنج جفت وصله پیزوالکتریک بر روی صفحه با بستر الاستیک استفاده شده است که سنسورها بر روی صفحه و عملگرها متناظر آنها در زیر صفحه نصب شده اند. دلیل استفاده از این ساختار اتصال کانکتورهای خارجی از واحد کنترل کننده می‌باشد. تغییرات جابجایی در صفحه با بستر الاستیک توسط سنسورها حس شده و متناسب با مقدار انبساط و انقباض آن، ولتاژ الکتریکی تولید شده و به واحد کنترل فرستاده می‌شود؛ تا متناسب با آن ولتاژی به عملگرهای پیزو توسط کنترل کننده محلی مستقل از سیستم کنترل ماهواره، اعمال شود [18].

3-2 بیان روابط اساسی مساله

روابط اساسی حاکم بر ورق مستطیلی با فرضیات زیر بدست آمده است:

- 1- ورق دارای ماده همگن و یکنواخت با خاصیت الاستیسیته خطی است.
- 2- ورق کاملاً مسطح است.
- 3- سطح میانی ورق در زمان خمش ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- 4- ضخامت ورق در مقایسه با طول و عرض ورق بسیار کوچک و دارای نسبت کوچکتر از یک به ده است:
 $h < b/10$ ، b کوچکترین بعد ورق می‌باشد
- 5- انحنا یا پیچش سراسری $w(x, y, t)$ در مقایسه با ضخامت ورق کوچک است. بیشترین مقدار در نظر گرفته شده برای انحنای ورق کمتر از یک دهم ضخامت ورق می‌باشد.
- 6- تنش نرمال σ_{zz} در سرتاسر سطح ورق قابل نظر گرفتن است.

لذا میدان جابجایی کلاسیک صفحه به صورت زیر بیان می‌شود [19]:

$$\begin{cases} U(x, y, z, t) = u(x, y, t) - z \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial x} \\ V(x, y, z, t) = v(x, y, t) - z \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial y} \\ W(x, y, z, t) = w(x, y, t) \end{cases} \quad (2)$$

که u ، v و w جابجایی‌های صفحه میانی با بستر الاستیک در جهت طولی، عرضی و ضخامت می‌باشند. به علت یکنواختی چسبندگی و محکم بودن لایه‌های میانی به رویه‌ها از جابجایی‌های صفحات میانی صرف نظر شده است. این فرضیه به ساده شدن روابط بدون از دست دادن کلیات مسئله کمک می‌کند و در بیشتر سازه‌های ساندویچی که هسته میانی به رویه‌ها توسط چسب‌ها متصل می‌شود در نظر گرفته می‌شود. مراجع [6] و [8] نیز به

در دستگاه مختصات کارتزین، نقطه صفر در یکی از گوشه‌های مکعب و وسط مقطع آن مطابق شکل 1 - الف در نظر گرفته شده است. قانون اختلاط تعمیم یافته [17] یک روش ساده و مناسب جهت تخمین خصوصیات مواد کامپوزیتی دو فازی می‌باشد. این قوانین به صورت زیر نوشته شده‌اند:

$$E_{11} = \eta_1 V_{NT} E_{11NT} + V_M E_{11M} \quad (1-a)$$

$$\frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{NT}}{E_{22NT}} + \frac{V_M}{E_{22M}} \quad (1-b)$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{NT}}{G_{12NT}} + \frac{V_M}{G_{12M}} \quad (1-c)$$

$$\nu_{12} = V_{NT} \nu_{12NT} + V_M \nu_{12M} \quad (1-d)$$

$$\rho = V_{NT} \rho_{NT} + V_M \rho_M \quad (1-e)$$

$$V_{NT} = V_{NT}^* \quad (1-f)$$

پسوند‌های NT و M به ترتیب نشان دهنده نانولوله و ماتریس می‌باشند. این رابطه‌ی $V_{NT} + V_M = 1$ برای کامپوزیت‌ها برقرار است. پارامترهای V_M و V_{NT} به ترتیب حجم‌های ماتریس و نانولوله‌های کربنی می‌باشند. وظیفه ماتریس در یک مقطع کامپوزیت، پیوند زدن الیاف به یکدیگر و نگاه‌داشتن موقعیت آن‌ها به طور ثابت است به طوری که اجازه حرکت و اعوجاج بین الیاف وجود نداشته باشد. در روابط فوق $\eta_i (i=1,2,3)$ پارامتر راندمان و ν نسبت پواسون می‌باشد. E_{22M} و E_{11M} به ترتیب ضریب‌های کشسانی ماتریس می‌باشند. همچنین E_{11} ، E_{22} و G_{12} به ترتیب مدول‌های الاستیک طولی، عرضی و مدول برشی می‌باشند. پارامترهای راندمان به صورت عددی برای نانولوله‌های کربنی معرفی شده و این مقادیر به کمک شبیه سازی دینامیکی ملکولی بدست آمده‌اند [17].

3-1 بیان روابط اساسی و شکل کلی مساله

1-1 تاثیر اجسام بر روی صفحه نانوکامپوزیتی

از جمله اجسام نصب شده بر روی صفحه نانوکامپوزیتی می‌توان سنسورها، عملگرها و تجهیزات مخابراتی را نام برد. تجهیزات به صورت جسم متمرکز و اثر نیروی اغتشاشی نقطه‌ای در شکل 2 مشاهده می‌شود. جسم متمرکز به تجمع کلیه تجهیزات نصب شده بر روی ماهواره در یکجا گفته می‌شود که از جمله این تجهیزات می‌توان سنسورها، فرستنده‌ها و گیرنده‌های مخابراتی و چرخ‌های عکس‌العملی را نام برد. نمای مختصات کارتزین تجهیزات بر روی صفحه نانوکامپوزیتی در شکل 3 قابل مشاهده می‌باشد.

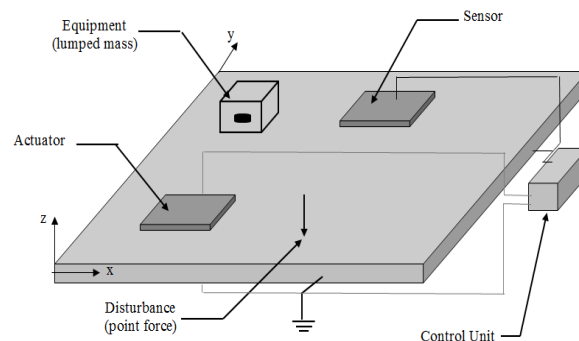


Fig 2 The position of sensors, actuators, lumped mass, and disturbance force on a nanocomposite plate

شکل 2 مدل قرارگیری سنسورها، عملگرها، جسم متمرکز و نیروی اغتشاشی بر روی صفحه نانوکامپوزیتی

با استفاده از روش ناویر طبق روابط (7) و (8-الف) برای شرایط مرزی چهار طرف تکیه گاه ساده، ماتریسهای سختی و جرم با به کارگیری معادله لاگرانژ به دست می‌آید.

1-2-3 معادلات لاگرانژ

به کمک رابطه لاگرانژ می‌توان معادلات دینامیکی صفحه را استخراج نمود:

$$\left\{ \begin{array}{l} L = T - U - W_{ex} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \end{array} \right. \quad (9)$$

در رابطه (9) پارامترهای T ، U و W_{ex} انرژی‌های جنبشی، پتانسیل و کار خارجی ناشی از اثر الاستیک سیستم می‌باشند، و پارامترهای q_i و Q_i به ترتیب i امین پارامتر ذاتی سیستم و نیروی مرتبط با آن می‌باشد. از پارامترهای ذاتی سیستم در مدل مذکور می‌توان پارامتر γ و ولتاژ وصله‌های پیزو الکتریک‌ها را نام برد.

پارامتر Q را مطابق با نقطه اثر نیرو بر روی صفحه با بستر الاستیک در دستگاه مختصات به فرم زیر تعریف می‌کنند [13]:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{N_f} F_j \frac{\partial w_j}{\partial \gamma_j} \quad (10)$$

با جایگذاری رابطه (7) در (10) رابطه نیروی خارجی به شرح ذیل است:

$$Q = \mu_f^T f \quad (11)$$

در رابطه (11) پارامترهای برداری f و μ_f به ترتیب نیروهای خارجی و شکل مود ارتعاشی در نقطه اثر مربوطه می‌باشند و پارامتر f دارای ابعاد $N_f * 1$ به تعداد نقاط اعمال نیرو می‌باشد، همچنین پارامتر μ_f به کمک رابطه (8) تنها در نقطه اثر مربوطه‌اش محاسبه می‌شود.

1-1-2-3 انرژی جنبشی

برای تعیین انرژی جنبشی صفحه باید انرژی تک تک لایه‌ها همچون صفحه نانو کامپوزیتی کربنی، لایه‌های پیزوالکتریک و جسم متمرکز بدست آید.

$$T = T_c + T_{pzs_t} + T_{pza_b} + T_{Im} \quad (12)$$

پارامترهای T_c ، T_{pzs_t} ، T_{pza_b} و T_{Im} به ترتیب انرژی‌های جنبشی هسته، سنسور پیزوالکتریک، عملگر پیزوالکتریک و جسم متمرکز می‌باشند. رابطه کلی جهت تعیین انرژی جنبشی صفحه به صورت زیر می‌باشد [13]:

$$T = \int \frac{1}{2} \rho \left(\left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial t} \right)^2 \right) dV = \frac{1}{2} \dot{\gamma}^T M \dot{\gamma} \quad (13)$$

ρ نشان دهنده چگالی سازه است. جرم کل صفحه را می‌توان از مجموع جرم صفحه نانو کامپوزیتی کربنی، لایه‌های پیزوالکتریک و جسم متمرکز بدست آورد.

$$M_c = \iiint \rho_c \left(z^2 \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial \mu^T}{\partial x} + z^2 \frac{\partial \mu}{\partial y} \frac{\partial \mu^T}{\partial y} + \mu \cdot \mu^T \right) dx dy dz \quad (14)$$

$$M_{pz} = \sum_{i=1}^{N_{pz}} \iiint \rho_{pz} \left(z^2 \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial \mu^T}{\partial x} + z^2 \frac{\partial \mu}{\partial y} \frac{\partial \mu^T}{\partial y} + \mu \cdot \mu^T \right) dx dy dz \quad (15)$$

$$M_{Im} = \sum_{i=1}^{N_i} M_{Im_i} \mu_{Im_i} \mu_{Im_i}^T \quad (16)$$

این فرضیه استناد کرده‌اند. روابط کرنش‌های نرمال و برشی بر اساس رابطه زیر حاصل می‌شوند:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{array} \right\} + z \left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{array} \right\} \quad (3)$$

به خاطر جابجایی‌های کوچک مقادیر u و v قابل صرف نظر است و همچنین معادلات برای صفحه نانو کامپوزیتی به قرار زیر است [16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{cccccc} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{zz} = 0 \quad (5)$$

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{12}}, Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{12}}, Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{12}}, Q_{66} = G_{12} = \frac{E_{11}}{2(1 + \nu_{12})}, Q_{44} = G_{23}, Q_{55} = G_{13} \quad (6)$$

در رابطه (6) پارامترهای E_{11} ، E_{22} ، ν_{12} ، G_{13} ، G_{23} ، G_{12} و Q به ترتیب مدول‌های یانگ در جهت‌های طولی و عرضی، نسبت پواسون، مدول‌های برشی در سه جهت و ثوابت سفتی می‌باشند.

جهت ساده‌سازی در حل معادلات سیستم از روش شکل مود ارتعاشی استفاده شده و پارامتر w (خیز صفحه) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{n=1}^{N_n} \mu_{m,n}(x, y) \gamma_{m,n}(t) = \mu^T \gamma \quad (7)$$

در رابطه (7) پارامترهای N_m و N_n به ترتیب تعداد شکل مود ارتعاشی در راستاهای طولی و عرضی می‌باشند و پارامتر مستقل از جابجایی و وابسته به زمان γ در ابعاد $1 * N_m$ می‌باشد. پارامتر μ که تنها به جابجایی‌های طولی و عرضی صفحه مستقل از زمان وابسته است دارای ابعاد $N_m * N_n$ می‌باشد و بدین صورت است:

$$\mu = \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (8-a)$$

شرایط مرزی صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی برای صفحه چهار طرف تکیه گاه ساده به صورت زیر می‌باشد:

$$\left. \begin{array}{l} w = 0 \text{ at } y = 0, b \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \text{ at } y = 0, b \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} w = 0 \text{ at } x = 0, a \\ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \text{ at } x = 0, a \end{array} \right\} \quad (8-b)$$

$$K_{pz_{elast}} = \sum_{i=1}^{N_{pz}} \iiint \left[\frac{E_{pz_i} z^2}{(1 - \nu_{pz_i}^2)} \left(\frac{\partial^2 \mu_{pz_i}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}^T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}^T}{\partial y^2} \right) + 2\nu_{pz_i} \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}^T}{\partial y^2} + 2(1 - \nu_{pz_i}) \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}^T}{\partial x \partial y} \right] dx dy dz \quad (22)$$

در مساله مربوطه در این مقاله $N_{pz_i} = 5$ (5 عدد وصله سنسور و 5 عدد وصله عملگر متناظر در بالا و پایین صفحه) می‌باشد. به علت یکسان بودن جهت تنش در بالا و پایین صفحه و همچنین یکسان بودن نوع و اندازه پیروزالکتریک ها، $K_{pz_{elast}}$ (ماتریس سختی پیروزالکتریک) در بالا و پایین صفحه با هم برابرند. پتانسیل ناشی از برهم کنش خاصیت‌های الکتریکی و الاستیسیته پیروز بر اساس روابط تنش‌های طولی و عرضی معین می‌شود.

$$\sigma_{elect} = \begin{pmatrix} \sigma_{x_{elect}} \\ \sigma_{y_{elect}} \end{pmatrix} = \frac{E_{pz}}{1 - \nu^2} \begin{pmatrix} \epsilon_{xz} + \nu \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{yz} + \nu \epsilon_{xz} \end{pmatrix} e \quad (23)$$

در رابطه (23) پارامتر e ، میدان الکتریکی ناشی از اعمال ولتاژ به پیروز می‌باشد که از رابطه $e = \frac{V_{pz}}{h_{pz}}$ بدست می‌آید. ضخامت لایه پیروزالکتریک می‌باشد. ϵ_{yz} و ϵ_{xz} ثابت‌های پیروزالکتریک می‌باشند که با انتخاب یکسان از ابعاد پیروز در راستای طولی و عرضی این دو را برابر و مساوی مقدار ϵ_{z_i} در نظر گرفته می‌شوند. E_{pz} ثابت مدول یانگ برای پیروزالکتریک‌ها می‌باشد. لذا انرژی پتانسیل ناشی از خواص الاستیسیته و الکتریکی بدین صورت است [21]:

$$U_{pz_{elastelect}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{pz}} \iiint \epsilon^T \sigma_{elect} dx dy dz = V_{pz}^T K_{pz_{elastelect}} \gamma \quad (24)$$

با در نظر گرفتن خاصیت تقارن در رابطه $\sigma_{elect}^T \epsilon = \epsilon^T \sigma_{elect}$ می‌توان رابطه (24) را نتیجه گرفت.

$$K_{pz_{elastelect}} = \sum_{i=1}^{N_{pz}} \iiint \left(z \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}^T}{\partial x^2} + z \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \mu_{pz_i}^T}{\partial y^2} \right) dx dy dz \quad (25)$$

در رابطه (25) رابطه $p_i = \frac{1}{h_{pz_i}}$ برقرار می‌باشد. با توجه به زوج بودن تابع انرژی پتانسیل لذا مقدار این انرژی برای وصله‌های پیروزالکتریک در بالا و پایین صفحه یکسان می‌باشد.

انرژی پتانسیل ناشی از میدان الکتریکی طبق رابطه $d_i = \epsilon_{pz_i} \frac{V_{pz}}{h_{pz_i}}$ بدست می‌آید. که d معرف جابجایی الکتریکی می‌باشد و پارامتر ϵ_{pz_i} ثابت دی الکتریک از ماده پیروزالکتریک می‌باشد.

$$U_{pz_{elect}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{pz}} \iiint e^T d dx dy dz = \frac{1}{2} V^T K_{pz_{elect}} V \quad (26)$$

$$K_{pz_{elect}} = \sum_{i=1}^{N_{pz}} \iiint \epsilon_{pz_i} p_i^T p_i dx dy dz \quad (27)$$

همچنین به خاطر توزیع متقارن میدان الکتریکی در بالا و پایین صفحه در وصله‌های پیروز، رابطه $U_{pz_{elect}} = U_{pz_{elect}}$ برقرار است.

ρ_{c} و ρ_{pz_i} به ترتیب چگالی‌های صفحه کامپوزیتی کربنی و پیروزالکتریک می‌باشند و N_I تعداد اجسام متمرکز بر روی صفحه می‌باشد. همچنین μ_{Im_i} پارامتر شکل مود ارتعاشی در نقطه اثر خود می‌باشد. پارامتر N_{pz} تعداد وصله‌های پیروزالکتریک را نشان می‌دهد.

2-1-2-3 انرژی پتانسیل

انرژی پتانسیل کل صفحه از مجموع انرژی پتانسیل صفحه کامپوزیتی و پیروزالکتریک‌ها حاصل می‌شود.

$$U = U_c + U_{pz_{st}} + U_{pz_{ab}} \quad (17)$$

انرژی پتانسیل ناشی از خاصیت الاستیسیته برای صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی به فرم زیر است [13]:

$$U_c = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} \epsilon^T \sigma_c dx dy dz = \frac{1}{2} \gamma^T K_c \gamma \quad (18)$$

که

$$K_c = \int_0^a \int_0^b \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} \left(Q_{11c} \left(z^2 \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \mu^T}{\partial x^2} \right) + Q_{22c} \left(z^2 \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \mu^T}{\partial y^2} \right) + 2Q_{12c} \left(z^2 \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \mu^T}{\partial y^2} \right) + Q_{66c} \left(4z^2 \frac{\partial^2 \mu}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \mu^T}{\partial x \partial y} \right) \right) dx dy dz \quad (19)$$

انرژی پتانسیل ناشی از لایه‌های پیروزالکتریک شامل سه بخش انرژی پتانسیل الاستیسیته، انرژی ناشی از میدان الکتریکی ذخیره شده در اثر خواص دی الکتریک مواد سازنده پیروزالکتریک‌ها و انرژی ناشی از برهم کنش ولتاژ اعمالی به لایه پیروزالکتریک و ارتعاش آن می‌باشد. پس می‌توان انرژی پتانسیل یک لایه پیروزالکتریک را به فرم زیر نوشت [20]:

$$U_{pz} = U_{pz_{elast}} + U_{pz_{elastelect}} + U_{pz_{elect}} \quad (20)$$

جهت محاسبه انرژی پتانسیل پیروزالکتریک‌ها ناشی از خواص الاستیکی پیروز فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- 1- از سختی الکترودهای متصل به وصله‌های پیروز صرف نظر شده است.
- 2- از ضخامت چسب به کار رفته در اتصال الکترودها به پیروزها در مقایسه با اندازه وصله‌های پیروز صرف نظر شده
- 3- چسب‌ها قادر به انتقال کل خواص تنشی از پیروز می‌باشند.
- 4- شرایط مرزی ذاتی در لبه‌های وصله‌های پیروزالکتریک‌ها همچون $(\sigma = 0)$ وجود ندارد و تاثیری در توزیع خمش و یا تنش در کل صفحه نمی‌گذارد.

انرژی پتانسیل ناشی از خاصیت الاستیسیته و ایزوتروپیک پیروز همانند انرژی پتانسیل صفحه نانوکامپوزیتی می‌باشد البته مدول الاستیسیته طولی و عرضی در پیروزها یکسان فرض شده اند و E_{pz_i} مدول یانگ i امین وصله پیروز می‌باشد و U_{pz_i} معرف نسبت پواسون در پیروز است:

$$U_{pz_{elast}} = \sum_{i=1}^{N_{pz}} \frac{1}{2} \iiint \epsilon^T \sigma_{pz_i} dx dy dz = \frac{1}{2} \gamma^T K_{pz_{elast}} \gamma \quad (21)$$

$$\dot{x} = Ax + B_v v_a + B_f f \quad (42)$$

در جایی که

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \\ \dot{Y} \end{pmatrix}, \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -M^{-1}KX_1 - M^{-1}C_s x_2 \\ -M^{-1}K_{pza}^{T} V_{pza} + M^{-1}\mu_f^{TF} \end{cases} \quad (43)$$

پس نتیجه می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_s \end{bmatrix}, \quad B_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}K_{pza}^{T} \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\mu_f^{TF} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$C_v = [-K_{pzs}^{elect} \quad -K_{pzs}^{elastelect} \quad 0], \quad C_w = [\mu_{out}^T \quad 0] \quad (45)$$

در جایی که K معرف ماتریس سختی کل سیستم، w_{out} جابجایی خروجی صفحه با بستر الاستیک و μ_{out} بیانگر بردار شکل مود ارتعاشی در موقعیت خروجی می‌باشد. به کمک روابط بدست آمده در فرم فضای حالت و خطی بودن آن، طراحی فیدبک حالت بر اساس تئوری LQR می‌تواند یکی از انتخاب‌های مناسب برای کنترل کننده باشد. اساس کار این کنترل کننده بر کمینه کردن تابع هزینه زیر می‌باشد [23]:

$$J = \int_0^{\infty} (w_{out}^T Q w_{out} + v_a^T R v_a) dt \quad (46)$$

ماتریس های وزنی Q و R به ترتیب مثبت معین و مثبت معین و دارای ابعاد متناسب با متغیرهای حالت مساله می‌باشند و انتخاب آن ها بستگی به ویژگی سیستم دارد.

معادله کنترل کننده بر اساس قانون فیدبک حالت و به کمک حل معادله ریکاتی مطابق زیر حاصل می‌شود:

$$V_{pza} = G_{fs} x \quad (47)$$

G_{fs} ماتریس بهره فیدبک حالت می‌باشد و بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید:

$$G_{fs} = R^{-1} B_v^T P_c \quad (48)$$

پارامتر P_c در رابطه (48) از معادله ریکاتی جبری زیر نتیجه می‌شود:

$$A^T P_c + P_c A - P_c B_v R^{-1} B_v^T P_c + C_w Q C_w^T = 0 \quad (49)$$

5- نتایج و شبیه سازی

نتایج شبیه سازی با وجود دو عامل تحریک نیروی اغتشاشی و ولتاژ عملگر پیزوالکتریک، در دو حالت مورد بررسی قرار گرفته اند:

حالت اول: منبع اغتشاش یک نیروی هارمونیک با دامنه یک نیوتن می‌باشد که به صورت عمود بر صفحه در نقطه مشخص $x = 250\text{mm}$ و $y = 50\text{mm}$ به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$f = F e^{j\omega t} = F e^{j2\pi f_1 t} \quad (50)$$

و همچنین یک جسم متمرکز به جرم 50 گرم در نقطه $x = 50\text{mm}$ و $y = 150\text{mm}$ قرار داده می‌شود.

حالت دوم: ولتاژی معادل یک ولت با دامنه سینوسی به عملگر پیزوالکتریک اعمال می‌شود تابع ولتاژ به فرم زیر می‌باشد:

$$V_{pza} = V_0 e^{j\omega t} = V_0 e^{j2\pi f_2 t} \quad (51)$$

$$V_0 = 1$$

در شبیه سازی 36 مود اول ارتعاشی سیستم تحلیل شده تا رفتار تنش و کرنش صفحه تا میزان جابجایی قابل قبول، مورد ارزیابی قرار گیرد.

$$w = \mu^T \gamma = (\mu_1 \dots \mu_{36}) (\gamma_1 \dots \gamma_{36})^T \quad (52)$$

3-1-2-3 کار خارجی

کار خارجی انجام شده بر اساس نیروی بستر الاستیک به صورت زیر می‌باشد،

$$W_{external} = \frac{1}{2} \int (-K_w w + K_p \nabla^2 w) w dA \\ = \frac{1}{2} \gamma^T \iint (-K_w \mu^T \mu + K_p (\frac{\partial^2 \mu^T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu^T}{\partial y^2})) \mu dx dy \gamma \\ W_{external} = \frac{1}{2} \gamma^T K_{ex} \gamma \quad (28)$$

بنابراین رابطه کلی برای انرژی پتانسیل می‌شود:

$$U = \frac{1}{2} \gamma^T K_c \gamma + \frac{1}{2} \gamma^T K_{pzelect} \gamma \\ + V_{pz}^T K_{pzelect} \gamma + \frac{1}{2} V_{pz}^T K_{pzelect} V_{pz} \quad (29)$$

با جایگذاری انرژی های جنبشی، پتانسیل، نیروی ناشی از بستر الاستیک و اغتشاش خارجی از روابط (12)، (29)، (28) و (10) در رابطه (9) و مشتق گیری نسبت به پارامترهای γ و V_{pz} به ترتیب نتایج زیر حاصل می‌شوند.

$$(M_c + M_{pz} + M_{lm}) \dot{\gamma} + (K_c + K_{ex} + K_{pzelect}) \gamma \\ + K_{pzelect}^T V_{pz} = s^{TF} \quad (30)$$

$$K_{pzelect} \gamma + K_{pzelect} V_{pz} = 0 \quad (31)$$

با استفاده از روابط زیر:

$$M = M_c + M_{pz} + M_{lm} \quad (32)$$

$$K_{elast} = K_c + K_{ex} + K_{pzelect} \quad (33)$$

$$K_{pzelect}^T V_{pz} = [K_{pzs}^{elastelect} \quad K_{pza}^{elastelect}] \begin{bmatrix} V_{pzs} \\ V_{pza} \end{bmatrix} \quad (34)$$

رابطه (30) را می توان به فرم خلاصه تر به صورت زیر نوشت:

$$M \dot{\gamma} + K_{elast} \gamma + K_{pzs}^{elastelect} V_{pzs} \\ + K_{pza}^{elastelect} V_{pza} = \mu^{TF} \quad (35)$$

ولتاژ پیزوالکتریک حاصل از اندازه گیری سنسور طبق رابطه (31) می‌شود:

$$V_{pzs} = -K_{pzs}^{elect}^{-1} K_{pzs}^{elastelect} \gamma \quad (36)$$

با جایگذاری رابطه (36) در رابطه (35) بدست می‌آید:

$$M \dot{\gamma} + \begin{pmatrix} K_{elast} & - \\ K_{pzs}^{elastelect} & K_{pzs}^{elect}^{-1} K_{pzs}^{elastelect} \end{pmatrix} \gamma \\ = -K_{pza}^{elastelect} V_{pza} + \mu^{TF} \quad (37)$$

با فرض $K_{pzs} = -K_{pzs}^{elastelect} K_{pzs}^{elect}^{-1} K_{pzs}^{elastelect}$ رابطه (37) ساده تر شده، و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M \dot{\gamma} + (K_{elast} + K_{pzs}) \gamma = \\ -K_{pza}^{elastelect} V_{pza} + \mu^{TF} \quad (38)$$

با اضافه کردن ماتریس دمپینگ و رابطه $K = K_{elast} + K_{pzs}$ ، رابطه (38) به صورت زیر می‌شود:

$$M \dot{\gamma} + C_s \dot{\gamma} + K \gamma = \\ -K_{pza}^{elastelect} V_{pza} + \mu^{TF} \quad (39)$$

مقدار ماتریس استهلاک به صورت تناسبی $C_s = \alpha M + \beta K$ از [22] است که ضرایب آن تاثیر مستقیم در جابجایی قطب های سیستم خواهند داشت.

4- طراحی کنترل کننده LQR

مدل ریاضی بدست آمده از روابط (7)، (36) و (39) را می توان در فرم فضای حالت، خطی سازی نموده و به صورت زیر نوشت:

$$w_{out} = C_w x \quad (40)$$

$$v_s = C_v x \quad (41)$$

جدول 1 خواص مکانیکی و هندسی برای صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی و سنسورها و عملگرهای پیزو الکتریک

Table 1 Structural and geometric properties of a composite plate reinforced by carbon nanotube and piezoelectric patches

خصوصیات ماده	ابعاد ماده	صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله های کربنی
خواص نانولوله کربنی: $E_{11NT} = 5.64 \text{ TPa}$, $E_{22NT} = 7.08 \text{ TPa}$ $G_{12NT} = 1.94 \text{ TPa}$, $V_{NT}^* = 0.17$, $\eta_1 = 0.142$, $\eta_2 = 1.626$, $\eta_3 = 1.138$ $\rho_{NT} = 4000 \text{ kg/m}^3$, $\nu_{NT} = 0.175$	$a = 300 \text{ mm}$ $b = 200 \text{ mm}$ $h = 0.11 \text{ mm}$	
خواص ماتریس: $E_m^c = 8.3 \text{ GPa}$, $\nu_m^c = 0.18$, $\rho_m^c = 1750 \text{ Kg/m}^3$		سنسورها و عملگرهای پیزو الکتریک
$E = 63 \text{ e9 Pa}$, $\rho = 7650 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 0.3$, $D = 1.66 \text{ e}^{-10} \text{ m/v}$ $\varepsilon = 1700 \varepsilon^0$	$x_{s1}, x_{s4} = [67.5 \ 82.5] \text{ mm}$ $x_{s5} = [142.5 \ 157.5] \text{ mm}$ $y_{s1}, y_{s2} = [45 \ 55] \text{ mm}$ $y_{s5} = [95 \ 105] \text{ mm}$ $h_{pzs} = 0.19 \text{ mm}$	
$W_{lm} = 50 \text{ g}$	$X_{lm} = 50 \text{ mm}$ $Y_{lm} = 150 \text{ mm}$	جسم متمرکز

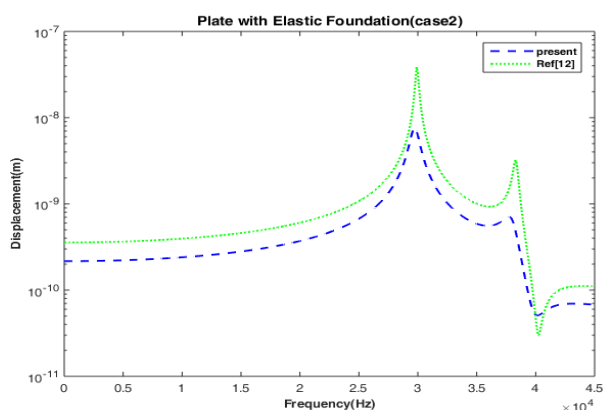


Fig 5 The comparison of Aluminum plate displacement with ref [12] in frequency domain in case2

شکل 5 مقایسه جابجایی صفحه آلومینیومی با مرجع [12] در حوزه فرکانس در حالت دوم

جدول 2 مقایسه جابجایی صفحه آلومینیومی با مرجع [12] در حالت اول

Table 2 The comparison of Aluminum plate displacement with ref [12] in case1

جابجایی (م) سوم	مود (سوم) (Hz)	جابجایی (م) دوم	مود (دوم) (Hz)	جابجایی (م) اول	مود (اول) (Hz)	مرجع [12]
2.1×10^{-7}	31300	7.67×10^{-10}	5000	6.14×10^{-7}	4700	
0.7×10^{-7}	31300	9.21×10^{-10}	5000	3.69×10^{-7}	4700	مقاله حاضر

جدول 3 مقایسه جابجایی صفحه آلومینیومی با مرجع [12] در حالت دوم

Table 3 The comparison of Aluminum plate displacement with ref [12] in case2

جابجایی (م) سوم	مود (سوم) (Hz)	جابجایی (م) دوم	مود (دوم) (Hz)	جابجایی (م) اول	مود (اول) (Hz)	مرجع [12]
3.24×10^{-9}	38400	9.28×10^{-10}	36200	3.87×10^{-8}	30000	
0.71×10^{-9}	37800	5.55×10^{-10}	36100	0.76×10^{-8}	39800	مقاله حاضر

مشخصات صفحه ساندویچی با بستر الاستیک، پیزوالکتریک ها و صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی در جدول 1 آمده است [12]. اعتبار صحت سنجی مقاله مذکور با مرجع [12] در هنگامی که هر دو از صفحه آلومینیومی استفاده کرده اند مقایسه شده و در شکل های 4 و 5 و جدول های 2 و 3 آورده شده است. از دلایل انتخاب مرجع فوق جهت مقایسه و صحت سنجی، یکسان بودن روش استخراج معادلات پایه از روش انرژی و استفاده از تکنیک ریتز در هر دو مقاله می باشد. شکل های 4 و 5 به ترتیب مقایسه جابجایی صفحه آلومینیومی کار حاضر با مرجع [12] در حوزه فرکانس در حالت یک و دو را نشان می دهد. می توان مشاهده نمود که نتایج کار حاضر با کار دیگران تطابق بسیار خوبی دارد و می توان با تغییر خواص در کد حاضر تحلیل را برای سازه های ساندویچی انجام داد. محور عمودی تمامی شکل ها بر اساس اندازه لگاریتمی نمایش داده شده است.

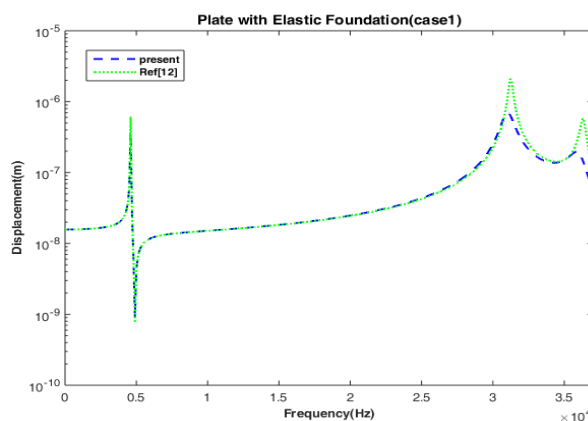


Fig 4 the comparison of Aluminum plate displacement with ref [12] in frequency domain in case1

شکل 4 مقایسه جابجایی صفحه آلومینیومی با مرجع [12] در حوزه فرکانس در حالت اول

در جدول های 2 و 3 به ترتیب مقایسه جابجایی صفحه آلومینیومی کار حاضر با مرجع [12] در حالت یک و دو نشان داده شده است. مرجع حاضر از دامنه نوسانات پایین تری برخوردار است. اختلاف اندک میان دو مرجع به علت در نظر گرفتن مدل حاضر بر روی بستر الاستیک می باشد که کاهش میزان جابجایی را به دنبال داشته است.

در شکل 7 نیز میزان جابجایی صفحه در حالت دوم نشان داده شده است با این تفاوت که عوامل تحریک بیرونی بر خلاف حالت اول (اعمال نیروی اغتشاشی و قرار دادن جسم متمرکز)، تنها ولتاژ اعمالی به عملگر های پیزو الکتریک می‌باشد که به مراتب بسیار بزرگتر از عامل تحریک در حالت یک می‌باشد. علت این امر ضریب B_V می‌باشد که در ولتاژ عملگر ضرب شده و میزان تحریک را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد. مقدار فرکانس تحریک شده در حالت دو بسیار بیشتر از حالت یک است.

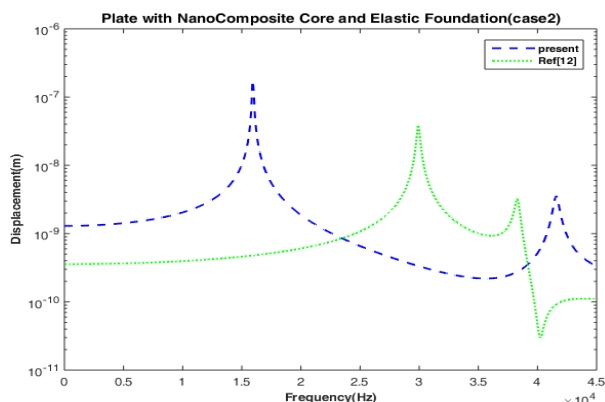


Fig 7 Displacement of the composite plate reinforced by carbon nanotube caused by piezoelectric voltage (case2)

شکل 7 جابجایی صفحه کامپوزیتی با نانولوله های کربنی در اثر تحریک نیروی ولتاژ عملگرهای پیزوالکتریک(حالت 2)

در شکل 8 کنترل کننده LQR با ضرایب $R = I$ و $Q = I * 10^{11}$ برای کاهش نوسانات صفحه کامپوزیتی طراحی شده است تا رفتار مطلوب از کنترل کننده بدست آید و نوسانات صفحه به سطح مورد قبول برسد. دلیل وجود اختلاف زیاد میان مقادیر ضرایب R و Q در کنترل کننده، وجود اختلاف زیاد میان مقادیر ویژه ماتریس جرم و ماتریس سختی در صفحه می‌باشد که ماتریس جرم از مرتبه 10 به توان 3- و ماتریس سختی از مرتبه 10 به توان 10 می‌باشد. در شکل 9 ولتاژ ورودی کنترل کننده جهت درک بهتر رفتار کنترل کننده براساس روابط (47) تا (49) سیستم ترسیم شده است.

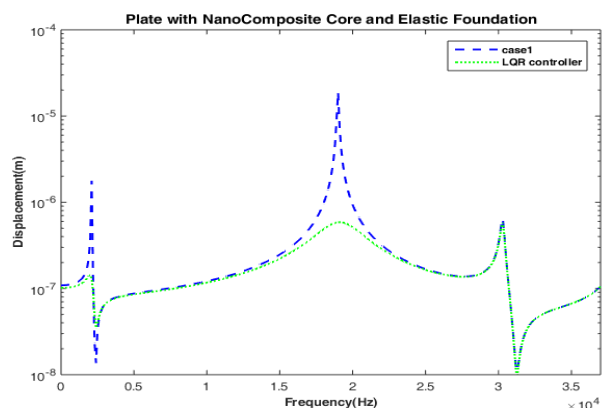


Fig 8 Plate frequency response using LQR controller

شکل 8 پاسخ فرکانسی صفحه با استفاده از کنترل کننده LQR

در شکل 6 میزان جابجایی یک صفحه کامپوزیتی نسبت به گستره فرکانسی صفر تا 350 کیلو هرتز در حالت یک نشان داده شده است. میزان جابجایی صفحه ساندویچی در نقاط اکستریم با مقاله مشابه از مرجع [12] با صفحه آلومینیومی مقایسه شده است و نسبت بسیار کم در جابجایی در این نقاط قابل مشاهده می‌باشد. همان طور که قابل مشاهده است تغییرات نوسانی صفحه ساندویچی، رفتاری شبیه با مرجع [12] دارد با این تفاوت که به علت یکسان نبودن جنس دو صفحه مکان وقوع فرکانس های ذاتی آن ها با هم اندکی تفاوت دارند و همچنین بازه تغییرات جابجایی هر دو صفحه نزدیک به هم می‌باشد. خصوصیات ماده مرکب در صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی با بستر الاستیک در جدول 1 آمده است [19].

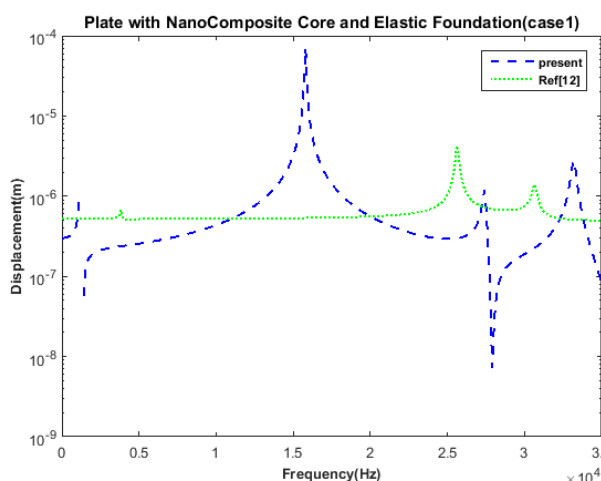


Fig 6 Displacement of a composite plate reinforced by carbon nanotube caused by disturbance force (case1)

شکل 6 جابجایی صفحه کامپوزیتی مجهز شده به نانولوله های کربنی در اثر تحریک نیروی اغتشاشی(حالت 1)

همان طور که از شکل 6 مشخص است میزان جابجایی صفحه ساندویچی نسبت به صفحه آلومینیومی بسیار کم می‌باشد. دلیل این استحکام استفاده از کامپوزیت با نانولوله های کربنی در ساختارهای صفحه ساندویچی می‌باشد که میزان عدد مدول یانگ بالا ذرات نانو کربن در جدول 1 گویای این مطلب است. همچنین در جدول 4 مقایسه ای میان مقاله حاضر و مرجع [12] در 3 نقطه فرکانسی اول صورت گرفته است که نشان از نزدیکی دامنه نوسانات صفحه آلومینیومی با صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله های کربنی دارد. پس می‌توان با انتخاب ساختارهای کامپوزیتی با وزن به مراتب کمتر نسبت به صفحه آلیاژی به استحکام برابر و حتی بهتر دست یافت.

جدول 4 مقایسه میزان جابجایی صفحه کامپوزیتی و آلومینیومی در حالت (1)

Table 4 the comparison of displacement in the aluminum plate and composite plate in case1

مقاله حاضر	مود اول (Hz)	جابجایی اول (m)	مود دوم (Hz)	جابجایی دوم (m)	مود سوم (Hz)	جابجایی سوم (m)
مرجع [12]	4700	$6.14 * 10^{-6}$	5000	$7.67 * 10^{-7}$	31300	$2.1 * 10^{-4}$
	2200	$1.77 * 10^{-6}$	2500	$1.35 * 10^{-6}$	19100	$1.87 * 10^{-5}$

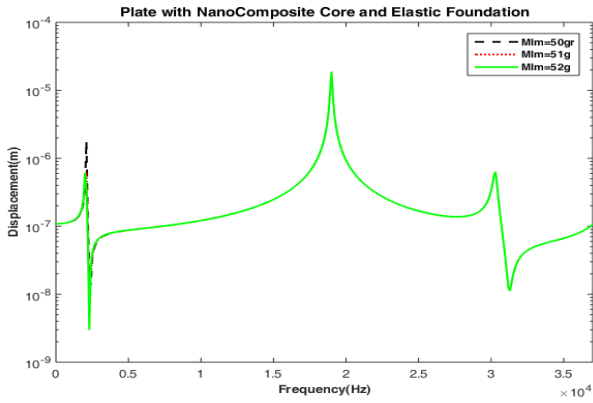


Fig 12 Robust performance of the system against lumped mass weight uncertainty

شکل 12 رفتار مقاوم سیستم در مقابل عدم قطعیت جرم جسم متمرکز

پارامتر تغییرات نسبت طول به عرض صفحه (a/b) یک پارامتر مهم در میزان استحکام یک صفحه می‌باشد با افزایش نسبت (a/b) مطابق شکل 13 از استحکام صفحه کاسته شده است. علت این کاهش را می‌توان در افزایش فرکانس‌های طبیعی صفحه مشخص نمود. در جدول 5 این تغییرات به صورت عددی قابل مشاهده می‌باشد.

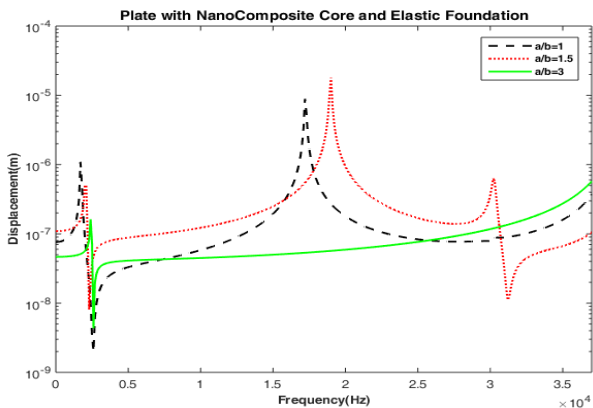


Fig 13 the ratio of length to width variation in a composite plate

شکل 13 نسبت تغییرات طول به عرض صفحه کامپوزیتی

جدول 5 مقایسه میزان جابجایی صفحه کامپوزیتی با افزایش نسبت طول به عرض

Table 5 Comparison of plate displacement with increase length to width ratio

جابجایی مود اول (m)	مود اول (Hz)	جابجایی مود دوم (m)	مود دوم (Hz)	جابجایی مود اول (m)	مود اول (Hz)	a/b
8.9×10^{-6}	17300	2.01×10^{-9}	2300	1.09×10^{-6}	1800	$a/b = 1$
1.87×10^{-5}	19100	1.35×10^{-8}	2500	1.77×10^{-6}	2200	$a/b = 1.5$
5.8×10^{-6}	39000	1.13×10^{-8}	2700	4.05×10^{-7}	2500	$a/b = 2$

یکی دیگر از عوامل مهم در بهینه سازی پارامترهای کنترلی سیستم تعیین محل قرارگیری وصله های پیزوالکتریک می‌باشد. برای این منظور سه وضعیت متقارن، واگرا و همگرا بررسی شده است که با رنگ های مشکی، سبز و قرمز به ترتیب در شکل 14 مشخص شده اند.

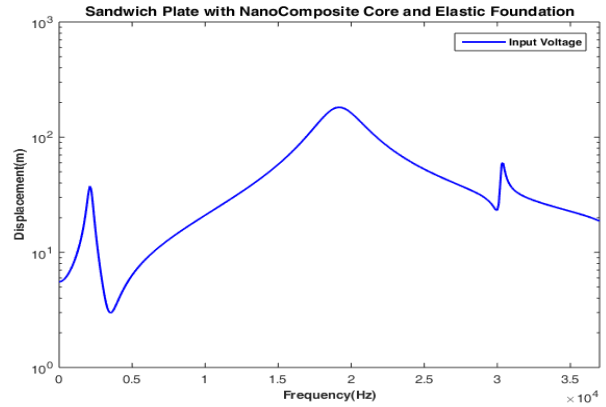


Fig 9 Actuator voltage frequency response

شکل 9 پاسخ فرکانسی ولتاژ عملگر به عنوان ورودی کنترلی

سیستم مورد نظر دارای ماتریس مقادیر ویژه در سمت چپ محور موهومی می‌باشد پس از پایداری ذاتی برخوردار است برای درک بهتر این مساله در شکل 10، شکل 11 و شکل 12 رفتار سیستم با وجود عدم قطعیت در موقعیت اعمال نیرو و جسم متمرکز تا 4 میلی متر تیرانس نسبت به موقعیت اصلی و همچنین عدم قطعیت در جرم جسم متمرکز نشان داده شده است و رفتار مقاوم ذاتی سیستم دیده می‌شود.

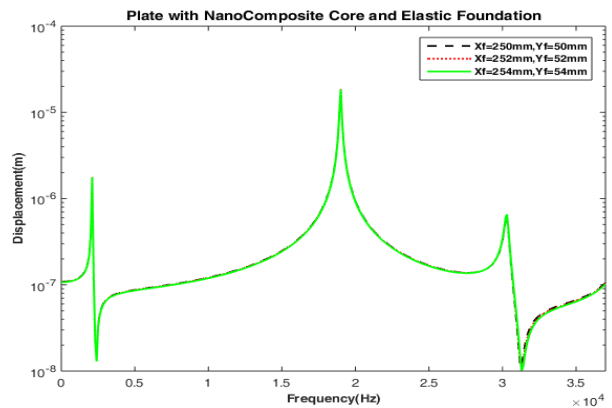


Fig10 Robust performance of the system against the disturbance force place uncertainty

شکل 10 رفتار مقاوم سیستم در مقابل عدم قطعیت مکانی نیروی اغتشاش خارجی

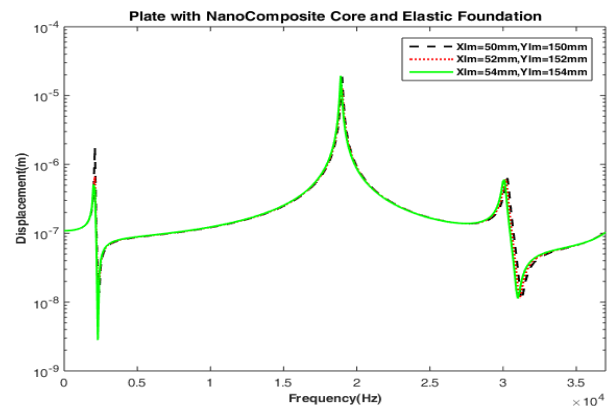


Fig 11 Robust performance of the system against lumped mass place uncertainty

شکل 11 رفتار مقاوم سیستم در مقابل عدم قطعیت مکانی جسم متمرکز

$$V_{NT}(z) = \begin{cases} V_{NT}^* & UD \\ \left(1 + \frac{2z}{h}\right) V_{NT}^* & FG - V \\ 2 \left(1 - \frac{|2z|}{h}\right) V_{NT}^* & FG - O \\ 2 \frac{|2z|}{h} V_{NT}^* & FG - X \end{cases} \quad (53)$$

پارامتر h ضخامت ورق در راستای محور z می‌باشد و پارامتر V_{NT}^* طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{NT}^* = \frac{M_{NT}}{M_{NT} + (\rho^{NT}/\rho^m) - (\rho^{NT}/\rho^m)M_{NT}} \quad (54)$$

پارامترهای M_{NT} ، ρ^{NT} و ρ^m در رابطه فوق به ترتیب درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، چگالی نانولوله‌ها و ماتریس می‌باشند. پس به جای رابطه (1-f) می‌توان رابطه (53) را جایگزین نمود.

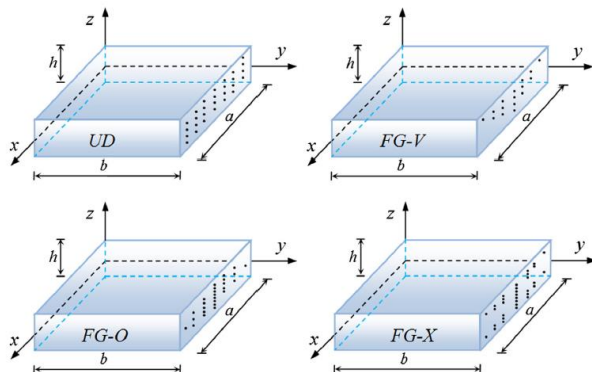


Fig 16 Distribution types of carbon nanotubes in composite plate
شکل 16 انواع توزیع نانولوله‌های کربنی در صفحه کامپوزیتی

همان طور که در شکل 17 مشخص است توزیع متقارن نانولوله‌های کربنی در ورق کامپوزیتی باعث کاهش نوسانات گشته در حالی که توزیع نانولوله‌ها به صورت تجمعی در مرکز و کاستن از میزان آن‌ها در بالایی و پایینی باعث افزایش نوسانات گشته است. نمودارهای توزیعی تجمعی در بالا و تجمعی در بالا و پایین رفتارهای نزدیک به هم داشته‌اند و تقریباً از یک میزان جابجایی برخوردارند که نشان از نزدیکی ساختار این دو به هم دارد.

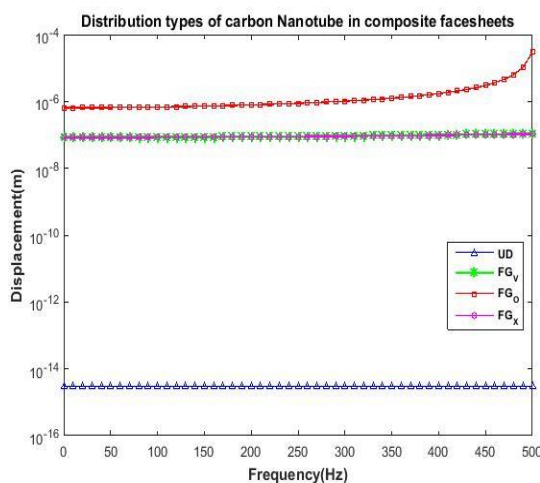


Fig17 Effects of SWCNT distribution types on the vibration of composite plate

شکل 17 اثر نوع توزیع نانولوله‌های کربنی در میزان نوسانات ورق کامپوزیتی

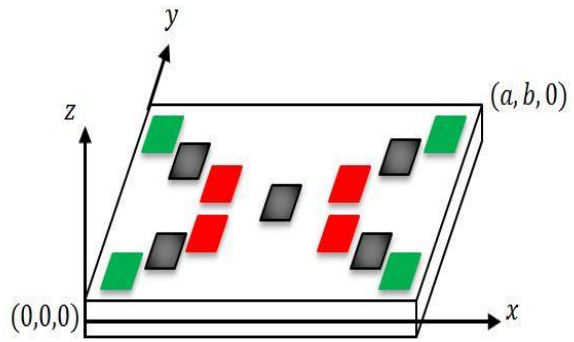


Fig 14 the layout of piezoelectric patches in the three symmetric, convergence and divergence position

شکل 14 محل قرار گیری سنسورها و عملگرها در سه وضعیت مختلف متقارن، واگرا و همگرا

با توجه به قرار گیری سنسورها و عملگرها و موقعیتشان نسبت به عوامل تحریک، حالت واگرا دارای کمترین میزان جابجایی است که در شکل 15 مشاهده می‌شود. علت این امر به صورت شهودی نیز قابل درک است زیرا معادلات پایه سیستم برای یک ورق با تکیه گاه ساده در نظر گرفته شده است که در گوشه‌ها کمترین میزان تنش و جابجایی وجود دارد و لذا حالت واگرا به علت نزدیکی عملگر به تکیه گاه‌ها کمترین میزان تحریک را دارا می‌باشد.

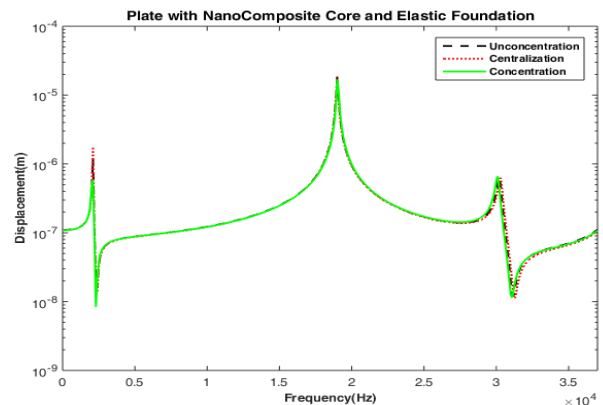


Fig 15 Displacement of the plate against the position variation of piezoelectric patches

شکل 15 جابجایی نسبت به تغییر موقعیت سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک

6- توزیع نانولوله‌های کربنی در ساختار ورق‌های کامپوزیتی

یکی از مسائل مهم در افزایش خصوصیات مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی مجهز شده به نانولوله‌های کربنی نحوه چیدمان نانولوله‌ها در ساختار ورق در راستای محور z می‌باشد. از متداول‌ترین توزیع‌های نانولوله‌ها موارد زیر را می‌توان نام برد: توزیع متقارن 1، تجمعی در بالا 2، تجمعی در وسط 3 و تجمعی در بالا و پایین 4 که در شکل 16 نشان داده شده است. نحوه توزیع نانولوله‌ها مشخص کننده درصد حجمی ماتریس در ساختارهای کامپوزیتی است که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [24,25]:

¹ Uniform distribution
² Functionally graded in top (FG_V)
³ Functionally graded in center (FG_O)
⁴ Functionally graded in top and button (FG_X)

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}\sin^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{22}\cos^4\theta$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{66}(\sin^4\theta + \cos^4\theta)$$

$$\bar{Q}_{44} = Q_{44}, \bar{Q}_{55} = Q_{55}$$

با افزایش پارامتر θ از 30 تا 45 درجه میزان جابجایی ورق کامپوزیتی کاهش یافته است که این قضیه در میزان پارامترهای سختی ورق بسیار مشهود می‌باشد. وجود ضریب جمله سینوسی در کسینوسی در رابطه (57) باعث می‌شود بیشترین مقدار تابع با مشتق‌گیری از آن در زاویه 45 درجه اتفاق افتد.

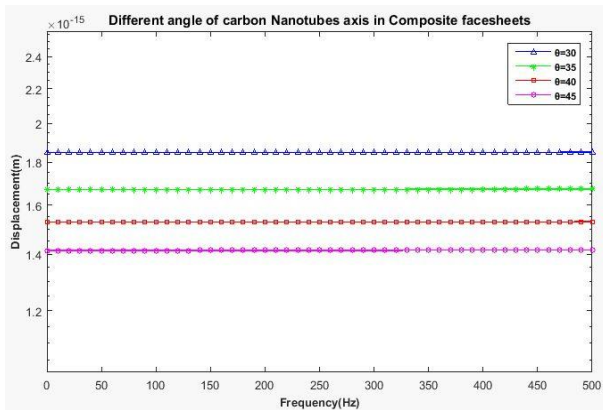


Fig 19 Effects angle of carbon nanotubes on the composite plate vibration

شکل 19 اثرات زاویه نانولوله‌های کربنی بر روی نوسانات ورق کامپوزیتی

9- نتیجه گیری

در این مقاله، معادلات صفحه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی به کمک روش شکل مود ارتعاشی (تفکیک بعد مکان از زمان سیستم) و به کارگیری روش نایبر برای شرایط مرزی چهار طرف تکیه گاه ساده و با جایگذاری معادلات بدست آمده از تحلیل انرژی صفحه، جسم متمرکز و وصله‌های پیروالکترونیک در رابطه لاگرانژ استخراج می‌شود.

جایگزینی صفحات کامپوزیتی در ساختار و اسکلت اصلی ماهواره‌ها به دلیل کاهش جرم و عدم تغییر در استحکام آن و استفاده از ساختارهای کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی باعث افزایش استحکام صفحات است. از جمله نیروهای اغتشاشی تاثیرگذار بر روی صفحات خورشیدی، نیروهای آیرودینامیکی و تشعشعات خورشیدی است که از مرتبه 10^{-4}N.m می‌باشند. در این مقاله پس از پیاده سازی معادلات دینامیکی صفحه با بستر الاستیک بر اساس رابطه لاگرانژ و بیان مدل دقیق از رفتار و خواص پیروالکترونیک‌ها، معادلات خطی می‌شوند. تحلیل رفتاری صفحه نانو کامپوزیتی کربنی با بستر الاستیک باعث افزایش استحکام ذاتی آن در برابر انواع عدم قطعیت می‌شود.

طراحی کنترل کننده LQR باعث افزایش پایداری، بهبود رفتار سیستم و رسیدن به سطح مقبول جابجایی در صفحه را فراهم نموده است.

در ضمن اثرات انواع توزیع نانولوله‌های کربنی از جمله توزیع‌های متقارن، متمرکز در وسط و تمرکز در بالا و پایین صفحه در نوسانات ورق بررسی شده و بهترین جواب مطلوب از توزیع متقارن بدست آمده است. همچنین هندسه

7- اثر هندسه نانولوله‌های کربنی در ارتعاشات ورق کامپوزیتی

با در نظر گرفتن فرم استوانه‌ای برای نانولوله‌های کربنی می‌توان اثر قطر، طول و ضخامت آن را بر ارتعاشات ورق کامپوزیتی بررسی نمود. رابطه اصلی میان خصوصیات هندسی نانولوله‌های کربنی و ماژول یانگ ماتریس طبق مرجع [26,27] به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_{11}^m = \frac{3}{8} \left[(1 + 2(l/d)) \frac{E_{NT}/E_{EPOXY} - d/4t}{E_{NT}/E_{EPOXY} + l/2t} \varphi_{NT} \right] * \left(1 - \frac{E_{NT}/E_{EPOXY} - d/4t}{E_{NT}/E_{EPOXY} + l/2t} \varphi_{NT} E_{EPOXY} \right) + \frac{5}{8} \left[(1 + 2 \frac{E_{NT}/E_{EPOXY} - d/4t}{E_{NT}/E_{EPOXY} + l/2t} \varphi_{NT}) * (1 - (\frac{E_{NT}/E_{EPOXY} - d/4t}{E_{NT}/E_{EPOXY} + d/2t} \varphi_{NT})^{-1} E_{EPOXY}) \right] \quad (55)$$

پارامترهای E_{EPOXY} و E_{NT} به ترتیب ماژول یانگ نانولوله‌ها و چسب و پارامترهای d ، l و t به ترتیب قطر، طول و ضخامت نانولوله‌ها بوده که ضخامت نانولوله و طول آن 2.5 و 100 نانومتر در نظر گرفته شده اند. پارامتر φ_{NT} درصد حجمی از نانولوله بوده که طبق رابطه (56) بدست می‌آید.

$$\varphi_{NT} = \frac{1}{(\rho_{NT}/\rho_{EPOXY})(M^{EPOXY}/M^{NT}) + 1} \quad (56)$$

همانطور که در شکل 18 مشخص است با افزایش نسبت قطر به طول نانولوله‌ها میزان جابجایی ورق افزایش یافته است. مقدار ماژول یانگ نانولوله‌ها و چسب به ترتیب 400 و 3.1 گیگا پاسکال در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

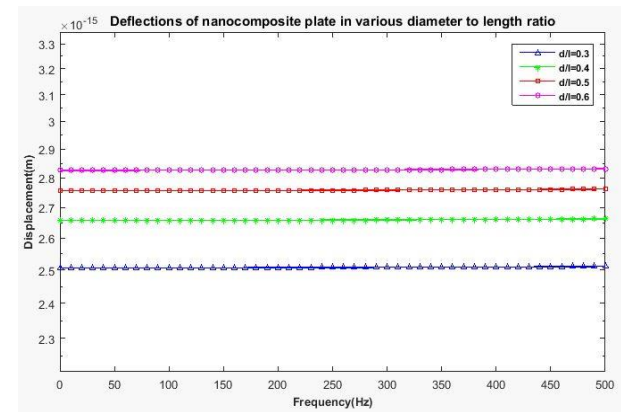


Fig 18 The displacement of composite plate reinforced by carbon nanotube in various diameters to length ratio

شکل 18 جابجایی صفحه کامپوزیتی مجهز شده با نانوتیوب‌های کربنی در انواع نسبت قطر به طول

8- اثر جهت دهی نانولوله‌های کربنی بر ارتعاشات ورق

جهت دهی نانولوله‌های کربنی در ساختارهای کامپوزیتی را می‌توان با اضافه کردن پارامتر θ در نظر گرفت که اختلاف زاویه محور نانولوله با صفحه کامپوزیتی می‌باشد که اثر این پارامتر در رابطه (57) مشخص است و با جایگذاری رابطه (5) در رابطه زیر فرم جدید ثوابت سفتی با در نظر گرفتن جهت دهی نانولوله‌ها بدست می‌آید [28,29].

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}\cos^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{22}\sin^4\theta$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{12}(\sin^4\theta + \cos^4\theta) \quad (57)$$

- [15] Marynowski, K., "Dynamic analysis of an axially moving sandwich beam with viscoelastic core", *Composite Structures*, 94(9): p. 2931-2936, 2012.
- [16] Mohammadimehr, M., B. Navi, and A. Ghorbanpour Arani, "Dynamic stability of MSGT sinusoidal viscoelastic piezoelectric polymeric FG-SWNT reinforced nanocomposite plate considering surface stress and agglomeration effects under hydro-thermo-electro-magneto-mechanical loadings", 24 (6): p. 1325-1342, (2017).
- [17] Han, Y. and J. Elliott, "Molecular dynamics simulations of the elastic properties of polymer/carbon nanotube composites", *Computational Materials Science*. 39(2): p. 315-323, 2007.
- [18] Malekzadeh, M., A. Naghash, and H.A. Talebi, "Robust attitude and vibration control of a nonlinear flexible spacecraft", *Asian Journal of Control*, 14(2): p. 553-563, 2012.
- [19] Mohammadimehr, M., BabaAkbar Zarei, H., Parakandeh, A., and Ghorbanpour Arani, A., "Vibration analysis of double-bonded sandwich microplates with nanocomposite facesheets reinforced by symmetric and un-symmetric distributions of nanotubes under multi physical fields", 64(3): 361-379, 2017.
- [20] Aglietti, G.S., et al., "Model building and verification for active control of microvibrations with probabilistic assessment of the effects of uncertainties", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 218(4): p. 389-399, 2004.
- [21] Aglietti, G.S., et al., "An efficient model of an equipment loaded panel for active control design studies", *The Journal of the Acoustical Society of America*. 108(4): p. 1663-1673, 2000.
- [22] Qiu, Z. and D. Ling, "Finite element modeling and robust vibration control of two-hinged plate using bonded piezoelectric sensors and actuators", *Acta Mechanica Solida Sinica*, 27(2): p. 146-161, 2014.
- [23] Mojabi, S., Kheirikhah, M.M., "Modeling and intelligent control of vibration of cantilever composite plate embedded with shape memory alloy wires" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 363-374, 2017.
- [24] Mohammadimehr, M., Salemi, M., Rousta, B. Navi, "Bending, buckling, and free vibration analysis of MSGT microcomposite Reddy plate reinforced by FG-SWCNTs with temperature-dependent material properties under hydro-thermo-mechanical loadings using DQM", *Composite Structures*, 138 (2016) 361-380.
- [25] Zhang, L.W., Song, Z.G., Liew, K.M." State-space Levy method for vibration analysis of FG-CNT composite plates subjected to in-plane loads based on higher-order shear deformation theory", *Composite Structures*, 134, 2015, 989-1003.
- [26] Mohammadimehr, M., Mohammadi-Dehabadi, A.A., Akhavan Alavi 1, K. Alambeigi 1, M. Bamdad 1, R. Yazdani, S.M. and Hanifehlo, S. "Bending, buckling, and free vibration analyses of carbon nanotube reinforced composite beams and experimental tensile test to obtain the mechanical properties of nanocomposite Steel and Composite Structures, Vol. 29, No. 3, 2018, 405-422. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2018.29.3.405>
- [27] Kamal Sharma and Mukul Shukla, "Three-Phase Carbon Fiber Amine Functionalized Carbon Nanotubes Epoxy Composite: Processing, Characterisation, and Multiscale Modeling", *Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials Volume 2014*, Article ID 837492, 10 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/837492>.
- [28] Mohammadimehr, M.M., Mehrabi, M., Hadizadeh, H., "Surface and size dependent effects on static, buckling, and vibration of micro composite beam under thermo-magnetic fields based on strain gradient theory", *Steel and Composite Structures*, Vol. 26, No. 4, 2018, 513-531.
- [29] Yang, J., Xiong, J., Zhang L.M., Wang, X., "Study on vibration damping of composite sandwich cylindrical shell with pyramidal truss-like cores", *Composite Structures* 117, 2014, 362-372.
- و جهت دهی نانولوله‌ها تاثیر بسزایی در نوسانات ورق خواهد داشت. تاثیر این پارامترها به علت اثر گذاری مستقیم در پارامتر مدول یانگ می‌باشد که مشخص کننده خصوصیت اصلی فیزیکی ورق کامپوزیتی می‌باشد.

10- تشکر و قدردانی

از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو و از معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان طی قراردادی به شماره 891238/4 به خاطر حمایت مالی تشکر و قدردانی می‌شود.

11- مراجع

- [1] Khorshidi, K., Siahpoush, A., Falah, A., "Electro-Mechanical free vibrations analysis of composite rectangular piezoelectric nanoplate using modified shear deformation theories" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 2, pp. 151-160, 2017.
- [2] Marinangeli, L., Alijani, F., and Hosseinia, S.H., "Fractional-order positive position feedback compensator for active vibration control of a smart composite plate", *Journal of Sound and Vibration*, No. 412, pp. 1-16, 2018.
- [3] Kumar, K.R. and Narayanan, S., "Active vibration control of beams with optimal placement of piezoelectric sensor/actuator pairs", *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 5, pp. 055008, 2008.
- [4] Chhabra, D., Chandna, P. and Bhushan, G., "Design and Analysis of Smart Structures for Active Vibration Control using Piezo-Crystals", Vol. 1., 2011.
- [5] Lin, H. and Cao, D.Q., "A unified Gram-Schmidt-Ritz formulation for vibration and active flutter control analysis of honeycomb sandwich plate with general elastic support". Vol. 20. , 2000.
- [6] Hosseini, S., Shariyat, M., " Dynamic response of composite sandwich plates reinforced by SMA wires under low-velocity impact, based on a new higher-order hyperbolic global-local theory", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, 2019.
- [7] Alibeigloo, A., Shakeri, M., and Kari, M.R., "Free vibration analysis of antisymmetric laminated rectangular plates with distributed patch mass using third-order shear deformation theory". *Ocean Engineering*, 35(2): p. 183-190, 2008.
- [8] Mohammadimehr, M. and R. Rostami, "Bending and vibration analyses of a rotating sandwich cylindrical shell considering nanocomposite core and piezoelectric layers subjected to thermal and magnetic fields", *Applied Mathematics and Mechanics*, 39(2): p. 219-240, 2018.
- [9] Mohammadimehr, M., A.A. Monajemi, and H. Afshari, "Free and forced vibration analysis of viscoelastic damped FG-CNT reinforced micro composite beams", *Microsystem Technologies*, 2017.
- [10] Selim, B.A., L.W. Zhang, and K.M. Liew, "Active vibration control of CNT-reinforced composite plates with piezoelectric layers based on Reddy's higher-order shear deformation theory", *Composite Structures*, 163: p. 350-364, 2017.
- [11] Shen, H.-S. and Y. Xiang, "Nonlinear vibration of nanotube-reinforced composite cylindrical shells in thermal environments", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 213-216: p. 196-205, 2012.
- [12] Aglietti, G., Gabriel, S.B., Langley, R.S., Rogers, E., "A Modeling Technique for Active Control Design Studies with Application to Spacecraft Microvibrations", Vol. 102. 2158-66, 1997.
- [13] Aglietti, G., et al., "Modelling and feedback control of microvibration", 2002.
- [14] Nadirian, N., H. Biglari, and M.A. Hamed, "LQG vibration control of sandwich beams with transversely flexible core equipped with piezoelectric patches", *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, 7(1): p. 85-97 , 2017.



مطالعه المان محدود رفتار چسبندگی الیاف از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با بتن پلیمری

امیر ابراهیم اکبری بقال¹، احمد ملکی^{2*}، رامین وفاپوری سرخابی³

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه.

2- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه.

3- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

* مراغه، صندوق پستی 55197-00634، A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در تحقیق حاضر با استفاده از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود، رفتار بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی از بتن پلیمری مطالعه می‌شود. جهت انجام شبیه‌سازی‌ها از روش المان محدود سه‌بعدی استفاده شده و رفتار سوپرلاستیک الیاف حافظه‌دار شکلی توسط سابروتین یومت در نرم‌افزار آباکوس تعریف می‌شود. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌تر، اندرکنش الیاف و بتن با استفاده از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک شبیه‌سازی شده که پارامترهای آن با استفاده از روش المان محدود معکوس و استفاده از نتایج تست تجربی انجام پذیرفته بر روی یک نمونه الیاف به دست آمده است. پس از صحت‌سنجی نتایج با استفاده از تست‌های تجربی، تأثیر قطر و طول مدفون شدگی بر رفتار چسبندگی این نوع الیاف با بتن مطالعه شده است. در نهایت، به منظور بررسی عملکرد الیاف حافظه‌دار شکلی، رفتار بیرون کشیدگی این نوع الیاف با الیاف فولادی متناظر نیز مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد برای الیاف با قطر 0.5mm، با افزایش طول مدفون شدگی از 10mm به 30mm نیروی بیرون کشیدگی برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی به ترتیب در حدود 17% و 12% افزایش می‌یابد. بر این اساس، مشاهده می‌شود که استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی پارامترهای مؤثر بیرون کشیدگی الیاف از بتن را تا حد قابل توجهی بهبود می‌بخشد که علت این امر را می‌توان در نیروهای چسبندگی سطحی قوی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن دانست.

دریافت: 1399/03/18

پذیرش: 1399/05/14

کلیدواژه‌ها:

الیاف حافظه‌دار شکلی،
رفتار بیرون کشیدگی،
بتن، المان محدود،
نیروی چسبندگی

Finite Element Analysis of the Adhesive behavior of Shape Memory Alloy Fiber and Polymer Concrete

Amir Ebrahim Akbari Baghal¹, Ahmad Maleki^{1*}, Ramin Vafaeipour Sorkhabi²

1- Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

* P.O.B. 55197-00634, Maragheh, A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

Keywords

Shape memory alloy fibers,
Pullout behavior,
Concrete,
Finite element method,
Adhesive force.

Abstract

In the present study, the pullout behavior of shape memory alloy fibers and concrete was studied. To perform the simulations, a three-dimensional finite element method was used and the supralastic behavior of shape memory fibers was defined using UMAT subroutine in ABAQUS software. In order to consider more realistic assumptions, the interaction between fibers and concrete has been simulated using the concept of transitional area of the contact surface. The contact surface parameters were obtained using the inverse finite element method and experimental test data performed on a fiber sample. After validating the results using experimental testing, the effect of diameter parameters and embedded length on the adhesive behavior of this type of fiber with concrete has been studied. Finally, in order to evaluate the performance of shape memory fiber fibers, the pullout behavior of this type of fiber has been compared with the corresponding steel fibers. The results show that for fibers with a diameter of 0.5 mm, with increasing the embedded length from 10 mm to 30 mm, the pullout strength for SMA and steel fibers increases by about 17% and 12%, respectively. Based on this, it was observed that the use of shape memory fibers significantly improves the effective pullout parameters of fiber from concrete, which can be attributed to the strong surface adhesion forces between shape memory fibers and concrete.

1- مقدمه

تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف یکی از بهترین روش‌ها به منظور بهبود خواص شکنندگی بتن، استحکام خمشی، استحکام کششی و قابلیت جذب انرژی بتن می‌باشد [6-8]. این بهبود خواص مکانیکی با ایجاد رفتار سخت‌شوندگی کرنش در مخلوط بتن-الیاف حاصل می‌شود و جنس مواد، شکل و ضریب لاغری الیاف مورد استفاده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص

با توجه به اینکه بتن و ملات سیمان عمدتاً دارای رفتاری ترد و شکننده بوده و در مقابل نیروهای کششی بسیار ضعیف هستند، بنابراین در سال‌های اخیر به‌کارگیری روش‌ها و افزودنی‌های مختلف مانند استفاده از نانو مواد، مواد پلیمری و الیاف در بهبود ضعف‌های بتن مورد توجه گرفته است [1-5]. نتایج

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Akbari Baghal, A.E., Maleki, A., Vafaeipour Sorkhabi, R., "Finite Element Analysis of the Adhesive behavior of Shape Memory Alloy Fiber and Polymer Concrete", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1255-1262, 2021.

مکانیکی بتن‌های تقویت شده با الیاف دارد. به عنوان مثال، استفاده از الیاف فولادی حداکثر استحکام فشاری و کششی بتن تقویت شده با الیاف را به مقادیری بیشتر از 292 مگاپاسکال و 37 مگاپاسکال می‌رساند که در حدود 5-10 برابر بیشتر از مشخصات بتن معمولی بدون الیاف فولادی می‌باشد [9]. بنابراین در سال‌های اخیر، تأثیر الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن توسط محققان بسیاری مطالعه شده است. عبدالله و همکاران [10] در یک مطالعه مروری به بررسی برخی از مطالعات انجام شده در زمینه رفتار چسبندگی الیاف فولادی با بتن پرداختند و نشان دادند که پارامترهایی مانند نوع الیاف، کسر حجمی، طول مدفون شدگی، هندسه الیاف و جهت الیاف بر خواص چسبندگی الیاف با بتن تأثیرگذار می‌باشد. بر اساس مطالعه آنها عمدتاً دو مکانیزم مختلف چسبندگی بین ماتریس و الیاف شامل رفتار چسبندگی شیمیایی¹ و اثر اصطکاک در سطح تماس در نتیجه مدفون شدگی الیاف در داخل بتن، بیشترین تأثیر را بر تقویت مشخصات مکانیکی بتن دارند. مکانیزم اول عمدتاً توسط خواص ناحیه انتقالی سطح مشترک² تعریف می‌شود که به مشخصات سطح الیاف و واکنش شیمیایی الیاف با ماتریس بستگی دارد [11-13] و مکانیزم دوم وابستگی زیادی به شکل هندسی الیاف دارد. عبدالله و ریس [14] به مقایسه رفتار بیرون کشیدگی انواع مختلف الیاف هوک شکل از بتن معمولی پرداختند. الیس و همکاران [15] با استفاده از مدل المان محدود تأثیر شکل هندسی الیاف را بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی مطالعه کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که استفاده از الیاف دارای تاب³ حداکثر نیروی بیرون کشیدگی را 5 برابر و انرژی مورد نیاز را 10 برابر نسبت به استفاده از الیاف مستقیم افزایش می‌دهد. الوان و همکاران [16] با استفاده از مدل تحلیلی به پیش‌بینی رابطه‌ای برای نیروی بیرون کشیدگی برحسب لغزش الیاف فولادی هوک شکل پرداختند. یو و کیم [17] رفتار بیرون کشیدگی انواع مختلف الیاف فولادی با هندسه‌های مستقیم، هوک، پیچشی⁴ و خمیده از بتن را مطالعه کرده و نشان دادند که تأثیر هندسه الیاف بر افزایش مقاومت بیرون کشیدگی عبارت است از: هوک، پیچشی، خمیده و مستقیم. کوها و همکاران [18] نشان دادند که الیاف هوک رفتاری متفاوت نسبت به الیاف مستقیم دارند و استفاده از الیاف هوک شکل باعث افزایش 4.5 برابری در حداکثر نیروی بیرون کشیدگی الیاف از بتن می‌شود. با توسعه مواد نوین مهندسی، استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی در کاربردهای مهندسی به صورت چشمگیری توسعه پیدا است [19-22]. به عنوان، مثال چانگ و همکاران [23] در یک مطالعه مروری به بررسی استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی در کاربردهای عمرانی پرداختند. خلیلی و همکاران [24] به بررسی خواص کششی کامپوزیت زمینه فلزی خودترمیم شونده با زمینه‌ای از جنس آلیاژ قلع-بیسیموت و سیم سوپرالاستیک نیکل-تیتانیوم به صورت تجربی پرداختند و اثر پارامترهای تأثیرگذار در بازده ترمیم شامل کسر حجمی سیم، پیش کرنش و دمای ترمیم، را مورد بررسی قرار دادند. عصفوری و همکاران [21] به بررسی آزمایشگاهی میزان جذب انرژی در چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار در برابر ضربه سرعت پایین پرداختند. فرد و همکاران [25] به ازای درصد‌های وزنی مختلف، رفتار بتن‌های تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار شکلی را بررسی کردند. الم و همکاران [26] به پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای اعضای بتنی تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار شکلی پرداختند.

2- تست تجربی بیرون کشیدگی

در این تحقیق، برای دسترسی به خصوصیات استحکام میان فازی مابین الیاف و ماتریس از جنس بتن پلیمری آزمایش بیرون کشیدگی ترتیب داده شد. تست‌های بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی و الیاف فولادی با استفاده از دستگاه تست کشش یونیورسال دارای ظرفیت 2kN و با دقت 0.5N بر روی نمونه‌های بتن پلیمری حاوی تک الیاف انجام شده است. نمونه بتن پلیمری ساخته شده به صورت مکعب مستطیل بوده و ابعاد آن برابر $25 \times 25 \times 60 \text{ mm}^3$ انتخاب شده است. در شکل 1 نحوه قرارگیری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی در داخل دستگاه نشان داده شده است. نیروی اعمالی به الیاف به صورت جابجایی کنترل و با سرعت 2.5 mm/min می‌باشد. آزمایش زمانی که الیاف به طور کامل بیرون کشیده می‌شود و یا شکستگی اتفاق می‌افتد، متوقف می‌شود و طول الیاف بعد از بیرون کشیدگی و نیروی شکست اندازه‌گیری می‌شود. در شکل 2 منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از نتایج تست تجربی حاصل از بیرون کشیدگی الیاف از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و الیاف فولادی نشان داده شده است.



Fig. 1. Experimental test setup for pullout of SMA and steel fiber
شکل 1 ستاپ آزمایشگاهی برای تست بیرون کشیدگی الیاف فولادی و SMA

¹ Physicochemical Through Adhesion

² Interfacial Transition Zone (ITZ)

³ Twisted Fibers

⁴ Twisted

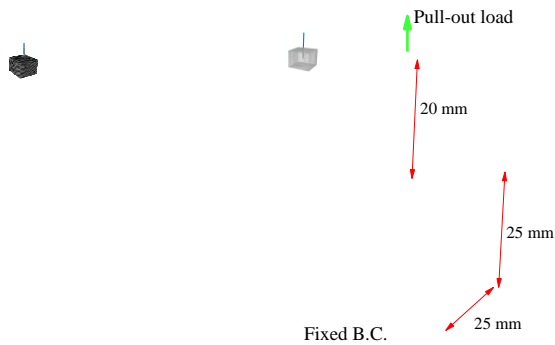


Fig. 3. Finite element model for SMA fiber pullout from concrete
شکل 3 مدل المان محدود تست بیرون کشیدگی یک الیاف حافظه‌دار شکلی از بتن

شکل 4 منحنی تنش-کرنش الیاف حافظه‌دار شکلی استفاده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. به منظور بیان رفتار سوپرااستیک و حافظه‌داری الیاف حافظه‌دار شکلی، مشخصات مکانیکی مصالح بر طبق مدل رفتاری ژو و همکاران [29] می‌باشد. بر اساس این مدل رفتاری، رابطه تنش-کرنش در نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از سابروتین یومت تعریف گردیده است. پارامترهای مورد نیاز برای این مصالح عبارتند از: مدول یانگ برای دو فاز آستینیت و مارتنزیت، تنش شروع فاز آستینیت به مارتنزیت (σ_s^{AS})، تنش پایان فاز آستینیت به مارتنزیت (σ_f^{AS})، تنش شروع فاز مارتنزیت به آستینیت (σ_s^{SA})، تنش پایان فاز مارتنزیت به آستینیت (σ_f^{SA})، و طول کرنش مسطح فوق ارتجاعی (ϵ_L). جدول 1 بیانگر خصوصیات رفتاری مورد نیاز ناینتول جهت مدل‌سازی آن در نرم‌افزار می‌باشد.

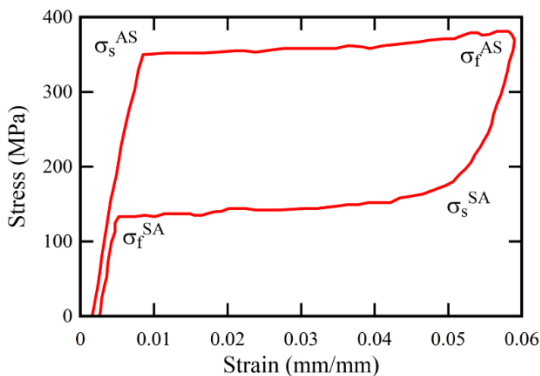


Fig. 4. Stress-strain curve of the used SMA fiber
شکل 4 منحنی تنش-کرنش الیاف حافظه‌دار شکلی ناینتول مورد استفاده در تحقیق حاضر

3-3 خواص مکانیکی بتن پلیمری

به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح بتن پلیمری از مدل رفتاری پلاستیسیته تخریب شده بتن² استفاده شده است. پارامترهای موجود در این مدل رفتاری عبارتند از: زاویه اتساع³ λ ، پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک⁴، نسبت مقاومت فشاری دو محوره بتن به مقاومت فشاری تک محوره f_{bo}/f_{co} ، ضریب بارگذاری K_c و

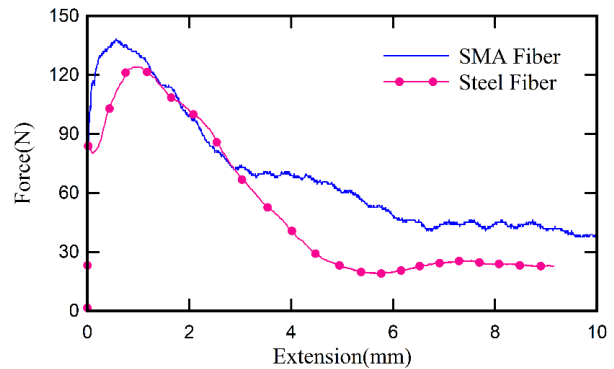


Fig. 2. Experimental load-displacement curve of the SMA and steel fiber

شکل 2 منحنی نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تست تجربی بیرون کشیدگی از بتن الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی

3-3 مدل‌سازی المان محدود

1-3 مشخصات هندسی

در شکل 3 مشخصات هندسی مدل المان محدود به منظور مطالعه بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی از بتن نشان داده شده است. شعاع الیاف حافظه‌دار شکلی برابر r و طول مدفون شدگی آن l می‌باشد. شعاع بتن باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا اثر شرایط مرزی بر رفتار چسبندگی قابل صرف‌نظر کردن باشد، بنابراین ابعاد آن در حدود 20 برابر شعاع الیاف انتخاب شده است. الیاف تحت بارگذاری تک جهته¹ با اعمال جابجایی به انتهای آزاد الیاف قرار گرفته و نیروی ایجاد شده در آن اندازه‌گیری می‌شود. جهت اعمال شرایط مرزی و مقید کردن ماتریس، انتهای پایین نمونه بتنی کاملاً مقید می‌شود. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌تر، مدل المان محدود، هندسه از سه قسمت مختلف بتن، الیاف حافظه‌دار شکلی و ناحیه انتقالی سطح مشترک بین این دو ماده ایجاد شده است. در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی چسبندگی الیاف با بتن از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک استفاده شده و شبیه‌سازی المان محدود بیرون کشیدگی الیاف به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن با استفاده از المان‌های مکعبی C8D3R و به ترتیب با اندازه متوسط $90\mu\text{m}$ و 0.1mm مش‌بندی شده است. سطح مشترک بتن پلیمری و الیاف نیز با استفاده از المان چسب مش‌بندی شده است. لازم به ذکر است که این ابعاد مش پس از بررسی آنالیز حساسیت مش‌بندی انتخاب شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی، مطالعه تأثیر قطر و طول مدفون شدگی الیاف بر مشخصه‌های چسبندگی با بتن می‌باشد، بنابراین تحلیل‌ها به ازای قطرهای 0.5mm ، 1mm و 2mm و طول مدفون شدگی 10mm ، 20mm و 30mm برای دو نوع الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی انجام پذیرفته است.

2-3 خواص مکانیکی الیاف حافظه‌دار شکلی

آلیاژ حافظه‌دار شکلی استفاده شده در این تحقیق از نوع آلیاژ حافظه‌دار نایتنول با درصد وزنی 50.8 درصد نیکل و 49.2 درصد تیتانیوم ساخت شرکت دیادو ژاپن می‌باشد.

¹ Uniaxial Tension

² Concrete Damage Plasticity (CDP)

³ Dilation Angle

⁴ Plastic Potential Eccentricity

تمامی مکانیزم‌های ساختار مایکرو و فرایند شکست را می‌توان به وسیله سه پارامتر مورد توجه قرار داد: تنش ماکزیمم برشی یا استحکام ناحیه چسبنده (τ_{max})، حداکثر کرنش جدایش بحرانی S_{max} ، که به ازای مقادیر بیشتر از آن سطح چسبنده ظرفیت تحمل تنش خود را از دست داده و ترک رشد می‌کند، (با δ_n یعنی جدایش در نقطه تنش ماکزیمم) و پارامتر n که نشان دهنده تغییرات نمایی بخش ناحیه شکست می‌باشد. علاوه بر این، G_c که انرژی جدایش می‌باشد نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مدل ناحیه چسبنده می‌باشد. با توجه به اینکه در مسأله حاضر، بارگذاری روی الیاف به صورت مود ترکیبی می‌باشد بنابراین، هر دو مؤلفه تنش‌های مماسی و عمودی تماس در انرژی شکست مشارکت دارند و رابطه توانی انرژی شکست به صورت زیر می‌باشد:

$$\left(\frac{G_n}{G_{cn}}\right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_{ct}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

که در آن G_t و G_n به ترتیب، انرژی‌های شکست عمودی و مماسی می‌باشند و برابر با مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی هستند که از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$G_n = \int_0^{\delta_c} \sigma_n(\delta) d\delta \quad (2)$$

$$G_t = \int_0^{\delta_c} \tau_t(\delta) d\delta \quad (3)$$

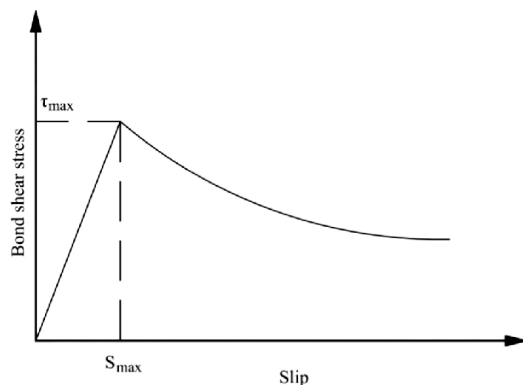


Fig. 5. Cohesive zone bond shear stress via slip

شکل 5 تغییرات تنش برشی ناحیه چسبندگی بر حسب میزان لغزش

در تحقیق حاضر، پارامترهای قانون تنش-جدایش مبتنی بر مدل نمایی مورد استفاده در مدل المان محدود که شامل تنش استحکام ناحیه چسبنده، حداکثر کرنش جدایش بحرانی، پارامتر n که نشان دهنده تغییرات نمایی بخش ناحیه شکست هستند، از نتایج تست تجربی بیرون کشیدگی انجام پذیرفته بر روی نمونه‌های بتن پلیمری که در بخش 2 جزئیات آن ذکر شده، به دست آمده است. در ادامه به بررسی نتایج مدل المان محدود بر روی نمونه‌های مختلف پرداخته می‌شود. به منظور رعایت اختصار، نامگذاری نمونه‌ها به صورت A- ϕ B-LC می‌باشد که در آن A=(SMA, Steel) جنس الیاف، B=(0.5mm, 1mm, 2mm) قطر الیاف و C=(10mm, 20mm, 30mm) نشان دهنده طول مدفون شدگی الیاف می‌باشد.

4- بررسی نتایج

1-1 خواص ناحیه چسبنده و اعتبار سنجی مدل عددی

خواص ناحیه چسبنده بین الیاف و بتن پلیمری مورد استفاده در تحقیق حاضر با استفاده از انجام تست بیرون کشیدگی الیاف تعیین شده و سپس به

پارامتر ویسکوزیته که در جدول 2 مشخصات مکانیکی مورد استفاده برای بتن پلیمری نشان داده شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی تاندون‌های NiTi مورد استفاده در تحقیق حاضر [30]

Table 1. Mechanical properties of the used SMA fiber [30]

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته فاز آستینیت، E_a (GPa)	67
تنش شروع تبدیل فاز مستقیم، σ_s^{AS} (MPa)	340
تنش پایان تبدیل فاز مستقیم، σ_f^{AS} (MPa)	342
تنش شروع تبدیل فاز، σ_s^{SA} (MPa)	175
تنش پایان تبدیل فاز معکوس، σ_f^{SA} (MPa)	120
ماکزیمم کرنش قابل بازگشت، ϵ_L	5.90%

مقاومت فشاری با استفاده از آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه مکعبی شکل 5cm×5cm، مدول یانگ با استفاده از آزمون فشاری بر روی نمونه استوانه‌ای با قطر 7.5cm و ارتفاع 15cm تعیین شده است. همچنین، استحکام کششی با استفاده از انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه‌های بریکت به دست آمده است. برای بقیه پارامترهای مورد نیاز نیز از مقادیر پیش‌فرض آنها در نرم‌افزار استفاده شده است.

جدول 2 مشخصات مکانیکی مورد استفاده برای بتن پلیمری

Table 2. Mechanical properties of the used polymer concrete

پارامتر	مقدار
استحکام فشاری، (MPa)	32.9
مدول یانگ، (GPa)	22.45
استحکام کششی، (MPa)	3.32
انرژی شکست، (MPa)	0.07
زاویه اتساع (درجه)	36
پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک	0.1
ضریب بارگذاری	0.67
نسبت مقاومت فشاری دو محوره بتن به مقاومت فشاری تک محوره	1.16

3-4 مدل‌سازی اندرکنش الیاف و بتن پلیمری

برای مدل‌سازی آسیب و پدیده جدایش در ناحیه تماس بین الیاف و بتن پلیمری از تئوری مدل ناحیه چسبنده که بر پایه نمودارهای نیرو-جابجایی هستند، استفاده شده است. در مدل ناحیه چسبنده، رفتار ترک با قانون کشش-جدایش¹ که رابطه بین تنش و جابجایی دو سطح چسبنده را نشان می‌دهد، بیان می‌شود. تعریف خواص مواد در مدل ناحیه چسبنده به دو صورت نمایی و دوخطی انجام می‌پذیرد که هر کدام دارای توابع پتانسیل مربوط به خود هستند. در مقاله حاضر، تحلیل جدایش اتصال الیاف از بتن پلیمری با استفاده از سطوح چسبنده در نرم‌افزار آباکوس انجام می‌شود. رفتار مکانیکی مربوط به سطح تماس با استفاده از قانون تنش-جدایش و مبتنی بر مدل نمایی² آن شبیه‌سازی می‌شود. همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، در غیاب هر نوع خرابی رفتار سطح تماس خطی فرض می‌شود که این رفتار خطی با پیدایش خرابی از بین می‌رود. در این مدل فرض می‌شود که

¹ Traction-separation Law

² Bilinear cohesive zone model

اصطلاحی که به تدریج توزیع تنش‌ها در طول الیاف بیشتر می‌شود. با افزایش بیشتر نیروی اعمالی، سطح تماس الیاف به صورت کامل از بتن کنده شده و الیاف شروع به جدایش کامل از بتن می‌کند. با توجه به توزیع تنش به وجود آمده در الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی که در شکل 7 نشان داده شده است مشاهده می‌شود که حداکثر تنش ایجاد شده در الیاف SMA- ϕ 1-L10 برابر 396MPa و برای الیاف فولادی متناظر برابر 123MPa می‌باشد. این نتایج نیز حاکی از آن است که چسبندگی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن بیشتر از چسبندگی بین الیاف فولادی با بتن می‌باشد. بر این اساس، الیاف حافظه‌دار شکلی باعث بهبود قابل توجهی در تقویت مشخصات بتن تقویت شده با این نوع الیاف خواهد شد.

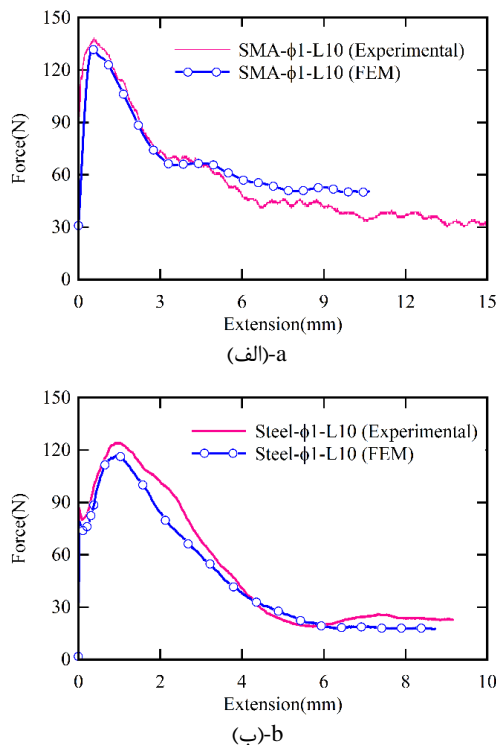


Fig. 6. Finite element and experimental load-slip curve (a) SMA fiber (SMA- ϕ 1-L10 sample) and (b) steel fiber (Steel- ϕ 1-L10 sample)

شکل 6 منحنی نیرو- لغزش مدل نهایی المان محدود و نتایج حاصل از تست تجربی بیرون کشیدگی (الف) الیاف حافظه‌دار شکلی (نمونه SMA- ϕ 1-L10) و (ب) الیاف فولادی (نمونه Steel- ϕ 1-L10)

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر مشخصات هندسی الیاف بر رفتار پیوستگی الیاف و بتن در ادامه منحنی‌های نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف تحت بررسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل‌های 8 و 9 منحنی‌های نیرو-لغزش به ترتیب برای نمونه‌های مختلف الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی تحت بررسی، ارائه شده است.

با بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مشاهده می‌شود که دو پارامتر طول مدفون شدگی و قطر الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر حداکثر نیروی بیرون کشیدگی و جابجایی متناظر دارد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نیروی بیرون کشیدگی برای نمونه‌های SMA- ϕ 1-L10 و Steel- ϕ 1-L10 به ترتیب برابر 119N و 107N به دست می‌آید. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی باعث افزایش حداکثر نیروی

عنوان ورودی به مدل المان محدود مورد استفاده قرار گرفته است. در این بخش با استفاده از تست‌های تجربی انجام شده به تعیین پارامترهای قانون تنش- جدایش بین الیاف و بتن پرداخته می‌شود.

اندرکنش بین الیاف و بتن با استفاده از قید تماسی و تعریف المان‌های چسبنده صورت پذیرفت که پارامترهای مدل ناحیه چسبنده به نحوی تعیین شدند که منحنی نیرو- جابجایی به دست آمده از مدل المان محدود بر نتایج تجربی تست بیرون کشیدگی انجام شده بر روی الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی منطبق باشد. پس از کالیبره کردن نتایج مربوط به تست بیرون کشیدگی، مشخصات رفتاری مدل ناحیه چسبنده مورد استفاده مطابق جدول 3 به دست آمده است.

با استفاده از مقادیر ارائه شده در جدول 3، منحنی نیرو- لغزش مدل المان محدود نهایی و نتایج حاصل از تست تجربی برای الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی با قطر 1mm و طول مدفون شدگی 10mm یعنی نمونه‌های Steel- ϕ 1-L10 و SMA- ϕ 1-L10 در شکل 6 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همپوشانی مطلوبی هم از لحاظ شکل منحنی و هم از لحاظ میزان حداکثر نیروی بیرون کشیدگی نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود برقرار است و حدود 8٪ خطا در حداکثر نیروی بیرون کشیدگی در نمونه آزمایشگاهی نسبت به نمونه المان محدود وجود دارد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که مدل المان محدود با دقت بسیار مناسبی رفتار چسبندگی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن را پیش‌بینی می‌کند و می‌توان با استفاده از آن تأثیر پارامترهای مختلف را مورد مطالعه قرار داد.

بررسی منحنی‌های نیرو-لغزش نشان داده شده در شکل 6 برای الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی نشان می‌دهد که به ازای مشخصات یکسان الیاف، نیروی چسبندگی الیاف حافظه‌دار شکلی بیشتر از الیاف متناظر فولادی می‌باشد. به عنوان نمونه برای الیاف با قطر 1mm و طول مدفون شدگی 10mm، حداکثر نیروی چسبندگی الیاف حافظه‌دار شکلی در حدود 15 درصد بیشتر از الیاف متناظر فولادی است که علت این امر را می‌توان در نیروهای چسبندگی سطحی قوی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن دانست. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مقدار جابجایی مورد نیاز برای جدایش نیز برای الیاف حافظه‌دار شکلی بیشتر از الیاف متناظر فولادی می‌باشد که مقدار جابجایی جدایش برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی با قطر 1mm به ترتیب برابر با 0.85mm و 0.51mm می‌باشد. بنابراین استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی باعث افزایش حدود 40٪ در جابجایی جدایش الیاف می‌شود که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

جدول 3 پارامترهای مدل ناحیه چسبنده به منظور تعریف اندرکنش الیاف حافظه‌دار شکلی و الیاف فولادی با بتن

Table 3. Cohesive zone model parameters used for define the interaction between SMA and steel fiber and concrete

G_c (MPa.mm)	T_{max} (MPa)	δ_{max} (mm)	
0.28	10.85	3×10^{-3}	الیاف حافظه‌دار شکلی
0.23	8.23	2.8×10^{-3}	الیاف فولادی

2-4 بررسی نتایج المان محدود

در شکل 7 توزیع تنش‌های الیاف در آستانه جدایش آنها از بتن برای نمونه‌های SMA- ϕ 1-L10 و Steel- ϕ 1-L10 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در آستانه جدایش الیاف از بتن، قسمت انتهایی الیاف تحت تأثیر تنش‌های بیشتر قرار گرفته و سپس با غلبه بر نیروهای چسبندگی

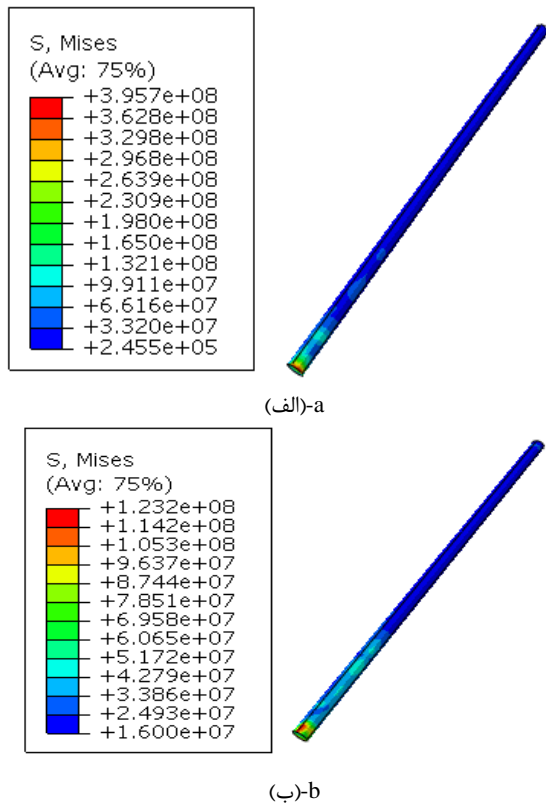


Fig. 7. Pullout stress distribution in fiber (a) SMA fiber (SMA-φ1-L10 sample) and (b) steel fiber (Steel-φ1-L10 sample)

شکل 7 توزیع فون مایسز (پاسکال) تنش در لحظه آستانه جدایش الیاف از بتن (الف) الیاف SMA (نمونه SMA-φ1-L10) و (ب) الیاف فولادی (نمونه Steel-φ1-L10)

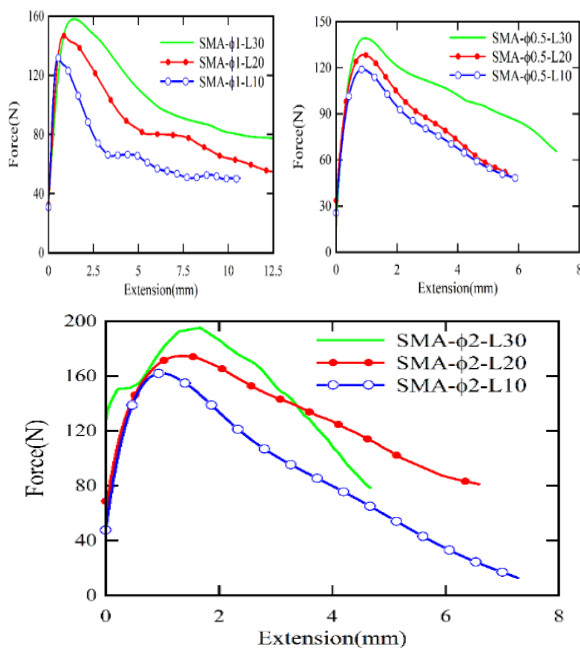


Fig. 8. Load-slip curves for SMA fiber pullout

شکل 8 منحنی نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف الیاف حافظه‌دار شکلی

بیرون کشیدگی در حدود 10 درصد نسبت به الیاف فولادی متناظر می‌شود که این میزان برحسب قطر و عمق مدفون شدگی الیاف متفاوت می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی با قطر 0.5mm با افزایش عمق مدفون شدگی از 10mm به 30mm حداکثر نیروی بیرون کشیدگی به ترتیب در حدود 17 درصد و 12 درصد افزایش می‌یابد. همچنین، به ازای طول مدفون شدگی 10mm با افزایش قطر الیاف از 0.5mm به 2mm حداکثر نیروی بیرون کشیدگی برای الیاف حافظه‌دار شکلی و الیاف فولادی به ترتیب در حدود 28 درصد و 15 درصد افزایش می‌یابد. بر این اساس، می‌توان بیان نمود تأثیر افزایش قطر و طول مدفون شدگی بر تقویت چسبندگی الیاف با بتن برای الیاف حافظه‌دار شکلی بیشتر از الیاف متناظر فولادی می‌باشد.

نتیجه قابل توجهی که از منحنی‌های نیرو-لغزش نمونه SMA-φ2-L30 قابل مشاهده است این می‌باشد که ساز و کار بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی در این شرایط با سایر حالت‌های تحت بررسی متفاوت می‌باشد و در این حالت دو مکانیزم متفاوت برای جدایش بین سطحی این الیاف دیده می‌شود.

مکانیزم اول، جدایش قبل از تبدیل فاز مارتنزیتی و مکانیزم دیگر مربوط به جدایش بعد از تبدیل فاز مارتنزیتی می‌باشد. با توجه به منحنی نیرو-لغزش نشان داده شده در شکل 8 برای نمونه SMA-φ2-L30 مشاهده می‌شود که تا نقطه A جدایش سطحی اتفاق افتاده ولی بعد از آن به علت تبدیل فاز مارتنزیت الیاف حافظه‌دار شکلی به آستینیت، مجدداً تنش‌های چسبندگی سطحی و همچنین استحکام الیاف افزایش یافته و پس از این نقطه با افزایش بیشتر نیرو، چسبندگی برشی بین الیاف و بتن کاهش و الیاف شروع به جدایش از بتن می‌کنند.

بررسی نتایج نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که در حالت‌هایی که چسبندگی برشی به اندازه کافی بزرگ باشد، این تبدیلات فاز الیاف حافظه‌دار شکلی ایجاد می‌شود. تغییر فاز الیاف حافظه‌دار شکلی از مارتنزیت به آستینیت باعث افزایش حداکثر نیروی جدایش شده و برای نمونه SMA-φ2-L30 مقدار این نیرو برای فاز مارتنزیت و آستینیت به ترتیب برابر 151N و 196N می‌باشد.

در شکل 10 توزیع تنش در بتن برای نمونه‌های SMA-φ2-L30 و Steel-φ2-L30 تحت نیروی بیرون کشیدگی 100N نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در این شرایط حداکثر تنش انتقال داده شده به بتن توسط الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی به ترتیب برابر 2.8MPa و 1.8MPa می‌باشد.

علت بیشتر بودن تنش انتقال داده شده به بتن توسط الیاف حافظه‌دار شکلی، بالا بودن چسبندگی این الیاف با بتن می‌باشد. همچنین، با توجه به اینکه مقادیر تنش کمتر از استحکام کششی بتن (3.2MPa مطابق جدول 2) می‌باشند، بنابراین در این حالت جدایش الیاف از بتن در نتیجه شکست از نوع لغزشی می‌باشد. بر این اساس، می‌توان بیان نمود که در صورت استفاده از الیاف با قطر بزرگتر و یا طول مدفون شدگی بیشتر مکانیزم جدایش الیاف از بتن می‌تواند از جدایش لغزشی به جدایش خرابی تبدیل شود.

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر پارامترهای مختلف الیاف بر مشخصه‌های چسبندگی الیاف با بتن در جدول 4 اثر طول مدفون شدگی، قطر الیاف و جنس آنها بر پاسخ بیرون کشیدگی از جمله نیروی بیرون کشیدگی و لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو در حالت‌های مختلف تحت بررسی نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که نیروی بیرون کشیدگی با افزایش قطر الیاف و طول مدفون شدگی برای هر دو نوع الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود برای الیاف با قطر 1mm، با افزایش عمق مدفون شدگی از 10mm به 30mm نیروی بیرون کشیدگی برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی به ترتیب در حدود 17 درصد و 14 درصد افزایش می‌یابد و در مقابل کاهش قطر الیاف باعث کاهش پارامترهای بیرون کشیدگی الیاف می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی بیرون کشیدگی الیاف از بتن را تا حد قابل توجهی بهبود می‌بخشند.

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روش المان محدود به بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی از بتن پلیمری پرداخته شد. اندرکنش بین الیاف با بتن پلیمری با استفاده از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک شبیه‌سازی و پارامترهای آن با استفاده از روش المان محدود معکوس و استفاده از نتایج تست تجربی انجام پذیرفته بر روی یک نمونه الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی به دست آمد. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود با نتایج تست تجربی انجام شده، تأثیر جنس الیاف، قطر و عمق مدفون شدگی آنها بر مشخصه‌های چسبندگی الیاف با بتن مطالعه شد. نتایج برای الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی نشان می‌دهد که به ازای مشخصات یکسان الیاف، نیروی چسبندگی الیاف حافظه‌دار شکلی بیشتر از الیاف متناظر فولادی می‌باشد. به عنوان نمونه، برای الیاف با قطر 1mm و طول مدفون شدگی 10mm، حداکثر نیروی چسبندگی الیاف حافظه‌دار شکلی در حدود 15 درصد بیشتر از الیاف متناظر فولادی است که علت این امر را می‌توان در نیروهای چسبندگی سطحی قوی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن دانست. علاوه بر این، جابجایی جدایش برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی با قطر 1mm به ترتیب برابر با 0.85mm و 0.51mm می‌باشد. بنابراین استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی باعث افزایش حدود 40% در جابجایی جدایش الیاف می‌شود که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که الیاف حافظه‌دار شکلی دارای مقاومت پیوستگی بهتری نسبت به الیاف متناظر فولادی هستند و عملکرد بتن را به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهند.

6- مراجع

- [1] Vahidi Pashaki, P., Pouya, M. and Maleki, V. A., "High-Speed Cryogenic Machining of the Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites: Finite Element Analysis and Simulation" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 232, No. 11, pp. 1927-1936, 2018.
- [2] Ghaderi, M., Maleki, V. A. and Andalibi, K., "Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls under Blast Loading by Frp and Spray on Polyurea" Fen Bilimleri Dergisi (CFD), Vol. 36, No. 4, 2015.
- [3] Aghamohammadi, H., Abbandanak, S. N. H. and Siadati, S. M. H., "Effect of Various Surface Treatment Methods on the

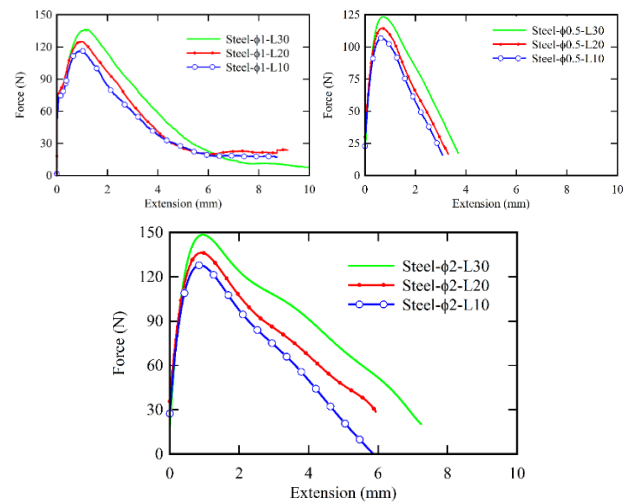


Fig. 9. Load-slip curves for different type of steel fibers

شکل 9 منحنی نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف الیاف فولادی

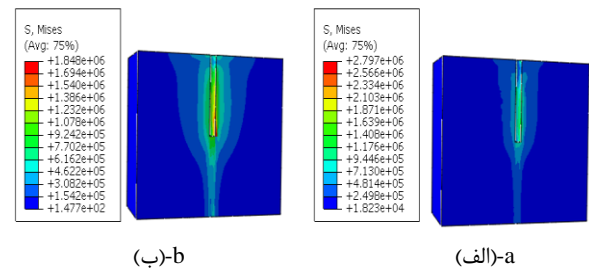


Fig. 10. Stress distribution in concrete for the pullout force of 100N in samples of (a) SMA-φ2-L30 and (b) Steel-φ2-L30

شکل 10 توزیع تنش انتقال شده توسط الیاف به بتن به ازای نیروی بیرون کشیدگی 100N در نمونه‌های (الف) SMA-φ2-L30 و (ب) Steel-φ2-L30

جدول 4 اثر طول مدفون شدگی، قطر الیاف و جنس آنها بر نیروی بیرون کشیدگی و لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو

Table 4. Effect of embedded length, fiber diameter and material type of the fiber on the pullout force and displacement

نوع الیاف	طول مدفون شدگی (mm)	قطر الیاف (mm)	جابجایی لغزش (mm)	نیروی بیرون کشیدگی (N)
حافظه‌دار فولادی	10	0.5	0.87	118.36
حافظه‌دار فولادی	20	0.5	0.65	106.93
حافظه‌دار فولادی	30	0.5	0.91	128.47
حافظه‌دار فولادی	10	1.0	0.68	114.56
حافظه‌دار فولادی	20	1.0	1.03	141.67
حافظه‌دار فولادی	30	1.0	0.72	123.25
حافظه‌دار فولادی	10	2.0	0.73	131.82
حافظه‌دار فولادی	20	2.0	0.66	116.87
حافظه‌دار فولادی	30	2.0	0.83	146.89
حافظه‌دار فولادی	10	2.0	0.91	125.35
حافظه‌دار فولادی	20	2.0	1.43	157.97
حافظه‌دار فولادی	30	2.0	1.18	136.48
حافظه‌دار فولادی	10	2.0	0.98	162.03
حافظه‌دار فولادی	20	2.0	0.84	126.45
حافظه‌دار فولادی	30	2.0	1.35	174.54
حافظه‌دار فولادی	10	2.0	0.91	136.97
حافظه‌دار فولادی	20	2.0	1.67	195.34
حافظه‌دار فولادی	30	2.0	0.94	148.18

- with Shape Memory Alloy Wires“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 363-374, 2018. (In Persian)
- [21] Osfour, M., Rahmani, O. and Zamani, M. R., “An Experimental Investigation on Nitinol Shape Memory Alloy Reinforced Glares against Charpy Low Velocity Impact“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 403-414, 2018. (In Persian)
- [22] Khalili, S. M. R. and Akbari, T., “An Investigation on the Static Buckling Behavior of Laminated Cylindrical Composite Shells with Embedded Sma Wires by Experiment“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 551-564, 2019. (In Persian)
- [23] Chang, W. S. and Araki, Y., “Use of Shape-Memory Alloys in Construction: A Critical Review“ in *Proceeding of ICE Publishing*, pp. 87-95, 2018.
- [24] Khalili, S. M. R., Poormir, M. A. and Eslami-Farsani, R., “An Experimental Investigation on Tensile Properties of Self-Healing Metal Matrix Composite Reinforced by Superelastic Niti Wires Using Taguchi Method“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8, 2019. (In Persian)
- [25] Freed, Y., Aboudi, J. and Gilat, R., “Thermomechanically Micromechanical Modeling of Prestressed Concrete Reinforced with Shape Memory Alloy Fibers“ *Smart materials and structures*, Vol. 16, No. 3, pp. 717, 2007.
- [26] Alam, M. S., Youssef, M. A. and Nehdi, M., “Analytical Prediction of the Seismic Behaviour of Superelastic Shape Memory Alloy Reinforced Concrete Elements“ *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, pp. 3399-3411.
- [27] Abdulridha, A. and Palermo, D., “Behaviour and Modelling of Hybrid Sma-Steel Reinforced Concrete Slender Shear Wall“ *Engineering Structures*, Vol. 147, pp. 77-89, 2017.
- [28] Moser, K., Bergamini, A., Christen, R. and Czaderski, C., “Feasibility of Concrete Prestressed by Shape Memory Alloy Short Fibers“ *Materials and structures*, Vol. 38, No. 5, pp. 593-600, 2005.
- [29] Zhou, B., Yoon, S.-H. and Leng, J.-S., “A Three-Dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloy“ *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 9, pp. 32-45, 2009.
- [30] Fugazza, D., “Experimental Investigation on the Cyclic Properties of Superelastic Niti Shape-Memory Alloy Wires and Bars” Individual study, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk ROSE School, Pavia, Italy, 2005.
- Flexural Properties of Fiber Metal Laminates“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 495-502, 2020. (In Persian)
- [4] kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., Asghariani Jeddi, A. A. and Nasrollahzadeh, K., “Increasing the Efficiency of Carbon Fiber Bundles in Reinforcing Fine Grained Concrete: An Experimental Study of Flexural Bearing Capacity“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 310-318, 2019. (In Persian)
- [5] A, S. and Kabir, M., Numerical study of the effect of glass fiber sizing reinforcement by randomly distributed CNTs on the glass/epoxy composite transverse mechanical properties', *Journal of Science and Technology of Composites*, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 1, No. 1, pp. 45-52, 2014. (In Persian)
- [6] Sui, L., Luo, M., Yu, K., Xing, F., Li, P., Zhou, Y. and Chen, C., “Effect of Engineered Cementitious Composite on the Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer and Concrete“ *Composite Structures*, Vol. 184, pp. 775-788, 2018.
- [7] Abbass, W., Khan, M. I. and Mourad, S., “Evaluation of Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete with Different Strengths of Concrete“ *Construction and Building Materials*, Vol. 168, pp. 556-569, 2018.
- [8] Leone, M., Centonze, G., Colonna, D., Micelli, F. and Aiello, M., “Fiber-Reinforced Concrete with Low Content of Recycled Steel Fiber: Shear Behaviour“ *Construction and Building Materials*, Vol. 161, pp. 141-155, 2018.
- [9] Wille, K., Naaman, A. E., El-Tawil, S. and Parra-Montesinos, G. J., “Ultra-High Performance Concrete and Fiber Reinforced Concrete: Achieving Strength and Ductility without Heat Curing“ *Materials and structures*, Vol. 45, No. 3, pp. 309-324, 2012.
- [10] Abdallah, S., Fan, M. and Rees, D. W., “Analysis and Modelling of Mechanical Anchorage of 4d/5d Hooked End Steel Fibres“ *Materials & Design*, Vol. 112, pp. 539-552, 2016.
- [11] Abazadeh, B. and Azimpour Shishevan, F., “An Experimental Investigation of the Low Velocity Impact Behavior of Woven Carbon-Fiber-Epoxy Composites“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 571-580, 2020.
- [12] Adli, A., Shelesh-Nezhad, K., Khoshnavan Azar, M. R. and Mohammadi-Aghdam, M., “The Effect of Vascular Self-Healing Orientation on Healing Efficiency of Epoxy/Glass Fiber Composite“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, pp. 32-43, 2020. (In Persian)
- [13] Abdollahi, M., Fallahnejad, M. and Zamani, A., “Investigation the Flexural Behavior of Fiber Metal Laminates Containing Glass and Kevlar Fibers Subjected to Thermal Cycling“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 1, pp. 54-67, 2020. (In Persian)
- [14] Abdallah, S. and Rees, D. W., “Comparisons between Pull-out Behaviour of Various Hooked-End Fibres in Normal-High Strength Concretes“ *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 13, No. 1, pp. 27, 2019.
- [15] Ellis, B., McDowell, D. and Zhou, M., “Simulation of Single Fiber Pullout Response with Account of Fiber Morphology“ *Cement and Concrete Composites*, Vol. 48, pp. 42-52, 2014.
- [16] Alwan, J. M., Naaman, A. E. and Guerrero, P., “Effect of Mechanical Clamping on the Pull-out Response of Hooked Steel Fibers Embedded in Cementitious Matrices“ *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 15-25, 1999.
- [17] Yoo, D.-Y. and Kim, S., “Comparative Pullout Behavior of Half-Hooked and Commercial Steel Fibers Embedded in Uhpcc under Static and Impact Loads“ *Cement and Concrete Composites*, Vol. 97, pp. 89-106, 2019.
- [18] Cunha, V. M., Barros, J. A. and Sena-Cruz, J. M., “Pullout Behavior of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-9, 2009.
- [19] Khalili, S. M. and Saeedi, A., “Micromechanics Modeling and Experimental Characterization of Shape Memory Alloy Short Wires Reinforced Composites“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-6, 2015. (In Persian)
- [20] Mojabi, S. S. and Kheirikhah, M. M., “Modeling and Intelligent Control of Vibration of Cantilever Composite Plate Embedded



شبیه‌سازی اجزا محدود دستگاه تست هایپکینسون نوع فشاری برای بررسی رفتار دینامیکی مواد کامپوزیتی

مریم محمدزاده¹، بهنام داودی^{2*}

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

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

* تهران، صندوق پستی 163-16765، bdavoodi@iust.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
کامپوزیت‌ها به دلیل استحکام بالا و وزن کم در انواع مختلفی از سازه‌ها از جمله توربین‌ها، موشک‌ها، اتومبیل‌ها و موارد دیگر کاربرد دارند و ممکن است تحت بارگذاری دینامیکی قرار گیرند. بنابراین به منظور طراحی مناسب سازه، اطلاع از رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی در بارگذاری‌های دینامیکی مهم می‌باشد. دستگاه تست هایپکینسون فشاری ابزاری بسیار مناسب برای مطالعه رفتار دینامیکی مواد در نرخ کرنش‌های بالا می‌باشد. در این مقاله اصول طراحی دستگاه هایپکینسون فشاری برای نمونه‌های کامپوزیتی بررسی و به منظور تعیین رفتار دینامیکی اینگونه مواد، این دستگاه در کد تجاری آباکوس شبیه‌سازی شده است. رفتار نمونه‌ی کامپوزیتی S-2 glass/sc15 epoxy در جهت ضخامت توسط دستگاه هایپکینسون فشاری طراحی شده شبیه‌سازی شده است. برای ایجاد شکل موج حادثه مناسب و برقراری شرط نرخ کرنش ثابت و تعادل تنش دینامیکی، پارامترهای تاثیرگذار از جمله قطر و ضخامت شکل دهنده پالس و طول میله ضربه‌زن مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با مقایسه‌ی امواج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی این نمونه کامپوزیتی، شبیه‌سازی دستگاه هایپکینسون فشاری صحت سنجی شده است. در نهایت با استفاده از شکل دهنده موج از جنس مس با ابعاد مناسب، موج حادثه مناسب برای نمونه S-2 glass/sc15 epoxy در دو نرخ کرنش 550 s^{-1} و 2250 s^{-1} ایجاد شده است که شرایط نرخ کرنش ثابت و تعادل دینامیکی در دو نرخ کرنش برقرار شده است.	دریافت: 1399/07/12 پذیرش: 1399/11/10 کلیدواژگان: دستگاه تست هایپکینسون فشاری، رفتار دینامیکی کامپوزیت، نرخ کرنش بالا، شکل دهنده پالس، کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy

Finite element simulation of Hopkinson compression test to investigate the dynamic behavior of composite materials

Maryam Mohamadzadeh, Behnam Davoodi*

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

* P. O. Box 16765-163, Tehran, Iran, bdavoodi@iust.ac.ir

Keywords

Compression Hopkinson test,
Dynamic behavior of composite,
high strain rate,
pulse shaper,
S-2 glass/sc15 epoxy composite

Abstract

Due to their high strength and low weight, composites are used in various structures, including turbines, missiles, cars, and more, and maybe subjected to dynamic loading. Therefore, to properly design the structure, it is crucial to know the mechanical behavior of composite materials in dynamic loads. The Hopkinson compression tester is a useful tool for studying the dynamic behavior of materials at high strain rates. In this paper, the Hopkinson compression system's design principles for composite samples are mentioned, and to determine the dynamic behavior of such materials, this system by ABAQUS software. The behavior of the S-2 glass/sc15 epoxy composite sample in the thickness direction is simulated by a compression Hopkinson system. To create an appropriate incident waveform and to establish the condition of constant strain rate and dynamic stress equilibrium, effective parameters of pulse shaper included diameter, thickness, and the length of the sticker bar was investigated. By comparing the waves obtained from the simulations with the experimental results of this composite sample, the compression Hopkinson simulation has been validated. Finally, using a copper pulse shaper with appropriate dimensions, the appropriate incident wave for the S-2 glass / sc15 epoxy sample is created at two strain rates of 550 and 2250. The conditions of constant strain rate and dynamic equilibrium are established in two strain rates

مختلف است. روش‌های مختلف برای به دست آوردن مشخصه‌های مواد دارای

مزیت‌ها و محدودیت‌های متفاوتی هستند و برای ارائه نتایج خوب و قابل استناد باید دستگاه و روش آزمایش به طور مناسب انتخاب شود [1]. روش دینامیکی مورد استفاده برای توصیف مواد کامپوزیتی در این تحقیق، آزمایش

1- مقدمه

در گذشته از کامپوزیت‌ها بیشتر در ساخت سازه‌های ثانویه (فرعی) استفاده می‌شد. طراحی قابل اعتماد سازه‌ها یا اجزای کامپوزیتی در برابر بارهای ضربه‌ای، مستلزم به دست آوردن خواص مواد کامپوزیتی در نرخ‌های کرنش

Please cite this article using:

Mohamadzadeh, M., Davoodi, B., "Finite element simulation of Hopkinson compression test to investigate the dynamic behavior of composite materials", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1263-1270, 2021.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

می‌شود. این موج حادثه باعث ایجاد موج کششی منعکس شده در میله‌ی حادثه و یک موج فشاری منتقل شده در میله‌ی انتقال می‌شود. با استفاده از کرنش‌سنج بر روی دو میله‌ی فشار، این سه موج ضبط می‌شوند و توسط رابطه‌های (1)، (2) و (3) به ترتیب تنش، کرنش و نرخ کرنش در نمونه محاسبه می‌شوند. زیروندهای I ، R و T ، به ترتیب نمایانگر موج‌های حادثه، منعکس‌شده و منتقل‌شده هستند. مدت بارگیری ($T_{loading}$)، مدت انتقال موج (T_{IB}) و کرنش (ϵ_I) در میله حادثه که به ترتیب توسط رابطه‌های (4)، (5) و (6) به دست می‌آیند، اغلب به عنوان کالیبراسیون برای آزمایش هایپکینسون استفاده می‌شوند [7، 8]. در این روابط A_B و A_S به ترتیب سطح مقطع میله‌ها و نمونه، E_B (Pa) مدول الاستیک میله، C (m/s) سرعت موج الاستیک در میله‌ها و v_{st} سرعت میله ضربه‌زن می‌باشد. همچنین L_{ST} و L_{IB} طول میله‌های ضربه‌زن و حادثه می‌باشند.

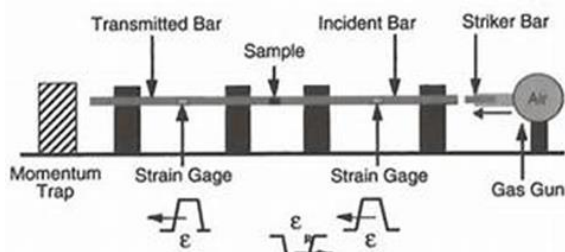


Fig 1 Schematic of the split Hopkinson pressure bar test [9]

شکل 1 شماتیک دستگاه تست هایپکینسون فشاری [9]

$$\sigma = \frac{A_B}{A_S} E_B \epsilon_T \quad (1)$$

$$\epsilon = -2 \frac{C_B}{L_S} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = -2 \frac{C_B}{L_S} \epsilon_R \quad (3)$$

$$T_{loading} = \frac{2L_{ST}}{C_{st}} \quad (4)$$

$$T_{IB} = \frac{L_{IB}}{C_{IB}} \quad (5)$$

$$\epsilon_I = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{C_B} \quad (6)$$

2- اصول طراحی دستگاه هایپکینسون

میله‌های فشار استفاده شده در دستگاه هایپکینسون هم قطر یا یکدیگر بوده و معمولاً از یک ماده الاستیکی با استحکام بالا ساخته می‌شوند. برای انتشار یک بعدی موج در طول میله‌های فشار باید حداقل نسبت طول به قطر برابر 10 باشد. همچنین برای این که موج ضربه و موج برگشتی تداخل نداشته باشند باید نسبت طول به قطر بیشتر از 20 باشد. علاوه بر این، برای کرنش‌های بالاتر از 30٪ لازم است که نسبت طول به قطر میله‌ها 100 و یا بیشتر شود [8].

در این پژوهش دستگاه هایپکینسون فشاری از جنس فولاد مارچینگ با میله‌های ضربه‌زن، حادثه و انتقال به ترتیب با طول‌های 100، 600 و 600

دو میله‌ای هایپکینسون فشاری¹ است. دستگاه هایپکینسون به منظور تولید نتایج دقیق و تکرار شونده، نیاز به طراحی بسیار دقیق دارد. طراحی آزمایش باید بر اساس ماده مورد آزمایش اصلاح شود. بنابراین، به طور کلی طراحی و ساخت دستگاه تست هایپکینسون برای یک بازه تحقیقاتی خاص است [2]. تعداد کمی از تست‌های تجاری در دسترس وجود دارند که معمولاً با هزینه قابل توجهی همراه هستند. برای کاهش هزینه، ابتدا شبیه‌سازی اجزای محدود² آزمایش انجام و در صورت صحت نتایج ساخت دستگاه انجام می‌شود.

سانگ³ و همکاران [3] در سال 2003 و تاسدمرچی⁴ و هال⁵ [4] در سال 2006 رفتار مکانیکی کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy توسط دستگاه هایپکینسون فشاری در نرخ کرنش بالا را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که حساسیت به نرخ کرنش در جهت ضخامت بیشتر از جهت درون صفحه‌ای است. همچنین دریافتند که به علت رفتار خطی این کامپوزیت، شکل پالس‌های حادثه، منعکس‌شده و انتقال مشابه با رفتار مواد شکننده است. در سال 2015 آرباوی⁶ و همکاران [5] رفتار مکانیکی کامپوزیت E-glass/vinylester را با هندسه مکعب در دو جهت بارگذاری درون صفحه‌ای و ضخامت توسط دستگاه هایپکینسون فشاری بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که قبل از آسیب مدول الاستیک ثابت بوده و با افزایش نرخ کرنش سطح تنش بالا رفته است. هو⁷ و همکاران [6] در سال 2018 تأثیر نرخ کرنش برای کامپوزیت Flax-epoxy یافته شده در دو جهت درون صفحه‌ای و ضخامت را توسط دستگاه هایپکینسون بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که با افزایش نرخ کرنش حساسیت به نرخ کرنش در جهت صفحه‌ای بیشتر است. همچنین از شکل موج‌های به دست آمده از شبیه‌سازی اجزا محدود مشخص شد که این کامپوزیت موج‌هایی شبیه به مواد نرم دارند چرا که موج حادثه و موج منعکس شده شبیه به هم هستند.

در این پژوهش تست نمونه کامپوزیتی طراحی شده S-2 glass/sc15 epoxy با رفتار مشابه با مواد ترد، توسط دستگاه هایپکینسون فشاری طراحی شده با استفاده از کد تجاری اجزا محدود آباکوس⁸ صریح (اکسپلیسیت)⁹ شبیه‌سازی عددی شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آزمایش‌های انجام شده روی این کامپوزیت‌ها مقایسه شده است.

1- دستگاه هایپکینسون فشاری

دستگاه تست هایپکینسون دو میله‌ای نوع فشاری که برای اولین بار توسط کولسکی ساخته شد، ابزاری بسیار مناسب برای مطالعه‌ی رفتار دینامیکی مواد در کرنش‌های زیاد و نرخ کرنش‌های بالا (در محدوده بین $10^2 s^{-1}$ تا $10^4 s^{-1}$) می‌باشد. این دستگاه از سه میله‌ی ضربه‌زن¹⁰، حادثه¹¹ و انتقال¹² تشکیل شده است و نمونه بین میله‌های حادثه و انتقال قرار می‌گیرد. در شکل 1 نمایی از این دستگاه نشان داده شده است. پس از برخورد میله‌ی ضربه‌زن به انتهای آزاد میله‌ی حادثه، موج فشاری حادثه در میله حادثه ایجاد

¹ Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

² Finite Element Method (FEM)

³ Song

⁴ Tasdemirci

⁵ Hall

⁶ Arbaoui

⁷ Hu

⁸ ABAQUS

⁹ Explicit

¹⁰ Striker bar

¹¹ Incident bar

¹² Transmitted bar

تاریخی، نمونه‌های استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم² در آزمایش میله هاپکینسون برای فلزات و نمونه‌های منشور مربعی³ یا نمونه‌های منشور مستطیلی⁴ برای کامپوزیت‌ها نیز استفاده می‌شوند [8].

1-1-4- هندسه استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم

میله‌های سنتی هاپکینسون از میله‌های استوانه‌ای دایره‌ای بلند و راست ساخته شده‌اند. نمونه استوانه‌ای دایره‌ای راست در محور Z در سیستم مختصات استوانه‌ای متقارن است و نسبت به هر هندسه نمونه دیگر ارجحیت دارد. مواد کامپوزیت با تقارن استوانه‌ای را می‌توان با استفاده از هندسه استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم، آزمایش کرد. به عنوان مثال همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است می‌توان از کامپوزیت تک جهت⁵ در جهت فیبر (جهت مواد 1)، کامپوزیت‌های شبه ایزوتروپیک⁶ در جهت ضخامت (جهت ماده 3) و کامپوزیت‌های چند لایه متقاطع⁷ که دارای دو صفحه (صفحه‌های 1-3 یا X-Z و 2-3 یا Y-Z) متقارن هستند و از محور Z عبور می‌کنند در جهت ضخامت (جهت 3) با هندسه استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم برای آزمایش هاپکینسون استفاده کرد. هندسه استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم را نمی‌توان در تست کامپوزیت‌های تک جهت عرضی به جهت الیاف (جهت 2) و ضخامت (جهت 3) و کامپوزیت‌های چند لایه را در جهت داخل صفحه‌ای (جهت 1 و 2) استفاده کرد [8].

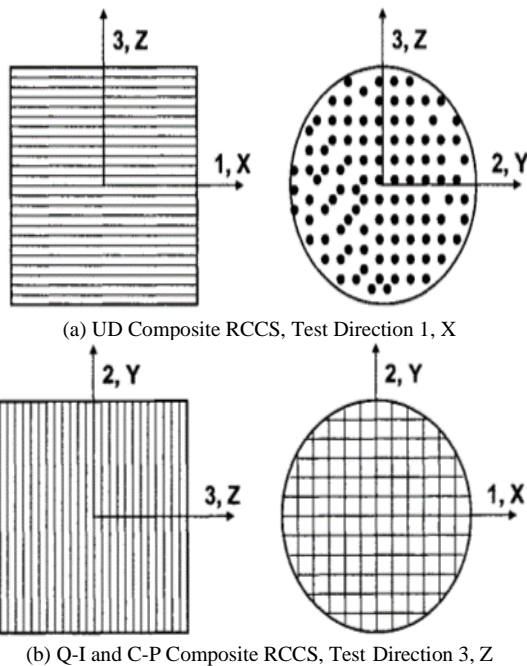


Fig 2 RCCS Geometries for Composite Testing with Compression Hopkinson system [8]

شکل 2 هندسه‌های استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم برای تست کامپوزیت با دستگاه هاپکینسون فشاری [8]

² Right Circular Cylindrical Specimen (RCCS)

³ Square Prism Specimen (SPS)

⁴ Rectangular Prism Specimen (RPS)

⁵ Uni-Directional (UD)

⁶ Quasi-Isotropic (Q-I)

⁷ Cross-Ply (C-P)

میلی‌متر و قطر 10 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات فولاد مارچینگ در جدول 1 ذکر شده است. اگر سرعت میله ضربه‌زن را 30 m/s در نظر گرفته شود، مقدار تقریبی کرنش نمونه در حدود 30٪ می‌شود که با توجه به این که طول میله‌ها تقریباً $1/3$ طول میله‌های رایج است، مقدار قابل قبولی می‌باشد. همچنین شکل‌دهنده‌ی پالس به کار برده شده با ابعاد مختلف در این شبیه‌سازی از جنس مس در نظر گرفته شده است. خواص الاستیک و ضرایب مدل جانسون کوک¹ آن به ترتیب در جدول 1 و جدول 2 ذکر شده است.

جدول 1 مشخصات فولاد مارچینگ و مس [10, 11]

Table 1 properties of maraging steel and copper [10, 11]

پارامتر	نماد	فولاد مارچینگ	مس
مدول الاستیک	E (GPa)	190	129
چگالی	ρ (kg/m ³)	7980	8960
ضریب پواسون	ν	0.3	0.3
سرعت موج الاستیک	C (m/s)	4879.5	-

جدول 2 ضرایب مدل جانسون کوک مس [12]

Table 2 Jonson cook model coefficient of copper [12]

مقدار	ضرایب جانسون کوک
90	A (MPa)
292	B (MPa)
0.31	n
1.09	m
0.025	C
1356	Melting temp (K)

3- اصول طراحی نمونه‌های کامپوزیتی

کامپوزیت‌ها مواد پیشرفته‌ای هستند که در آن‌ها از ترکیب مواد ساده به منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. اصول طراحی نمونه‌های کامپوزیتی برای آزمایش هاپکینسون بر اساس هندسه و نوع رفتار متفاوت می‌باشد.

1-4- اصول طراحی نمونه‌های کامپوزیتی بر اساس هندسه

در یک آزمایش هاپکینسون، هنگامی که یک نمونه در معرض بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد، اینرسی محوری و شعاعی نمونه و اصطکاک بین سطوح میله و نمونه مهم می‌شود. محققان هندسه نمونه را که موثر در به حداقل رساندن این تأثیرات بوده است، مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که نسبت ضخامت به قطر (L/D) تقریباً یک، اینرسی را در نمونه‌های فلزی الاستیک پلاستیک به حداقل می‌رساند [13]. از لحاظ

¹ Parameters of Johnson-Cook strength model

2-1-4- هندسه منشور مربعی و منشور مستطیلی

کامپوزیت‌های تک جهت و چند لایه متقاطع نیز دارای سه صفحه متقارن هستند، یعنی صفحه‌های 1-3 یا X-Z، 2-3 یا Y-Z و 1-2 یا X-Y. محققان دریافته‌اند که کامپوزیت‌ها با هندسه‌ی منشور مربعی یا منشور مستطیلی در آزمایش از همه جهات مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، این هندسه‌های نمونه به طور کلی قابل قبول نیستند زیرا به دلیل این واقعیت است که تغییر شکل غیر مسطح صفحه بین میله و نمونه ممکن است باعث مود شکست غیر قابل قبول شود [7].

2-2-4- اصول طراحی نمونه‌های کامپوزیتی بر اساس رفتار

مواد کامپوزیتی که از ترکیب مواد مختلف (فلزی، سرامیکی یا پلیمری) ساخته می‌شوند رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. از این رو، بسته به این که نمونه‌ی کامپوزیتی رفتار شکننده، نرم یا منعطف دارد، طراحی متفاوتی نیاز است.

1-2-4- رفتار مانند مواد ترد

کامپوزیت‌ها با رفتار ترد گونه، تحت فشار به صورت تقریباً خطی الاستیک تغییر شکل می‌دهند و در مقادیر کرنش کوچک، شکست می‌خورند. از این رو این کامپوزیت‌ها باید در معرض بارگذاری موج مثلثی یا دوزنقه‌ای، که بخش بارگذاری آن خطی است، قرار بگیرند تا شرایط تنش متعادل دینامیکی و تغییر شکل یکنواخت با کرنش نرخ ثابت برقرار شود. براساس تحقیقات محققین، معمولاً از نمونه‌ی شکننده به حالت سیلندر معمولی دایره‌ای مستقیم استفاده می‌شود. برای تعیین ابعاد نمونه استوانه‌ای، نیاز است که مقاومت تقریبی نمونه از طریق آزمایش‌های شبه استاتیک یا با یک آزمایش مقدماتی هاپکینسون روی همان ماده یا مشابه آن تخمین زده شود. همچنین قطر تقریبی نمونه توسط رابطه‌ی (7) محاسبه می‌شود که تنش در میله انتقال باید کمتر از 7/30 استحکام تسلیم میله باشد. موج تنش حادثه بیشتر از موج انتقال خواهد بود؛ بنابراین حتی اگر فقط 30 درصد از استحکام تسلیم در میله انتقال بارگیری شود، باید مراقب بود که میله حادثه تسلیم نشود و موج حادثه باید اندکی پس از شکست نمونه خاتمه یابد. برای تصمیم‌گیری در مورد ضخامت نمونه نه تنها اثرات نهایی، بلکه باید اثرات تعادل تنش دینامیکی در سراسر نمونه و سطح کرنش، در نظر گرفته شود [14].

$$d_s = \sqrt{\frac{0.3 \times S_{YB}}{S_{CS}}} d_B \quad (7)$$

d_s ، d_B و S_{CS} به ترتیب قطر نمونه و میله و استحکام تسلیم میله و استحکام فشاری نمونه هستند.

2-2-4- رفتار مانند مواد نرم

در کامپوزیت‌هایی با رفتار نرم، موج حادثه باید در مراحل اولیه‌ی بارگیری، بارگیری نسبتاً کمی داشته باشد تا تعادل تنش در نمونه برقرار شود و اینرسی ناشی از شتاب به حداقل برسد. همچنین زمان در اوج بودن موج حادثه باید از

5- شبیه‌سازی المان محدود

در این شبیه‌سازی، محور طولی میله‌ها محور هندسی Z در نظر گرفته شده است و سطح مقطع میله‌ها و نمونه در صفحه‌ی X-Y رسم شده است و به دلیل تقارن اجزا در دو صفحه‌ی X-Z و Y-Z، یک چهارم مدل با شرایط مرزی مناسب در صفحه‌های متقارن مورد استفاده قرار گرفته است. میله‌ها طی

طریق شکل‌گیری موج به میزان قابل توجهی افزایش یابد. برای به حداقل رساندن اینرسی محوری و شعاعی، طول و قطر نمونه باید به درستی طراحی شوند. هنگام آزمایش روی مواد نرم، اینرسی به دلیل استحکام کم مواد نرم، شدیدتر می‌شود. بسیاری از مواد نرم قادر به تغییر شکل بزرگ در فشرده‌سازی محوری هستند در حالی که انبساط زیادی در امتداد شعاع رخ می‌دهد. در یک آزمایش هاپکینسون، سطح مقطع نمونه (یا قطر) نباید از میله‌ها تجاوز کند. برای اطمینان از بیرون زدن نمونه نرم در قسمت انتهایی میله حداکثر قطر مجاز آن در هنگام تغییر شکل، قطر میله است. حداکثر قطر نمونه اصلی (d_0)، برای کرنش مورد نظر نمونه (ϵ_E) و قطر میله (d_{bar})، به صورت رابطه (8) محاسبه می‌شود [15].

$$d_0 = d_{bar} \sqrt{1 - \epsilon_E} \quad (8)$$

3-2-4- رفتار مانند مواد منعطف

مواد انعطاف‌پذیر در ابتدا بصورت الاستیک تغییر شکل می‌یابند و سپس بصورت پلاستیک به کرنش‌های بزرگ تغییر می‌کنند. استحکام مواد در کشش و انعطاف‌پذیری کاملاً متفاوت است. طراحی آزمایش ممکن است در پاسخ الاستیک یا پلاستیک متمرکز باشد، اما بیشتر در حالت دوم است. پیش از تسلیم، بیشتر مواد منعطف مانند مواد شکننده و دارای سفتی بالا رفتار می‌کنند. روش هاپکینسون برای توصیف مواد شکننده در توصیف پاسخ الاستیک مواد منعطف کاربرد دارد. از آنجا که هدف ما توصیف مواد کامپوزیتی با رفتاری مشابه مواد منعطف هست و کامپوزیت‌ها رفتار پلاستیک ندارند پس برای مواد قابل انعطاف در محدوده رفتار الاستیک مانند مواد شکننده عمل می‌کنیم. در کامپوزیت‌هایی با رفتار منعطف، به منظور دستیابی به نرخ کرنش ثابت در آزمایش‌های هاپکینسون، موج حادثه باید دارای پروفایل شبیه به موج منتقل شده باشد و نرخ اولیه بارگیری آن کم باشد [7].

4- ماده

در این پژوهش، نمونه کامپوزیتی S-2 glass/sc15 epoxy که رفتاری مشابه مواد ترد دارد در نظر گرفته شده است. این کامپوزیت از 58 لایه الیاف شیشه‌ی S-2 و رزین اپوکسی SC15 در دو جهت 0 و 90 درجه به صورت استوانه‌ای به قطر 7 میلی‌متر و طول 3.5 میلی‌متر تشکیل شده است. مشخصات مکانیکی این کامپوزیت در جدول 3 ذکر شده است.

الیاف شیشه‌ای به کار رفته در این کامپوزیت باعث استحکام و شکننده شدن آن می‌شود؛ بنابراین طبق آنچه که گفته شد، باید موج‌های حاصل از آزمایش هاپکینسون فشاری مشابه با نتایج آزمایش مواد شکننده باشند. برای رسیدن به این هدف نیاز است که موج حادثه‌ی حاصل از برخورد میله‌ی ضربه‌زن به میله حادثه به صورت مثلثی یا دوزنقه‌ای، باشد تا بخش بارگذاری آن خطی شود. چرا که این مدل برای موج حادثه به تولید سریع تعادل تنش در نمونه کمک می‌کند.

5- عوامل تاثیر گذار بر شکل موج حادثه

موج حادثه در وسط میله حادثه و روی سطح خارجی آن اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای مؤثر بر شکل موج حادثه عبارتند از: ضخامت اولیه شکل‌دهنده‌ی پالس (h)، قطر اولیه شکل‌دهنده‌ی پالس (D) و طول میله ضربه‌زن (L_{st}) [11].

1-7- ضخامت شکل‌دهنده پالس

در شکل 5 نتایج شبیه‌سازی اثر ضخامت شکل‌دهنده پالس دیسکی بر شکل موج حادثه در آزمایش هاپکینسون فشاری نشان داده شده است. در این نمودار سرعت میله ضربه‌زن 20 متر بر ثانیه و طول آن 100 میلی‌متر بوده و از شکل‌دهنده‌ی پالس‌های دیسکی با قطر 4 میلی‌متر استفاده شده است. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت، زمان اوج موج حادثه و طول موج حادثه افزایش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش ضخامت، تغییر شکل در شکل‌دهنده‌ی پالس در زمان بیشتری انجام می‌شود. هرچه طول میله‌ی ضربه‌زن بیشتر باشد نیاز است که شکل‌دهنده‌ی پالسی با ضخامت بیشتر انتخاب شود. با توجه به مقایسه‌ی بین شکل‌دهنده‌ی پالس‌ها با ضخامت‌های متفاوت ضخامت 1/5 میلی‌متر، ضخامت مناسبی به نظر می‌رسد.



Fig 3 View of the meshes of the bars

شکل 3 نمایی از مش‌بندی میله‌ها

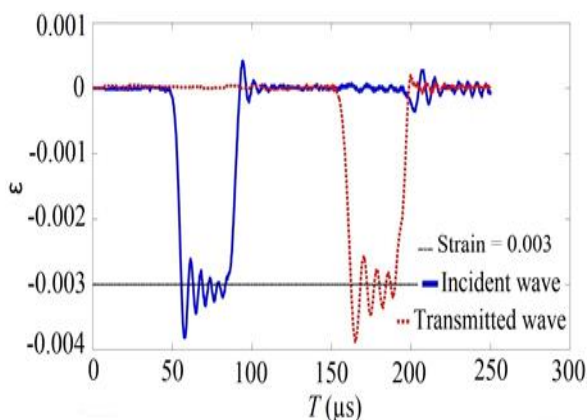


Fig 4 Strain-time curve obtained from simulation without the presence of a sample

شکل 4 منحنی کرنش-زمان حاصل از شبیه‌سازی بدون حضور نمونه

انجام آزمایش هاپکینسون فشاری الاستیک باقی می‌ماند. بنابراین، یک مدل مواد ایزوتروپیک الاستیک خطی برای میله‌ها در نظر گرفته شده است. نمونه‌ی کامپوزیتی به صورت ماده الاستیک و پلاستیک ایزوتروپیک عرضی مدل‌سازی شده است.

جدول 3 مشخصات مکانیکی S-2 glass/sc15 epoxy [16]

Table 3 mechanical properties of S-2 glass/sc15 epoxy composite [16]

پارامتر	نماد	مقدار
چگالی	ρ (kg/m ³)	1850
مدول الاستیک در جهت 1	E_1 (GPa)	27.5
مدول الاستیک در جهت 2	E_2 (GPa)	27.5
مدول الاستیک در جهت 3	E_3 (GPa)	11.8
ضریب پواسون 12	ν_{12}	0.11
ضریب پواسون 13	ν_{13}	0.18
ضریب پواسون 23	ν_{23}	0.18
مدول برشی 12	G_{12} (GPa)	2.9
مدول برشی 13	G_{13} (GPa)	2.14
مدول برشی 23	G_{23} (GPa)	2.14

پاسخ قسمت غیر الاستیک کامپوزیت که با استفاده از مدل تسلیم غیر ایزوتروپیک¹ که در آباکوس [11] ساخته شده است، مدل‌سازی شده است. مدل ساختاری سه بعدی دستگاه هاپکینسون فشاری و نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از المان‌های جامد هشت گره ایجاد شده‌اند. در این مطالعه از فرمولاسیون ادغام یک نقطه با کنترل ساعت شنی² برای میله‌ها و نمونه به منظور صرفه‌جویی در وقت محاسباتی استفاده شده است. کرنش‌سنج‌ها در وسط میله‌های حادثه و انتقال توسط پوسته‌هایی با ضخامت ناچیز با استفاده از غشای چهار ضلعی 4 گره و فرمولاسیون کاهش ادغام با کنترل ساعت شنی³ مدل شده‌اند. شرایط برخورد میله‌ها و نمونه به صورت صفحه به صفحه با فرمولاسیون برخورد پنالته بدون در نظر گرفتن اصطکاک تعریف شده است. تعداد المان‌های میله‌های ضربه‌زن، حادثه و انتقال به ترتیب 22500، 144900 و 144900 می‌باشد. نمایی از المان‌بندی میله‌ها در شکل 3 نشان داده شده است.

برای اطمینان از طراحی انجام شده، میله‌ها بدون حضور نمونه با سرعت ضربه 30 متر بر ثانیه شبیه‌سازی شده‌اند. بر اساس روابط تئوری (4)، (5) و (6) مقادیر مدت بارگیری، مدت انتقال موج و کرنش در میله حادثه به ترتیب 40 میکرو ثانیه، 122 میکرو ثانیه و 0/003 می‌شوند. در شکل 4 موج‌های دوزنقه‌ای نشان داده شده‌اند. از آنجا که میله حادثه به طور مستقیم با میله انتقال در تماس است، پالس حادثه بدون هیچ بازتابی از میله حادثه به میله انتقال منتقل شده و تمامی مقادیر محاسبه شده به روش تئوری هماهنگی خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد.

¹ Anisotropic Yielding Model (AYM)

² C3D8R

³ M3D4R

3-7- طول میله ضربه‌زن

بر اساس تئوری انتشار موج با افزایش طول میله ضربه‌زن، طول موج حادثه به همان نسبت افزایش می‌یابد. شکل 7 موج حادثه حاصل از شبیه‌سازی را در حضور شکل‌دهنده‌ی پالس با قطر 2/5 و ضخامت 1/5 میلی‌متر با سرعت میله ضربه‌زن 30 متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با تغییر طول میله ضربه‌زن، مقدار بیشینه موج تنش تغییر می‌کند و همواره برابر با مقدار بیشینه تئوری نخواهد بود. همچنین شیب موج حادثه به طول میله ضربه‌زن وابسته نمی‌باشد. در این مقایسه مشخص می‌شود، ضربه‌زن طراحی شده با طول 100 میلی‌متر انتخاب مناسبی می‌باشد.

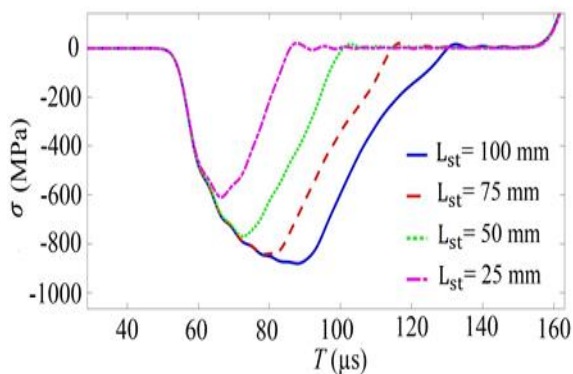


Fig 7 Incident stress wave in the presence of a 2.5 mm diameter and 1.5 mm thick pulse shaper with striker bar of different lengths in Hopkinson simulation for S-2 glass/sc15 epoxy

شکل 7 موج تنش حادثه در حضور شکل‌دهنده‌ی پالس با قطر 2/5 و ضخامت 1/5 میلی‌متر با میله‌های ضربه‌زن با طول‌های مختلف در شبیه‌سازی هاپکینسون برای نمونه S-2 glass/sc15 epoxy

6- تحلیل نتایج

هنگام تست هاپکینسون فشاری، افزایش سرعت میله ضربه‌زن منجر به افزایش کرنش‌ها و همچنین افزایش نرخ کرنش می‌شود، اما برای هر طول میله ضربه‌زن، حداقل سرعت وجود دارد که باعث آسیب به نمونه می‌شود. در شکل 8 و شکل 9 مجموعه‌ای از موج‌های حادثه، منعکس شده و منتقل شده حاصل از شبیه‌سازی تست هاپکینسون فشاری در دو نرخ کرنش 550 s^{-1} و 2250 s^{-1} نشان داده شده است. شکل موج حادثه کاملاً متفاوت از پالس دوزنقه معمولی یک تست هاپکینسون فشاری است. این نتیجه کنترل شکل‌دهنده پالس است و لازم است اطمینان حاصل شود که نمونه با نرخ کرنش تقریباً ثابت تغییر شکل یافته است. علاوه بر این، شکل موج‌های بارگذاری تقریباً بدون پراکندگی هستند. اجزای با فرکانس بالا در موج‌های حادثه توسط شکل‌دهنده پالس فیلتر شده‌اند زیرا این مؤلفه‌ها تلاش برای تعریف حالت تنش شفاف در نمونه را پیچیده می‌کنند. در شکل 8 منحنی تنش و کرنش بر حسب زمان در نرخ کرنش 550 s^{-1} نشان داده شده است که نشان دهنده پاسخ اصولاً الاستیک می‌باشد و در شکل 9 منحنی تنش و کرنش بر حسب زمان در نرخ کرنش 2250 s^{-1} نشان داده شده است که اثر تجمع خسارت را در شکل‌های موج منعکس شده و منتقل شده نشان می‌دهد. دامنه موج بازتاب شده به عنوان تابعی از زمان از صفر افزایش می‌یابد، به مدت 25 میکرو ثانیه دامنه تقریباً ثابت بوده و سپس افزایش شدید به دنبال دارد که نشان می‌دهد نمونه آسیب دیده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل 9 رفتار بسیار مشابهی با

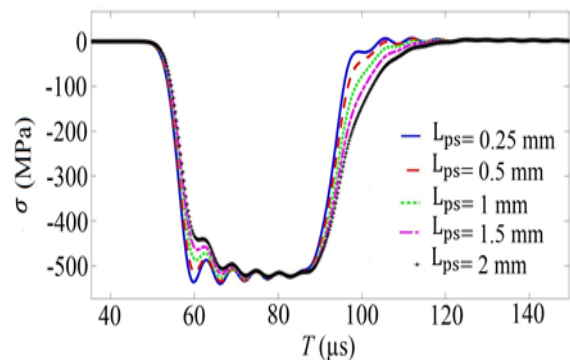


Fig 5 Effect of pulse shaper thickness with 4 mm diameter on incident waveform in Hopkinson simulation for S-2 glass/sc15 epoxy sample

شکل 5 اثر ضخامت شکل‌دهنده‌ی پالس با قطر 4 میلی‌متر بر شکل موج حادثه در شبیه‌سازی هاپکینسون برای نمونه S-2 glass/sc15 epoxy

2-7- قطر شکل‌دهنده پالس

در شکل 6 نتایج شبیه‌سازی اثر قطر شکل‌دهنده پالس دیسکی بر شکل موج حادثه در آزمایش هاپکینسون فشاری نشان داده شده است. در این نمودار سرعت میله ضربه‌زن 20 متر بر ثانیه و طول آن 100 میلی‌متر بوده و از شکل‌دهنده‌ی پالس‌های دیسکی با ضخامت 1/5 میلی‌متر استفاده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش قطر، شیب موج حادثه افزایش (زمان اوج کاهش می‌یابد) و طول موج کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر، نوسانات موج حادثه افزایش می‌یابد. در واقع هر چه تغییر شکل پلاستیک بیشتری در شکل‌دهنده‌ی پالس رخ دهد، فرکانس‌های بالا کمتر تولید می‌شوند. نکته دیگر اینکه با افزایش قطر، تغییر شکل پلاستیک در تنش بزرگتری شروع می‌گردد. با مقایسه‌ی قطرهای مختلف شکل‌دهنده‌ی پالس مشخص می‌شود که قطر 2/5 میلی‌متر انتخاب مناسبی می‌باشد، چرا که در صورت استفاده از قطر کمتر از 2/5 میلی‌متر برای شکل‌دهنده‌ی پالس، موج تنش حادثه به مقدار حداکثر خود نمی‌رسد و در صورت استفاده از قطر بیشتر از 2/5 میلی‌متر برای شکل‌دهنده‌ی پالس، موج حادثه حالت مثلثی نخواهد داشت.

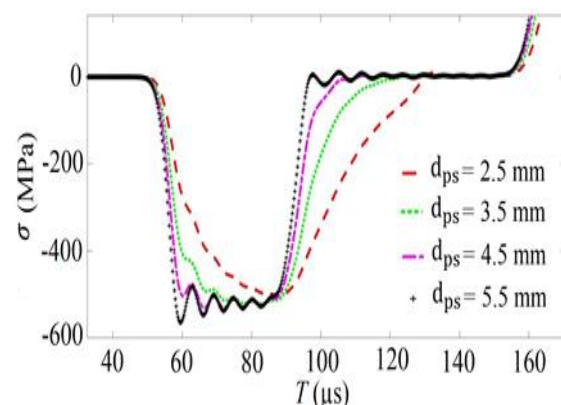


Fig 6 Effect of pulse shaper diameter with 1.5 mm thickness on incident waveform in Hopkinson simulation for S-2 glass/sc15 epoxy sample

شکل 6 اثر قطر شکل‌دهنده‌ی پالس با ضخامت 1/5 میلی‌متر بر شکل موج حادثه در شبیه‌سازی هاپکینسون برای نمونه S-2 glass/sc15 epoxy

اختلاف معنی داری بین میانگین تنش و تنش در هر دو انتهای نمونه وجود دارد. در شکل 11 تعادل دینامیکی محاسبه شده توسط معادله (11) نشان داده شده است که نمونه کامپوزیتی تقریباً در کل مدت شبیه‌سازی آزمایش هاپکینسون فشاری به دلیل استفاده از یک شکل‌دهنده‌ی پالس مناسب به جز 5 میکرو ثانیه اول در تعادل تنش دینامیکی قرار دارد. دستاورد اولیه تعادل تنش دینامیکی در نمونه تضمین می‌کند که نمونه در طول بارگذاری دینامیکی به طور یکنواخت تحت تنش قرار گرفته است.

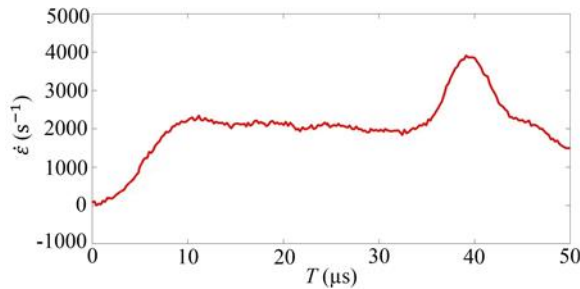


Fig 10 Strain rate history in SHPB test simulation for S-2 glass/sc15 epoxy sample

شکل 10 تاریخچه نرخ کرنش در نمونه در شبیه‌سازی آزمایش هاپکینسون فشاری برای نمونه‌ی S-2 glass/sc15 epoxy

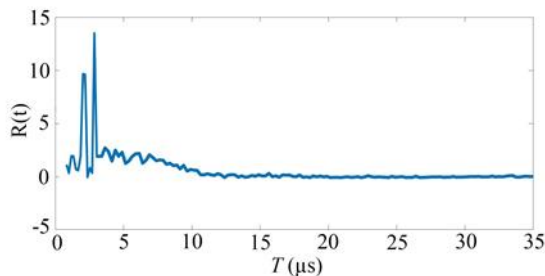


Fig 11 Dynamic equilibrium process in S-2 glass/sc15 epoxy sample

شکل 11 فرآیند تعادل دینامیکی در نمونه S-2 glass/sc15 epoxy

7- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، طراحی دستگاه تست هاپکینسون فشاری برای بررسی خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی است. لذا دستگاه هاپکینسونی با تقریباً $1/3$ ابعاد رایج طراحی شد. موج‌های حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از شکل‌دهنده پالس از جنس مس با قطر 2.5 میلی‌متر و ضخامت 1.5 میلی‌متر برای نمونه‌ی کامپوزیتی S-2 glass/sc15 epoxy با رفتار ترد گونه، اصلاح شد. برای اصلاح موج حادثه اگر هدف فقط حذف نوسانات موج حادثه باشد بایستی از شکل‌دهنده‌ی پالس با قطر بزرگ و ضخامت کم استفاده نمود، چرا که در چنین شرایطی تغییر شکل پلاستیک کمی در شکل‌دهنده‌ی پالس اتفاق می‌افتد و شکل موج تغییر محسوسی نخواهد داشت. در صورتی که نمونه مورد آزمایش رفتار خطی داشته باشد (مانند مواد ترد) بایستی از شکل‌دهنده‌ی پالسی با قطر کوچک استفاده نمود، چرا که تقریباً از ابتدای ورود موج فشاری به شکل‌دهنده‌ی پالس تغییر شکل پلاستیک آن شروع شده و شکل موج مثلی یا دوزنقه‌ای تولید می‌گردد. از طرف دیگر، هر چه مدول مماسی در مواد ترد بیشتر باشد، ضخامت شکل‌دهنده‌ی پالس مناسب افزایش می‌یابد چرا که با افزایش ضخامت، زمان اوج موج حادثه افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر طول میله ضربه‌زن در حضور شکل‌دهنده‌ی پالس، هر چند ممکن است دامنه موج حادثه تغییر کند ولی شیب موج ورودی تغییر نمی‌کند. شبیه‌سازی در دو

نتایج سانگ و چن [3]، تاسدمرکی¹ و هل [4] دارد و از این رو، اعتبار طراحی دستگاه هاپکینسون فشاری را تأیید می‌کند.

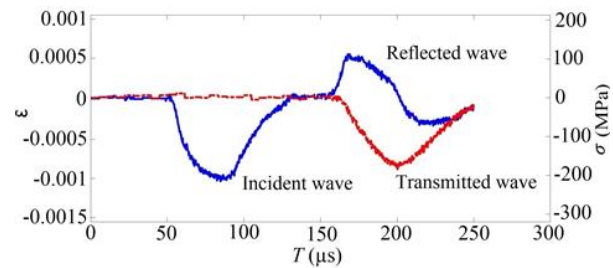


Fig 8 A set of incident waves reflected and transmitted for the S-2 glass/sc15 epoxy composite sample with a striker bar speed of 5 m/s

شکل 8 مجموعه‌ای از امواج حادثه، بازتاب‌شده و منتقل‌شده برای نمونه کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy با سرعت ضربه‌زن 5 متر بر ثانیه

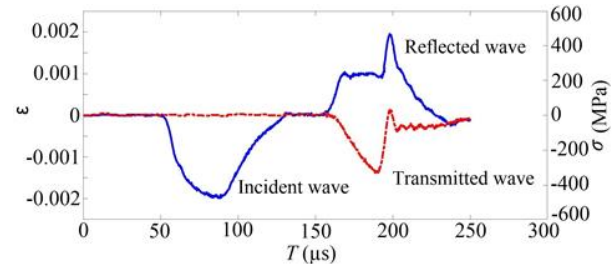


Fig 9 A set of incident waves reflected and transmitted for the S-2 glass/sc15 epoxy composite sample with a striker bar speed of 10 m/s

شکل 9 مجموعه‌ای از امواج حادثه، بازتاب‌شده و منتقل‌شده برای نمونه کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy با سرعت ضربه‌زن 10 متر بر ثانیه

در شکل 10 جزئیات موج منعکس شده متناسب با نرخ کرنش در نمونه نشان داده شده است. هنگامی که زمان کمتر از 35 میکرو ثانیه باشد، موج منعکس‌شده دارای دامنه تقریباً ثابت است که نشانگر نرخ کرنش تقریباً ثابت در نمونه است. بعد از گذشت زمان از 35 میکرو ثانیه، موج منعکس‌شده افزایش شدید می‌یابد و این نشان می‌دهد که نمونه آسیب دیده است. سطح انتهایی میله حادثه با مقاومت بسیار کمتری از نمونه آسیب‌دیده مواجه می‌شود و در نتیجه سرعت در میله حادثه سریع‌تر می‌شود، همان طور که با افزایش شدید موج منعکس‌شده، نشان داده می‌شود.

نیروی محوری که در قسمت جلویی در تماس با میله حادثه (F_1) است، از تفاوت بین موج‌های حادثه و منعکس‌شده محاسبه می‌شود و از موج منتقل‌شده، نیرو در انتهای عقب که در تماس با میله انتقال است (F_2)، محاسبه می‌شود. بر اساس تئوری موج تنش یک بعدی، F_1 و F_2 به ترتیب توسط رابطه‌های (9) و (10) محاسبه می‌شوند [17]. نزدیکی به تعادل دینامیکی در نمونه را می‌توان با در نظر گرفتن پارامتر $R(t)$ که از رابطه (11) محاسبه می‌شود، ارزیابی کرد [18].

$$F_1 = AE(\epsilon_I + \epsilon_R) \quad (9)$$

$$F_2 = AE\epsilon_t \quad (10)$$

$$R(t) = \left| \frac{\Delta\sigma(t)}{\sigma_{avg}(t)} \right| = 2 \left| \frac{F_1 - F_2}{F_1 + F_2} \right| \quad (11)$$

¹ Tasdemirci

- نرخ کرنش 550 s^{-1} و 2250 s^{-1} انجام شده است که در نرخ کرنش 5 s^{-1} نمونه آسیب ندیده است و پاسخی الاستیک می‌دهد در حالی که در نرخ کرنش 2250 s^{-1} نمونه بعد از تحمل 35 میکروثانه نیروی فشاری دچار آسیب شده است که تقریباً در طی این 35 میکروثانه شرایط نرخ کرنش ثابت و تعادل دینامیکی برقرار بوده است. این واقعیت‌ها نشان می‌دهد که منحنی تنش-کرنش فشاری دینامیکی حاصل از چنین شبیه‌سازی هاپکینسون فشاری طراحی شده، معتبر بوده و توضیحی دقیق و مطمئن از پاسخ مکانیکی دینامیکی از ماده کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy ارائه می‌دهد.

8- مراجع

- [1] Shokrieh, M. M. and Omidi, M. J., "The Impact Resistance of Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review," In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 24, pp. 255-277, 2011.
- [2] Spaniol, J. R., "Design of a Split Hopkinson Pressure Bar Facility for Dynamic Material Characterization," MSc Thesis, Rutgers University, New Jersey, 2019.
- [3] Song, B., Chen, W. and Weerasooriya, T., "Quasi-Static and Dynamic Compressive Behaviors of a S-2 Glass/Sc15 Composite," Journal of Composite Materials, Vol. 37, No. 19, pp. 1723-1743, 2003.
- [4] Tasdemirci, A. and Hal, I. W., "Numerical and Experimental Studies of Damage Generation in a Polymer Composite Material at High Strain Rates," Journal of Polymer testing, Vol. 25, No. 6, pp. 797-806, 2006.
- [5] Arbaoui, J., Tarfaoui, M. and Alaoui, A. E. M., "Mechanical Behavior and Damage Kinetics of Woven E-Glass/Vinylester Laminate Composites under High Strain Rate Dynamic Compressive Loading: Experimental and Numerical Investigation," International Journal of Impact Engineering, Vol. 87, pp. 44-54, 2016.
- [6] Hu, J., Yin, S., Yu, T. and Xu, J., "Dynamic Compressive Behavior of Woven Flax-Epoxy-Laminated Composites," International Journal of Impact Engineering, Vol. 117, pp. 63-74, 2018.
- [7] Chen, W. W. and Song, B., "Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications," Springer Science & Business Media, 2010.
- [8] Gama, B. A., "Split Hopkinson Pressure Bar Technique: Experiments, Analyses and Applications," PhD Thesis, University of Delaware, USA 2004.
- [9] Gray III, G. T., "Classic Split Hopkinson Pressure Bar Testing," ASM handbook, Vol. 8, pp. 462-476, 2000.
- [10] Accessed; <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=adaadfefb20417db13ce8d3683dbccc>.
- [11] Naghdabadi, R., Ashrafi, M. and Sohrabpour, S., "Experimental and Numerical Study of Parameters Shaping the Incident Pulse in Split Hopkinson Pressure Bar Test," In Persian, Scientific Journal of Aerospace Mechanics, Vol. 6, No. 4, PP. 71-80, 2010.
- [12] Bertarelli, A., "Beam-Induced Damage Mechanisms and Their Calculation," arXiv preprint arXiv:1608.03056, 2016.
- [13] Committee, A. I. H., "Asm Handbook: Mechanical Testing and Evaluation," ASM International, 2000.
- [14] Chen, W., Subhash, G. and Ravichandran, G., "Evaluation of Ceramic Specimen Geometries Used in a Split Hopkinson Pressure Bar," Dymat Journal, Vol. 1, No. 3, pp. 193-210, 1994.
- [15] Song, B., Chen, W. and Frew, D. J., "Dynamic Compressive Response and Failure Behavior of an Epoxy Syntactic Foam," Journal of composite materials, Vol. 38, No. 11, pp. 915-936, 2004.



بررسی تاثیر پارامترهای چاپ سه بعدی در تغییر شکل ساختارهای مسطح به شکل های سه بعدی

مریم جمشیدی¹، ایمان سلیمی نژاد²، محمد گلزار^{3*}، امیر حسین بهروش⁴

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
4- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 111-14115، m.golzar@modares.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>فناوری چاپ سه بعدی یکی از روش های نوین ساخت است که می تواند برای ساخت ساختارهای تاشونده مورد استفاده قرار گیرد. ساختارهای تاشو به صورت مسطح ساخته شده و با اعمال محرک به شکل های سه بعدی تغییر شکل می یابند. فرایند لایه نشانی مذاب یکی از مرسوم ترین و ارزان ترین فرایندهای چاپ سه بعدیست که در این پژوهش موثرترین پارامترهای این فرایند مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور ابتدا با طراحی آزمایش به روش تاگوچی مقادیر بهینه پارامترهای چاپ شامل الگوی چاپ، ضخامت هر لایه، درصد پر شدن و دمای نازل برای رسیدن به حداکثر تغییر شکل (انحنا) مشخص شدند. سپس با تنظیم این پارامترها، تاثیر پارامتر سرعت چاپ و ضخامت کل بر انحنا بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش سرعت چاپ انحنا افزایش و با افزایش ضخامت کل انحنا کاهش می یابد. همچنین با فرض اینکه انحنا تنها ناشی از تغییرات حرارتی است روابط با استفاده از نظریه کلاسیک لایه ای استخراج و با نتایج تجربی مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که تنها تغییرات حرارتی عامل ایجاد انحنا نیست و به نظر می رسد عوامل دیگری مانند تنش های پسماند و خاصیت حافظه شکلی دخیل باشند.</p>	<p>دریافت: 1399/09/05 پذیرش: 1399/11/10 کلیدواژگان: الگوی چینش، چاپ سه بعدی، تغییر شکل، تئوری کلاسیک لمینت، فعال سازی حرارتی</p>

Investigation of the Effect of 3D printing parameters on shape-shifting of flat structures to Three-Dimensional Shapes

Maryam Jamshidi, Iman Salimi Nezhad*, Mohammad Golzar, Amir Hosein Behravesht

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 111-14115, Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

Keywords

Filling Pattern,
3D printing,
shape-shifting,
CLT,
Heat Activation

Abstract

3D printing technology is one of the new manufacturing methods that can be used to build folding structures. Folding structures are made flat and deformed into three-dimensional shapes by an actuator. FDM process is one of the most common and cheap 3D printing processes that in this study, the most effective parameters of this process were investigated. For this purpose, the optimal values of printing parameters including printing pattern, thickness of each layer, filling percentage and nozzle temperature to achieve maximum deformation (curvature) were determined by Taguchi experiment design. Then, by adjusting these parameters, the effect of printing speed and total thickness on curvature was investigated. The results showed that with increasing printing speed, the curvature increases and with increasing the total thickness, the curvature decreases. Also, assuming that the curvature is only due to thermal changes, the relationships were extracted using the classical layer theory and compared with the experimental results. This comparison showed that thermal changes alone are not the only cause of curvature and other factors such as residual stresses and shape memory seem to be involved

1- مقدمه

فعال، می توان از این فناوری استفاده کرد که این قطعه ها می توانند شکل های پیچیده ای داشته باشند و در کاربردهای خاصی مورد استفاده قرار گیرند. از جمله مزایای ساختارهای تاشو، ساخت قطعه در اندازه های بسیار کوچک می باشد، که تاشدن دستی آن امکان پذیر نیست و یا ساخت این قطعه ها با کمک روش های سنتی نتایج مطلوبی به همراه ندارد [1]. از جمله کاربردهای ساختارهای تاشو عبارتند از الکترونیک [2]، بیوتکنولوژی [3] و

فناوری چاپ سه بعدی یکی از روش های نوین ساخت می باشد، که با صرف هزینه ی کم می توان به نتایج مطلوب دست یافت. این فناوری قادر است که یک کد برنامه نویسی شده را به یک شی فیزیکی تبدیل کند. با وجود روش های مختلف ساخت افزودنی و امکان استفاده از مواد متنوع، حوزه ی این فناوری رو به توسعه و پیشرفت است. از جمله در ساخت قطعه های

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Jamshidi, M., Salimi Nezhad, I., Golzar, M., Behravesht, A. H., "Investigation of the Effect of 3D printing parameters on shape-shifting of flat structures to Three-Dimensional Shapes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1271-1278, 2021.

روش یک مسیر جایگزین برای ساخت قطعه‌های سه‌بعدی می‌باشد، که امکان دسترسی به سطوح قطعه‌ها و ایجاد حرکت‌های مناسب فراهم شده است. به دلیل اینکه ساختارهای تاشو به صورت خودکار تا می‌شوند این امر موجب کاهش خطر برای انسان در محیط‌های خطرناک می‌شود. به عنوان مثال ماهواره‌های مسطح بعد از رسیدن به مدار با تغییر دما تا می‌شوند و یا ساختارهای نظامی بدون حضور مهندس می‌توانند مونتاژ شوند. در این روش از محرک‌های خارجی مانند حرارت، مغناطیس، الکتروسیسته و... برای تاشدن مفصل‌ها استفاده می‌شود [15]. لیو³ با قرار دادن جوهر سیاه توسط یک چاپگر رومیزی در مفصل‌های ورق پلیمری از جنس پلی استایرن و فعال-سازی قطعه به وسیله نور غیر متمرکز یک ساختار تاشو ایجاد کرد. در این ساختار جذب نور و انتقال گرما به پلیمرهای لایه‌ی زیرین باعث تغییر شکل شده و ورق مسطح به یک ساختار سه‌بعدی تبدیل شد [15]. مائو⁴ و همکارانش موفق به ساخت قطعه‌ای با رعایت توالی تاشدن، شدند. در این روش از 7 نوع پلیمر حافظه‌شکلی با دمای انتقال شیشه‌ای متفاوت برای ساخت قطعه استفاده شده است، که با قرار دادن قطعه در حمام آب گرم مفصلی که دارای پلیمر با دمای انتقال شیشه‌ای کمتر است، زودتر تا می‌شود و به همین دلیل توالی تاشدن مفصل‌ها رعایت می‌شود و مانع از قفل شدن قطعه شده است [16]. جانباز و همکارانش با استفاده از پلیمرهای حافظه‌دار و پلیمر هایپراستیک، حالت‌های تغییر شکل ساده مانند خمش، پیچش و اعوجاج را برنامه نویسی کردند. همچنین اثر متغیرهای مختلف مانند خصوصیات حرارتی مکانیکی پلیمر هایپر الاستیک، ابعاد نوار دو یا چند لایه و دمای فعال‌سازی روی مورفولوژی شکل سه‌بعدی حاصل مورد مطالعه قرار گرفت [17]. وو⁵ و همکارانش موفق به طراحی و ساخت مواد مرکب فعال که متناسب با دمای محیط می‌توانند شکل‌های مختلفی داشته باشند، شدند. این ساختار با استفاده از چاپ سه‌بعدی لایه‌های ماده مرکب با الیاف پلیمر حافظه‌شکلی متعدد و دمای انتقال شیشه‌ای متفاوت به منظور کنترل تغییر ساختار در یک زمینه لاستیکی بدست آمد. آنها نشان دادند با تنظیم میزان حجم الیاف، تغییر شکل خمشی را می‌توان کنترل کرد [18].

ون مان⁶ و همکارانش با استفاده از فرآیند چاپ سه‌بعدی و رشته پلی-لاکتیک اسید توانستند با استفاده از چاپ دوبعدی، ساختارهای سه‌بعدی بسازند. همچنین آنها موفق به چاپ قطعه‌هایی شدند که فرآیند تاشدنشان به صورت ترتیبی انجام می‌شود [19]. امروزه با توسعه پیشرفت صنعت رباتیک، ابزارهای در مقیاس کوچک و نرم جایگزین مناسبی برای مکانیزم ربات‌های معمولی شده اند. راویو⁷ پتانسیل عظیمی از ساخت افزودنی را برای ساخت قطعه‌های با هندسه پیچیده نشان داد. مونتاژ دیسک‌های صلب با مواد قابل انبساط در وسط دیسک امکان کنترل طول کشش را فراهم می‌کند. همچنین طول این قطعه‌ها با گذشت زمان در آب داغ افزایش می‌یابد [20]. فلتن⁸ و همکارانش در سال 2013 یک روش جدید ساخت ساختارهای تاشو با استفاده از پلیمرهای حافظه‌شکلی، کاغذ و مدارهای مقاومتی ارائه دادند. عملکرد مناسب و هزینه کم از نقاط قوت این روش از ساخت ساختارها با هندسه پیچیده بود [21]. تولی⁹ و همکارانش به منظور ایجاد تغییر شکل موضعی و کنترل میزان خمش قطعه، یک لایه

مهندسی مواد پیچیده [4]. با توجه به تحقیقات گسترده انجام شده بر روی پلیمرهای تخریب پذیر مانند پلی‌لاکتیک اسید¹، که خواص منحصر به فردی دارد، ادامه‌ی تحقیقات روی این پلیمر سودمند خواهد بود، زیرا این پلیمرها زیست سازگار هستند و به دلیل نرم بودن می‌توانند در ساخت بسیاری از دستگاه‌های زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار و مناسب بدن مورد استفاده قرار گیرند [15]. در میان روش‌های مختلف ساخت افزودنی روش لایه‌نشانی مذاب²، به دلیل سادگی و هزینه کم رو به توسعه و پیشرفت می‌باشد، و امروز کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلفی نظیر پزشکی، دندانپزشکی، صنایع غذایی، الکترونیک، هوافضا، معماری و... دارد. رشته‌ی پلیمری هنگام عبور از نازل تا دمایی بالاتر از دمای ذوب حرارت داده می‌شود و سپس از نازل خارج شده و روی صفحه کار قرار می‌گیرد، همچنین نازل دستگاه توسط یک سیستم کنترل عددی به صورت افقی و عمودی حرکت می‌کند [6]. از جمله ویژگی‌های مطلوب پلیمر پلی-لاکتیک اسید، دمای ذوب نسبتاً پایین آن است. به همین دلیل این پلیمر بعد از حرارت دیدن به آسانی از سر نازل خارج شده، روی صفحه‌کار دستگاه قرار می‌گیرد و شکل خود را حفظ می‌کند [7]. در هنگام چاپ قطعه با فرآیند لایه‌نشانی مذاب، اتصال میان رشته‌های پلیمری که به ترتیب روی صفحه‌کار در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، با استفاده از انرژی حرارتی مواد نیمه جامد انجام می‌شود. لذا تاریخچه‌ی دمایی رشته‌های پلیمری از عوامل مهم اتصال لایه‌ها و رشته‌ها می‌باشد [8]. در این روش به هنگام چاپ قطعه‌ها، تنش‌هایی که به دلیل حرارت پلیمر و خنک‌کاری سریع هنگام خروج از نازل در قطعه ذخیره می‌شود، به مدت طولانی در آن باقی می‌ماند. تا زمانی که قطعه مجدداً تا دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای گرم شود [9]. مفهوم چاپ چهاربعدی بر پایه‌ی فهم فناوری چاپ به روش لایه‌نشانی مذاب و اثرات حافظه‌شکلی پلیمرها توسعه داده شده است. ایده اصلی چاپ به روش لایه‌نشانی مذاب با پلیمرهای حافظه‌شکلی برای ایجاد پتانسیل در طراحی و توسعه مواد است [10]. علاوه بر پلیمرها، ژل‌های پلیمری نیز در چاپ چهار بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هیدروژل‌ها به محرک‌هایی مانند دما، تغییرات PH و آب پاسخ‌گو هستند. جذب آب در هیدروژل‌ها منجر به تغییر شکل ساختارهای تاشو می‌شود [11]. استفاده از هیدروژل‌ها کاربرد گسترده‌ای ندارد. از جمله معایب این مواد محدودیت در خواص مکانیکی می‌باشد. همچنین زمان پاسخ‌گویی به محرک خارجی مانند آب بسیار طولانی می‌باشد. به عنوان مثال برای فعال‌سازی یک قطعه به ضخامت یک میلی‌متر چندین ساعت مورد نیاز است [12]. گروه دیگری از مواد فعال الاستومرهای بلوری مایع هستند. این مواد ترکیب مواد کریستالی مایع هستند که در یک شبکه پلیمری قرار گرفته‌اند [13]-[14]. به دلیل آرایش ناهمسانگرد مولکول‌ها سفتی مواد در طول بزرگتر از جهت دیگر است. زمانی که این مواد در معرض محرک‌های خارجی مانند دما و رطوبت قرار می‌گیرند آرایش مواد تغییر کرده و باعث ایجاد ناهمسانگردی و تغییرات ابعادی در قطعه می‌شود. چاپ چهاربعدی یکی از روش‌های ساده ساخت قطعه می‌باشد، که باعث ایجاد تغییر شکل‌های مورد نظر در ساختارهای مسطح بدون نیاز به صرف هزینه‌ی بالا و سیستم‌های الکترومکانیکی گران می‌شود. در این روش با حفظ ویژگی‌های چاپ سه‌بعدی، با گذر زمان بعد چهارم به منظور تکامل شکل، خواص و عملکرد قطعه فراهم می‌شود. این

¹ PLA² FDM³ Liu⁴ Mao⁵ Wu⁶ Van Manan⁷ Raviv⁸ Felton⁹ Tolly

شناخته شده است که یک روش سیستماتیک و موثر را برای طراحی بهینه فراهم می‌کند. این روش به طور گسترده برای طراحی محصول و بهینه‌سازی فرآیند استفاده می‌شود. این امر به خاطر مزایای روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها، شامل ساده‌سازی برنامه آزمایش و مطالعه اثر متغیرهای مختلف می‌باشد. تعداد آزمایش‌های کمتر به معنی کاهش زمان و هزینه است [23]. این موضوع مخصوصاً در مورد فرآیندهای نمونه‌سازی سریع که هزینه نسبتاً بالایی دارند صادق است. تاگوچی برای آزمایش‌ها، یک آرایه متعامد از متغیرها و سطوح آن‌ها را ارائه می‌دهد. طبق روش تاگوچی حداقل تعداد آزمایش‌های لازم انجام می‌شود. جدول 1 نشان دهنده طراحی آزمایش صورت گرفته است. الگوهای چینش نشان داده شده (که عبارتند از زاویه هر لایه رسوب گذاری شده نسبت به لایه پایین آن) به صورت مداوم تا رسیدن به ضخامت 1.6 میلی‌متر تکرار می‌شوند.

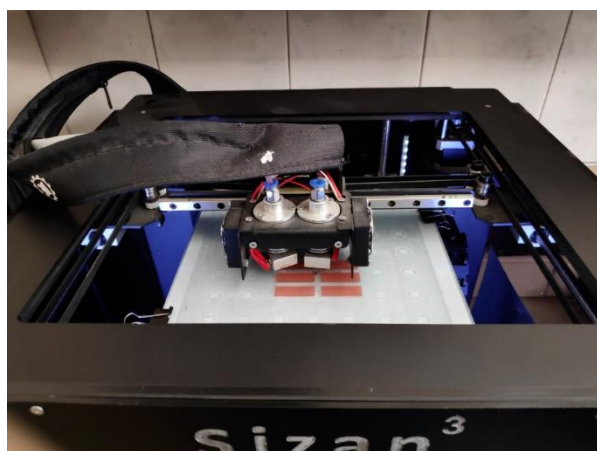


Fig. 2 Sample printing by sizan3 FDM 3D printer

شکل 2 نمایی از چاپگر سه‌بعدی سیزان 3 در حال چاپ نمونه دقت اسمی چاپ قطعات 0.02 میلی‌متر است. قطعه‌های مسطح پس از مشخص کردن پارامترهای چاپ با استفاده از نرم افزار چاپ سه بعدی Simplify 3D با روش لایه‌نشانی مذاب در دمای اتاق (دمای صفحه ساخت 25 درجه سانتیگراد) چاپ شده‌اند و سپس به منظور فعال‌سازی حرارتی در کوره قرار گرفتند. دمای کوره به وسیله‌ی ترمومتر کنترل شده است.

4- بحث در مورد نتایج

قطعه‌های سه‌بعدی که از فعال‌سازی حرارتی ساختارهای مسطح ساخته می‌شوند شامل قسمت‌های صلب و مفصل می‌باشند. در قسمت‌های صلب قطعه، باید الگوی چینشی در نظر گرفته شود که پس از فعال‌سازی حرارتی دچار تغییر شکل نشود. لذا به منظور دست‌یابی به الگوی چینش مناسب با مطالعه‌ی مقاله‌ها در زمینه قطعه‌های تاشو [19]، الگوی چینش $[0/90]_{10}$ برای قسمت‌های صلب انتخاب شد. برای مفصل‌ها با توجه به گستردگی الگوهای چینش و پارامترهای چاپ قطعه‌ها، به منظور دست‌یابی به مقادیر مناسب از پارامترها، طراحی آزمایشی مطابق بخش 3 صورت گرفت که مقادیر بهینه به منظور ساخت قطعه‌های سه‌بعدی مشخص شد. در واقع این تحلیل به منظور بررسی اثر متغیرها بر مقادیر خروجی انجام می‌شود در شکل 3- الف، الگوی چینش p_5 که نصف ضخامت قطعه الگوی صفر درجه و نصف دیگر با الگوی نود درجه پر شده است، دارای بیشترین میزان انحنای است و در واقع

پلیمر فعال را در بین دو لایه غیر فعال قرار دادند. آنها با استفاده از این روش لایه فعال را مقید کردند. با اعمال محرک خارجی در محل مورد نظر تنش-هایی ایجاد می‌شود که منجر به تغییر شکل خمشی قطعه می‌شود. آنها با تنظیم اندازه گپ توانستند میزان خمش را کنترل کنند [22]. در این پژوهش همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، ابتدا نوارهای مستطیلی با الگوهای چینش در زوایای مختلف، با استفاده از فرآیند لایه-نشانی مذاب چاپ می‌شوند. سپس ساختار مسطح چاپ شده در معرض دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌لاکتیک اسید قرار می‌گیرد. با افزایش دما، قطعه از حالت صاف و دوبعدی در شکل 1-ب به آهستگی تغییر شکل می‌یابد و به شکل سه بعدی و خم شده تبدیل می‌شود (شکل 1-ج). همچنین به بررسی علت مکانیزم تغییر شکل پرداخته شده است، که بتوان میزان انحنای نمونه‌ها را قبل از فرآیند چاپ و فعال‌سازی حرارتی تا حدی پیش‌بینی کرد و به منظور استفاده از نمونه‌ها در کاربردهای متنوع بتوان پارامترهای چاپ بهینه را قبل از فرآیند ساخت پیش‌بینی کرد.

2- مواد و تجهیزات

در این پژوهش از رشته‌های پلیمری پلی‌لاکتیک اسید شرکت مجیک به قطر 1.75 میلی‌متر و چاپگر سه‌بعدی سیزان 3 با قطر نازل 0.5 میلی‌متر استفاده شده است (شکل 2). این دستگاه دارای سیستم حرکتی ریل واگن است که از دقیق‌ترین سیستم‌های حرکتی مورد استفاده در چاپگرهای صنعتی است.

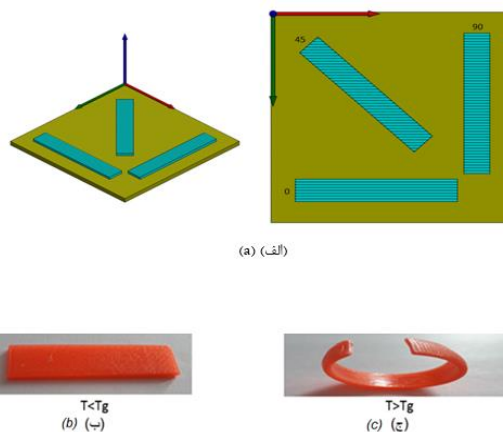


Fig. 1 (a) printing pattern for different angles, (b) printed specimen, (c) stimulated specimen

شکل 1 الف، الگوی چینش در زوایای مختلف (ب)، نمونه بعد از چاپ (ج)، نمونه بعد از فعال‌سازی حرارتی

3- طراحی آزمایش

امروزه طراحی آزمایش به طور وسیعی در زمینه‌های مختلف مهندسی برای اصلاح و افزایش عملکرد فرآیند، استفاده می‌شود. شناخت کافی نسبت به متغیرهای مورد بررسی در آزمایش، یکی از نیازهای اساسی برای شروع طراحی آزمایش است. این شناخت کمک می‌کند تا مقدار سطوح و طراحی آزمایش به درستی صورت گیرد. طراحی آزمایش در واقع ابزار تشخیص صحیح عوامل موثر و درصد تاثیرگذاری هر متغیر است. در انجام یک آزمایش متغیرهای بسیاری تاثیرگذار هستند ولی در طراحی آزمایش از عوامل با تاثیرگذاری کم صرف‌نظر می‌شود. روش تاگوچی یک تکنیک

1-4- بررسی اثر پارامترهای چاپ موثر در تغییر شکل قطعات

1-1-4 - بررسی اثر الگوی چینش

تغییرات میزان انحنا در الگوهای چینش مختلف، در شکل 4 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پس از الگوی p5 بیشترین مقدار تغییر شکل را الگوی p1 دارد. اختلاف بیشتر در زوایای الگوی چینش باعث افزایش اختلاف کرنش‌ها و در نتیجه تغییر شکل بیشتر شده است. همچنین الگوی چینش، جهت تنش‌های ذخیره شده در قطعه را تعیین می‌کند.

1-4-2 - بررسی اثر ضخامت با توجه به نتایج بدست آمده الگوی [08/908] عکس‌العمل بیشتری به محرک خارجی نشان می‌دهد و بیشترین انحنا را در فعال‌سازی حرارتی دارد. بدین منظور برای استفاده از این الگو در ساخت قطعه‌های سه‌بعدی نسبت‌های متفاوتی در الگوی چینش [0/90] با سه نوع ضخامت متفاوت در نظر گرفته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. شکل 5 بیانگر میزان انحنا در ضخامت‌های متفاوت است. در شکل 6 قطعات چاپ شده با ضخامت‌های 0.6، 1.2، 1.8 میلی‌متر، پس از تغییر شکل دیده می‌شود. همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، از چپ به راست در هر سه قطعه با افزایش ضخامت میزان انحنا کاهش می‌یابد. همچنین الگوهایی که تعداد مساوی از الگوی چینش [0/90] را دارند و یا الگوی صفر درجه بیشتر از 90 درجه است انحنا بیشتری دارند، این امر به دلیل مسیر حرکت نازل و افزایش میزان تنش‌های ذخیره شده در قطعه است که پس از فعال‌سازی حرارتی این تنش‌ها آزاد شده و منجر به تغییر شکل بیشتر می‌شود [19]. برای ساخت قطعه‌های سه‌بعدی بسته به میزان انحنا مورد نظر در مفصل‌ها و ضخامت قطعه می‌توان از این الگوها استفاده کرد.

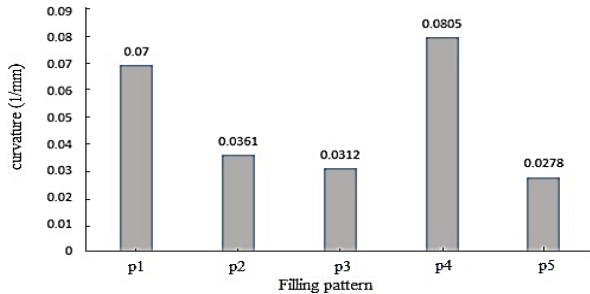


Fig. 4 The effect of filling pattern on curvature size

شکل 4 بررسی اثر الگوی چینش در اندازه انحنا

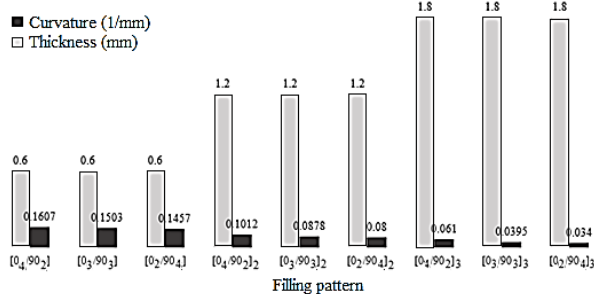


Fig. 5 curvature values for different filling patterns

شکل 5 اندازه ی انحنا در نسبت های مختلف الگوی چینش [0/90]

بیشترین پاسخ را به فعال‌سازی حرارتی داده است. میزان اختلاف کرنش‌ها در این الگوی چینش بیشتر از سایر الگوها بوده و این امر منجر به تغییر شکل بیشتر شده است. در شکل 3-ب، 100٪ پر شدن قطعه مقدار بهینه در پاسخ به محرک خارجی می‌باشد. مطابق شکل 3-ج، اگر دمای نازل 210 درجه باشد بیشترین میزان انحنا ایجاد می‌شود. در دمای پایین‌تر گرانروی ماده بیشتر شده و در یک ارتفاع لایه ثابت گرادیان حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین در ماه‌های بالا با زیاد شدن سیالیت ماده خروجی از سر نازل، ماده به اندازه‌ای روان می‌شود که بر روی سطح ماده پخش شده و اتصال ضعیف تری حاصل می‌شود و دقت ابعادی و کیفیت چاپ کاهش می‌یابد. و شکل 3-د نشان می‌دهد ضخامت لایه 0.1 مقدار بهینه در پاسخ‌گویی به فعال‌سازی حرارتی می‌باشد.

جدول 1 طراحی آزمایش به روش تاگوچی، مقادیر پارامترها

Table 1 Tagouchi design of experiment parameter, parameter values

شماره الگوها	الگوی چینش	درصد پر شدن	دمای نازل (°c)	ضخامت لایه (mm)	انحنا ⁻¹ (m)
p1	[0/+45/-45]	100	190	0.1	70
p1	[0/+45/-45]	85	210	0.15	44
p1	[0/+45/-45]	70	230	0.2	23
p2	/ concentric/0	100	190	0.15	31
p2	/ concentric/0	85	210	0.2	18
p2	/ concentric/0	70	230	0.1	11
p3	[0 ₄ /90 ₄]	100	210	0.1	32
p3	[0 ₄ /90 ₄]	85	230	0.15	5
p3	[0 ₄ /90 ₄]	70	190	0.2	22
p4	[30 ₂ /45 ₂]	100	230	0.2	7
p4	[30 ₂ /45 ₂]	85	190	0.1	25
p4	[30 ₂ /45 ₂]	70	210	0.15	14
p5	[0 ₈ /90 ₈]	100	210	0.2	84
p5	[0 ₈ /90 ₈]	85	230	0.1	55
p5	[0 ₈ /90 ₈]	70	190	0.15	31
p6	[0] ₁₆	100	230	0.15	14
p6	[0] ₁₆	85	190	0.2	26
p6	[0] ₁₆	70	210	0.1	21

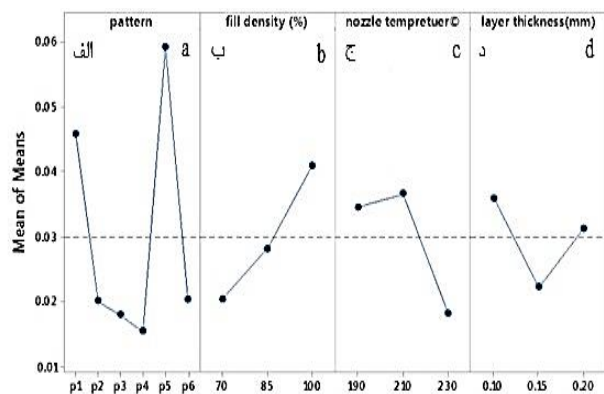


Fig. 3 software analysis results: a) filling pattern, b) fill density, c) nozzle temperature and d) layer thickness

شکل 3 تایج تحلیل نرم افزاری (الف) الگوی چینش، (ب) درصد پر شدن، (ج) دمای نازل، (د) ضخامت هر لایه

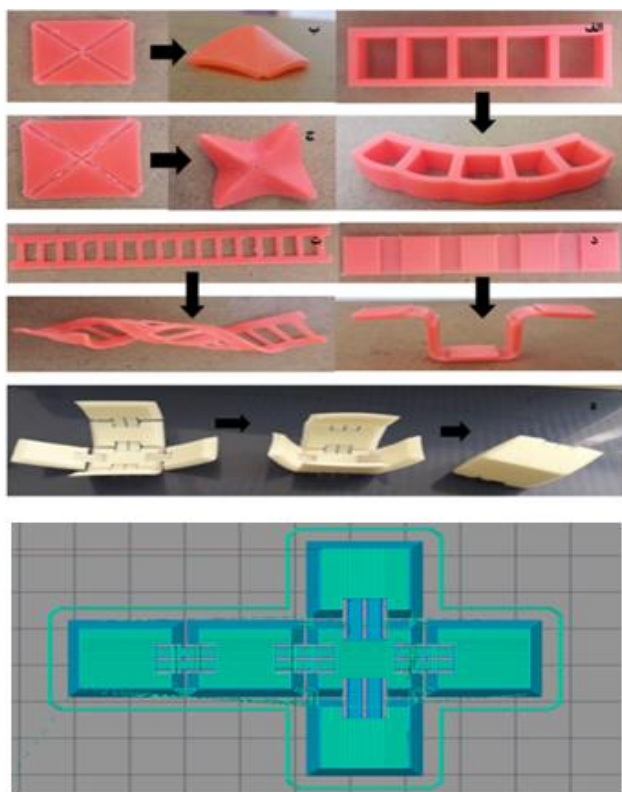


Fig. 8 By applying a different printing pattern in certain areas of each structure and thermally actuate it, desired shape shifting would be reached

شکل 8 اعمال الگوی چینش متفاوت در بخش‌های خاصی از هر قطعه و فعال‌سازی حرارتی آن، می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های مورد نظر بدون دخالت دست شود.

2-4- بررسی اثر پارامترهای چاپ موثر در تغییر شکل قطعات

پس از تهیه‌ی 3 نمونه منطبق بر استاندارد ASTM-D638- (type IV) 02a [24] نمونه‌ها توسط دستگاه کشش 2 تن santam-20 با سرعت 2 mm/min تحت آزمایش کشش تک‌محوری قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون کشش در شکل 9 نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارهای شکل 9 مشخص است مدول الاستیک الگوی چینش 90 درجه، 2.1 گیگاپاسکال و مدول الاستیک الگوی چینش صفر درجه، 1.9 گیگاپاسکال است.

همچنین همان‌طور که در جدول 2 نشان داده شده است، دو نوع نمونه به ابعاد 2*30*30 میلی‌متر که با الگوی صفر و نود درجه پر شده اند، چاپ شد و میزان کرنش در دو جهت با استفاده از روش DIC در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، اندازه‌گیری شد. به منظور اطمینان از نتایج آزمایش از هر نمونه 3 عدد چاپ شد. سرعت چاپ در این آزمایش 60 میلی‌متر بر ثانیه است.

در این قسمت فرض شده است که انحنا، ناشی از تنش‌های داخلی (روش ساخت، حرارتی، مکانیکی و ...) است. انحنا هر نمونه با استفاده از روشی مشابه DIC به دست آمد که در شکل 10 نشان داده شده است. پس از اندازه‌گیری انحنا نمونه‌ها، با استفاده از روابط CLT برای مواد مرکب و با فرض اینکه لایه نشانی مذاب لایه‌های ناهمسانگردی دارند، ماتریس $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}$ برای نسبت‌های مختلف الگوی چینش [0/90] محاسبه شد و سپس ممان



Fig. 6 thermally actuated specimens

شکل 6 نمونه‌های مستطیلی پس از فعال‌سازی حرارتی
3-1-4- بررسی اثر سرعت چاپ

به منظور بررسی اثر سرعت چاپ در میزان تغییر شکل، الگوی چینش $[0_3/90_3]$ در نظر گرفته شد و قطعه‌ها با سه سرعت متفاوت چاپ شدند. نتایج حاصل از این آزمایش همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، بیان می‌کند که با افزایش سرعت چاپ، انحنا افزایش می‌یابد. در واقع، با افزایش سرعت چاپ PLA مذاب با سرعت بیشتری سرد می‌شود و پلیمر زمان کمتری برای استراحت دارد و در نتیجه تنش بیشتری در قطعه ذخیره می‌شود. علاوه، افزایش سرعت چاپ، باعث کشش بیشتر رشته‌های مذاب PLA می‌شود و در نتیجه تنش کششی بیشتری در نمونه ذخیره می‌شود که این به معنی انقباض (کرنش) بیشتر نمونه در حین فعال‌سازی است [17]، [19]. با استفاده از نتایجی که از آزمایش قطعه‌های مستطیلی با ویژگی‌های متفاوت بدست آمد، پارامترهای مناسب که در ادامه مشخص شده اند، به منظور چاپ اشکال سه‌بعدی انتخاب شد. در این بخش چندین قطعه همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است پس از چاپ به صورت مسطح در معرض فعال‌سازی حرارتی قرار گرفتند و تبدیل به اشکال سه‌بعدی مورد نظر شدند. برای این منظور قسمت‌های خاصی از قطعات که به آنها مفصل نیز گفته می‌شود با تنظیم میزان بهینه پارامترهای ضخامت، سرعت چاپ، الگوی چینش و ... که از بخش‌های قبل به دست آمد چاپ شدند تا پس از تحریک به انحنا مورد نظر برسند. به عنوان نمونه فایل جی کد قطعه مکعبی در شکل 8، آورده شده است. در این قطعه الگوی چینش در قسمت‌های صلب $[0/90]_{10}$ می‌باشد و الگوی چینش مفصل‌ها $[0_7/90_7]$ است. همچنین مقادیر بهینه سایر پارامترها که برای مفصل‌ها و قسمت‌های صلب یکسان است عبارتند از: دمای نازل 210 درجه، درصد پر شدن 100٪، ضخامت هر لایه 0.1 میلی‌متر و سرعت چاپ 60 میلی‌متر بر ثانیه است.

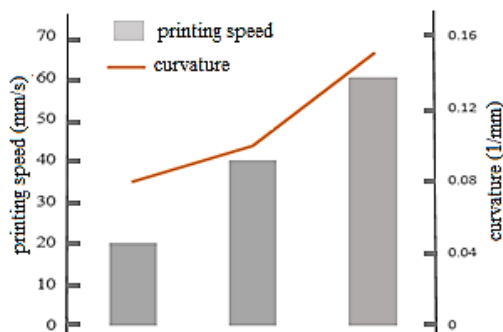


Fig. 7 curvature changes for different printing speeds

شکل 7 تغییرات اندازه انحنا در سرعت‌های چاپ متفاوت

نمونه واقعی و نمونه طراحی شده به کمک شاخص، 4- اعمال انحنای به نمونه طراحی شده تا زمانی که بر روی نمونه واقعی فیت شود

جدول 3 مقادیر ممان خمشی محاسبه شده

Table 3 measured moments

M_x (N)	K_{xy}	K_y	$K_x(m^{-1})$	ضخامت (mm)	الگوی چینش
7	0	0	160±8	0.6	[0 ₄ /90 ₂]
6.6	0	0	150±8	0.6	[0 ₃ /90 ₃]
6.4	0	0	146±7	0.6	[0 ₂ /90 ₄]
35.2	0	0	100±5	1.2	[0 ₄ /90 ₂] ₂
30.9	0	0	88±5	1.2	[0 ₃ /90 ₃] ₂
28.1	0	0	80±4	1.2	[0 ₂ /90 ₄] ₂
46	0	0	39±2	1.8	[0 ₄ /90 ₂] ₃
44.5	0	0	39±2	1.8	[0 ₃ /90 ₃] ₃
40.4	0	0	34±2	1.8	[0 ₂ /90 ₄] ₃

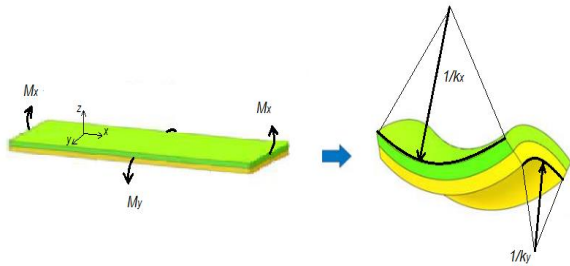


Fig. 11 schematic of momentums and curvatures in x and y directions

شکل 11 شماتیک ممانها و انحناها در راستای محورهای x و y

3-4- محاسبه انحنا

با فرض اینکه مقدار کرنش حرارتی مساوی مقدار کرنش اندازه گیری شده در قسمت قبل می باشد، با استفاده از رابطه 3 می توان ممان حرارتی را محاسبه نمود و با استفاده از مقادیر بدست آمده میزان تغییر شکل ایجاد شده در قطعه ناشی از حرارت را محاسبه کرد. در واقع در این قسمت فرض می کنیم تنها ممان حرارتی باعث ایجاد انحنا در قطعه می شود. اختلاف دما 70 درجه در نظر گرفته شده و ضرایب انبساط حرارتی معادل، از رابطه 2 محاسبه شده است.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^T \\ \epsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \end{bmatrix} = \Delta T \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[M^T] = \begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \Delta T \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (3)$$

در نمودار شکل 12 مقادیر M_{total} یعنی ممانی که باعث ایجاد انحنای نمونه های آزمایش شده و مقادیر M_T یعنی ممان حرارتی برای الگوهای مختلف باهم مقایسه شده است. این مقایسه نشان می دهد که این فرض که تنها ممان حرارتی عامل ایجاد انحناست غیر واقعی و ناکافی است و باید

خمشی برآیند ناشی از تنش های داخلی مطابق رابطه 1 محاسبه شد. در جدول 3 مقادیر

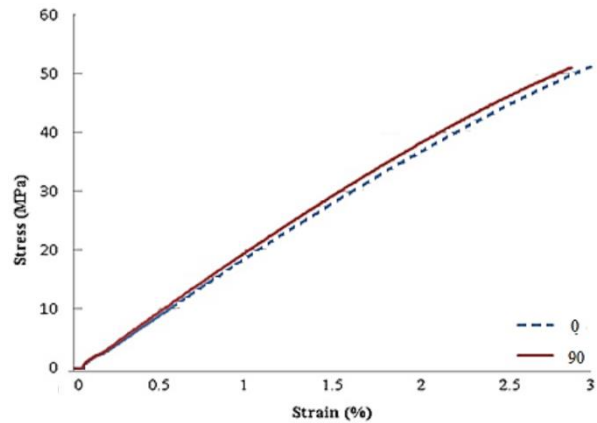


Fig. 9 0 and 90° filling pattern stress-strain curves

شکل 9 نمودار تنش کرنش الگوی چینش نود و الگوی چینش صفر درجه

جدول 2 کرنش های اندازه گیری شده

Table 2 measured strains

جهت گیری رشته ها	ϵ_2	ϵ_1
0	0.048	-0.197
90	-0.197	0.048

ممان خمشی ایجاد شده در قطعه ها با الگوها و ضخامت های مختلف محاسبه شده است. مطابق شکل 11 K_x انحنا در راستای محور x، K_y انحنا در راستای محور Y، M_x گشتاور حول محور Y و M_y گشتاور حول محور X است. با توجه به اینکه عرض قطعه (ابعاد در راستای محور Y) بسیار کمتر از طول قطعه (ابعاد در راستای محور X) است، بنابراین از خمش در راستای محور Y صرف نظر کرده و در ادامه متن فقط M_x و K_x بررسی می شوند.

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

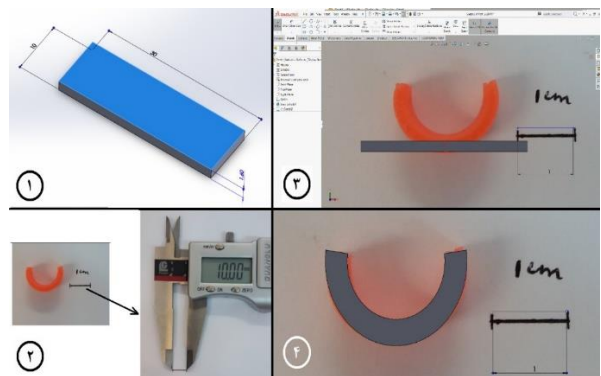


Fig. 10 specimen curvature measurement: 1-Designing a virtual specimen using CAM software, 2- taking a photo of real specimen along with a gauge, 3- importing the photo to the CAM software and scaling it to match the virtual specimen, 4- applying curvature to the virtual specimen so that it fits the real specimen

شکل 10 مراحل اندازه گیری انحنای نمونه: 1- طراحی نمونه در نرم افزارهای CAM، 2- عکس برداری از نمونه ی واقعی به همراه یک شاخص دقیق، 3- وارد کردن عکس نمونه به نرم افزار و یکسان سازی

عوامل ایجاد انحنای شناسایی شوند. در مطالعات بعدی هدف توسعه مدلی مناسب جهت پیش‌بینی انحنای این قطعات است.

یکی از مهمترین عوامل تغییرشکل در قطعات ضخیم، تنش حرارتی می‌باشد.

مشخص شد که تنها تنش‌های حرارتی عامل خمش قطعات نیستند و عوامل مانند خاصیت حافظه شکلی و تنش پسماند نیز در ایجاد انحنای و خمش موثراند که در مطالعات بعدی به بررسی و مدلسازی این عوامل پرداخته می‌شود.

6- مراجع

- [1] Na, J.H., et al., "Programming reversibly self-folding origami with micropatterned photo-crosslinkable polymer trilayers," *Advanced Materials journal*, Vol. 1, No. 27, pp. 79-85, 2015.
- [2] Gracias, D.H., et al., "Forming electrical networks in three dimensions by self-assembly," *science journal*, Vol. 289, No. 5482, pp. 1170-1172, 2000.
- [3] Randall, C.L., Gultepe, E., and Gracias, D.H., "Self-folding devices and materials for biomedical applications," *Trends in biotechnology journal*, Vol. 3, No. 30, pp. 138-146, 2012.
- [4] Xia, F., et al., "Two-dimensional material nanophotonics," *Nature Photonics journal*, Vol. 8, No. 12, pp. 899-914, 2014.
- [5] Hu, J., et al., "Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications," *Progress in Polymer Science journal*, Vol. 37, No. 12, pp. 1720-1763, 2012.
- [6] Hopkinson, N., Hague, R. and Dickens, P., "Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age," *John Wiley & Sons*, pp. 356-357, 2006.
- [7] Allen, R.J. and Trask, R.S., "An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot," *Additive Manufacturing journal*, Vol. 8, pp. 78-87, 2015.
- [8] Bellehumeur, C., et al., "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 6, No. 2, pp. 170-178, 2015.
- [9] Lee, A.Y., An, J. and Chua, C.K., "Two-way 4D printing: a review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials," *Engineering journal*, Vol. 3, No. 5, pp. 663-674, 2017.
- [10] Bodaghi, M., Damanpack, A. and Liao, W., "Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing," *Materials & Design journal*, Vol. 135, pp. 26-36, 2017.
- [11] Ionov, L., "Hydrogel-based actuators: possibilities and limitations," *Materials Today*, 17(10): p. 494-503, 2014.
- [12] Jeon, S.-J., Hauser, A.W. and Hayward, R.C., "Shape-morphing materials from stimuli-responsive hydrogel hybrids," *Accounts of chemical research journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 161-169, 2017.
- [13] Woltman, S.J., Jay, G.D. and Crawford, G.P., "Liquid-crystal materials find a new order in biomedical applications," *Nature materials journal*, Vol. 6, No. 12, pp. 929-938, 2007.
- [14] Ohm, C., Brehmer, M., and Zentel, R., "Liquid crystalline elastomers as actuators and sensors," *journal of Advanced Materials*, Vol. 22, No. 31, pp. 3366-3387, 2010.
- [15] Liu, Y., et al., "Self-folding of polymer sheets using local light absorption," *Soft matter journal*, Vol. 8, No. 6, pp. 1764-1769, 2012.
- [16] Mao, Y., et al., "Sequential self-folding structures by 3D printed digital shape memory polymers," *Scientific reports journal*, pp. 13616-13628, 2015.
- [17] Janbaz, S., Hedayati, R. and Zadpoor, A., "Programming the shape-shifting of flat soft matter: from self-rolling/self-twisting materials to self-folding origami," *Materials Horizons journal*, Vol. 3, No. 6, pp. 536-547, 2016.
- [18] Wu, J., et al., "Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers," *Scientific reports journal*, pp. 24224-24238, 2016.

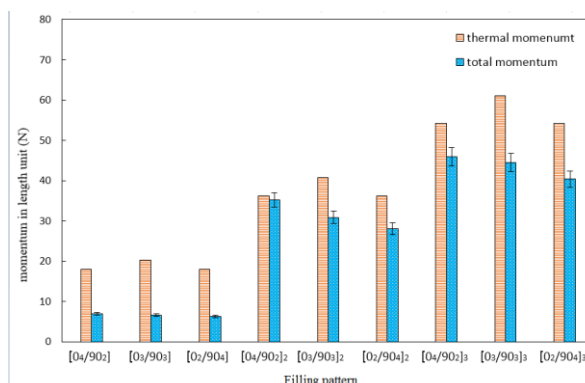


Fig. 12 Comparison of total and thermal momentums for different filling patterns

شکل 12 مقایسه ممان کل و ممان حرارتی برای الگوهای چینش مختلف

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به طور خلاصه در زیر آورده شده است:

- چاپ قطعه‌ها با الگوی چینش مختلف نشان داد که علت مکانیزم تاشدن تنش‌هایی است که در هنگام چاپ مواد به دلیل حرارت و چرخه خنک-کاری سریع و فشار ناشی از لایه‌های موجود در قطعه انباشته می‌شود. بعد از کامل شدن فرآیند چاپ، تنش‌های داخلی به مدت طولانی در مواد چاپ شده باقی می‌ماند تا زمانی که قطعه در دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای گرم شود، با گرم شدن تنش‌های درونی در قطعه آزاد می‌شوند که منجر به تغییرشکل قطعه می‌شود. با ایجاد گرادین تنش در طول ضخامت ماده، یک گشتاور خمشی ایجاد می‌شود که باعث تغییرشکل خمشی خارج از صفحه می‌شود. الگوی چینش جهت تنش‌های ذخیره شده در ماده را تعیین می‌کند که منجر به تغییر شکل موردنظر خواهد شد.
- میزان بهینه چهار پارامتر الگوی چاپ، دمای نازل، ضخامت هر لایه و درصد پر شدن برای رسیدن به حداکثر انحنای به دست آمد که به ترتیب عبارتند از: $[0_n/90_n]$ ، 210 درجه سانتیگراد، 0.1 میلیمتر و 100٪.
- بررسی اثر ضخامت در اندازه‌ی خم قطعه نشان داد که با افزایش ضخامت، اندازه انحنای کاهش می‌یابد. که علت آن افزایش مقاومت خمشی با افزایش ضخامت می‌باشد.
- ساخت قطعه با سرعت‌های متفاوت نشان داد که با افزایش سرعت چاپ میزان تغییرشکل بیشتر می‌شود، سرعت از جمله پارامترهای موثر در فرآیند فعال‌سازی حرارتی ساختارهای مسطح می‌باشد، سرعت بیشتر بارگذاری مکانیکی بیشتری را فراهم می‌کند و تنش‌ها ذخیره شده در قطعه بیشتر می‌شود. لذا در سرعت‌های چاپ بالاتر تغییرشکل قطعه بیشتر خواهد بود.
- نتایج حاصل از تست کشش نشان داد که مدول الاستیک قطعه با الگوی چینش صفر درجه و الگوی چینش نود درجه تقریباً یکسان است. همچنین مقایسه انحنای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نشان داد که

- [19] van Manen, T., Janbaz, S. and Zadpoor, A.A., "Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers," *Materials Horizons journal*, Vol. 4, No. 6, pp. 1064-1069, 2017.
- [20] Raviv, D., et al., "Active printed materials for complex self-evolving deformations," *Scientific reports journal*, 2014. 4: p. 7422. Vol. 4, pp. 7422-7429, 2014.
- [21] Felton, S.M., et al., "Self-folding with shape memory composites," *journal of Soft Matter*, Vol. 9, No. 32, pp. 7688-7694, 2013.
- [22] Tolley, M.T., et al., "Self-folding origami: shape memory composites activated by uniform heating," *Smart Materials and Structures journal*, 2014. 23(9): p. 094006. Vol. 23, No. 9, 2014.
- [23] Yang, W.p. and Tarng, Y., "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *Journal of materials processing technology*, Vol. 84, No. 3, pp. 122-129, 1998.
- [24] ASTM D 638 -02a, "Standard test method for tensile properties of plastics," 2003.



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 اول¹، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم^{2*}، نام و ... نگارنده سوم³، ... (استایل نویسندگان)

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

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

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

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

چکیده (سبک عنوان چکیده)

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

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 به‌کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

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

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

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

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

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

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

Keywords (Style: Keywords Title)

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

Abstract (Style: Abstract Title)

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

کپی و سپس چسباندن (پیست²) متن خود در این فایل، سبک³ 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 (تمپلیت¹) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با

³Style

¹ Template

² Paste

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 رومن² 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 (گریدلاین³) 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.

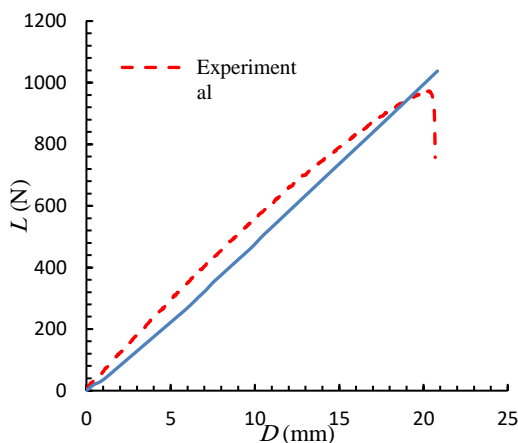


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

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

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

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

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

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

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

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

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

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی¹ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

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

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

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

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت 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 سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

³ Gridlines

¹ English (Style: Sub Title)

² Times New Roman

کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدور برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ³ 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 سطرها بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعد از سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله $(a.b)$ به جای نقطه ضرب $(a \cdot b)$ 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 املاي زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

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

در مورد «ها»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، «پیشنهادات» و «ساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهادها» 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 فارسی خطر به‌هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم علائم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست علائم باید دقیقاً یکسان باشد.

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

جدول 1 اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

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

⁽⁹⁾فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

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

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله¹ موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث² 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

³ Math Type

¹ Insert -> Symbols -> Equation

² Cambria Math

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان³ 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.

در صورت نیاز، لیست علائم 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)

علائم یونانی

σ تنش (Nm^{-2})

ε 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 لیست علائم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

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

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجددا تاکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- ✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی ارتباط 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 کامپوزیت¹ در نرم‌افزار اندنوت² 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

³ Language

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote