



بهینه‌سازی هندسی بدنه فشار شناور زیر سطحی با در نظر گرفتن تأثیر متقابل یک طرفه سازه-سیال

محسن علی گلی¹، علی اصغر عطائی^{2*}، مجتبی حقیقی یزدی²، علیرضا ریاسی²

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

* تهران، صندوق پستی 1439957131، aataee@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/05/11

پذیرش: 1401/10/17

کلیدواژگان

بهینه‌سازی، زیردریایی، کامپوزیت، هیدرودینامیک، متغیر هندسی، نیروی پسا

در مقاله‌ی حاضر، نمایه مقطع طولی و عرضی یک زیردریایی، که در عمق مشخصی قرار دارد، بر مبنای فشار هیدرودینامیک که بر بدنه زیردریایی توسط جریان سیال وارد می‌شود، از دیدگاه سازه‌ای و با در نظر گرفتن مقاومت کمانشی بدنه تحت فشار خارجی بهینه‌سازی شده است. محاسبه فشار هیدرودینامیکی با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و بهینه‌سازی هندسه بدنه با استفاده از نرم‌افزار انسیس و رکبنج انجام شده است. بدنه فشار زیردریایی تقریباً بیشترین فشار را تحمل می‌کند و از این‌رو از جنس کامپوزیت پایه پلیمری در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه هندسه‌ی مورد مطالعه و نوع بارگذاری (بار هیدرودینامیکی) در این مقاله پیچیده است و همچنین روابط تحلیلی برای بررسی تنش در این پژوهش موجود نیست، کمانش با استفاده از محاسبات نرم‌افزاری، بدست آمده و با انجام تحلیل تنش زیردریایی با هندسه اولیه مورد نظر، نیروها و تنش‌های وارده به بدنه، محاسبه شده و از نظر هیدرودینامیکی و سازه‌ای نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. با فرض 12 متغیر هندسی و کمینه کردن وزن و نیروی پسا به عنوان توابع هدف، توسط روش‌های بهینه‌سازی، نمایه طولی و عرضی بهینه و این روند تا رسیدن به مقادیر مطلوب تکرار می‌شود. نتایج بدست آمده در این مقاله حاکی از آن است که بکارگیری اشکال غیر دایروی همچون شبه بیضی در طراحی و ساخت زیردریایی می‌تواند جایگزین مقاطع دایروی شود.

Geometrical optimization of submarine pressure hull considering one-way fluid-solid interaction

Mohsen Aligoli¹, Aliasghar Atai^{2*}, Mojtaba Haghighi-Yazdi², Alireza Riasi²

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

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

* P.O.B 1439957131, Tehran, Iran, aataee@ut.ac.ir

Keywords

Optimization, Submarine, Composite, Hydrodynamics, geometrical variables, drag force.

Abstract

In this paper, the profile of the longitudinal and transverse sections of a submarine, which is located at a certain depth, based on the hydrodynamic pressure imposed on the submarine body by the fluid flow, from a structural point of view and considering the buckling resistance of the body under external pressure optimized. The calculation of hydrodynamic pressure has done using computational fluid dynamics analysis and body geometry optimization using ANSYS Workbench software. The pressure body of the submarine withstands almost the most pressure and hence it is considered to be made of polymer based composite material. Considering that the studied geometry and the type of loading (hydrodynamic load) in this article are complex, and analytical relationships for stress analysis are not available in this research, buckling is obtained using software calculations and by performing submarine stress analysis with the desired initial geometry, forces and stresses applied to the body have been calculated and hydrodynamically and structurally studied. Assuming 12 geometrical variables and minimizing weight and drag force as objective functions, by optimization methods, optimal longitudinal and transverse profile and this process is repeated until the desired values are reached. The results obtained in this article indicate that the use of non-circular shapes such as pseudo-ellipses in the design and construction of submarines can replace circular sections.

1- مقدمه

طولانی در زیر دریا زندگی کند. این سازه‌های پیشرفته، مدیون مسابقه تسلیحاتی جنگ سرد بین دو ابر قدرت شرق و غرب در قرن بیستم است. در حال حاضر زیردریایی‌ها، نشان‌دهنده‌ی توانمندی قابل توجه کشورها در عرصه‌های مختلف علمی و نظامی هستند [1-2]. قابل ذکر است که امروزه پیشرفت علوم در خصوص هیدرودینامیک زیردریایی، باعث بوجود آمدن زیردریایی‌های

به طور کلی زیردریایی، یک وسیله‌ی نقلیه شناور است که می‌تواند در زیر سطح آب حرکت کند و به اعماقی برسد که غواصان به آن دسترسی ندارند. اختراع زیردریایی به انسان اجازه داد تا بتواند همچون موجودات دریایی برای مدت

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Aligoli, M., Atai, A., Haghighi Yazdi, M., Riasi, A., "Geometrical optimization of submarine pressure hull considering one-way fluid-solid interaction," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1941-1951, 2023.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.554504.1785

است [10]. بین‌لی و همکاران (2017)، در تحقیقی به بهینه‌سازی لایه‌چینی و تعداد لایه‌ها در بدنه فشار زیردریایی کامپوزیتی پرداخته‌اند. در این پژوهش از بهینه‌سازی دو مرحله‌ای استفاده شده است. ابتدا درصد حجمی الیاف، ضخامت چندلایه، تعداد و ابعاد رینگ‌های تقویت‌کننده و سپس در مرحله دوم تعداد لایه‌ها بهینه‌سازی شده است [11]. پاز و موناز (2017)، نیز در پژوهشی با عنوان بهینه‌سازی چند منظوره طراحی یک حوضچه زیردریایی، به بررسی مدلی از زیردریایی با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر هندسه، با روش بهینه سازی چند هدفه (روش ژنتیک) برای یافتن مجموعه‌ای از گزینه‌های طراحی مناسب که نیاز به کاهش همزمان قطر و مقاومت فشاری دارد، پرداختند. در نهایت، برخی از راه‌حل‌ها برای این مورد طراحی با توجه به معیارهای پذیرفته شده در این مطالعه بدست آمده است [12]. آلمیدا و توناکو (2017)، در تحقیقاتشان به بررسی و طراحی مفهومی زیردریایی مسافری برای سیستم دریایی پرداختند. این مقاله راهکار نوآورانه و جدید برای حمل کارکنان سیستم های تولید نفت در دریای خزر را از ساحل به واحدهای خود که در مسیر 300 کیلومتری ساحل هستند، ارائه می‌دهد. در نهایت بهینه‌سازی هیدرودینامیکی بدنه، با استفاده از تجزیه و تحلیل دینامیکی سیالات محاسباتی نیز انجام شده است [13]. کراون و همکاران (2016)، به طراحی بدنه کامپوزیت تحت فشار پرداختند. تحقیقات آن‌ها عموماً توسعه فشار کامپوزیت را ارائه داده و توسعه یک مفهوم بدنه‌ی کامپوزیتی را برای یک بدنه غواصی یا دستگاه شناور استفاده می‌کند. این کار با ارزیابی چندین مفهوم مدل‌سازی با استفاده از تحلیل المان محدود برای وزن و سایر معیارها انجام شده است. همچنین نواقص هندسی نیز مورد توجه قرار داده شده است. این نقص‌ها عموماً نشان داده که تأثیر قابل توجهی بر عمق فروپاشی بدنه کامپوزیتی تحت فشار دارد [14]. مطبوع¹ و همکاران (1396)، به بررسی عددی و تجربی نیروهای هیدرودینامیک وارد بر یک شناور مغروق پرداختند. هدف پژوهش این است که هندسه و بدنه‌ی زیردریایی طوری طراحی و ساخته شده که حداقل میزان انرژی برای پیشرانش جهت تولید حرکت داشته باشد. در نتیجه مستلزم این است که نیروی مقاوم آبی که به شناور وارد می‌شود، در سرعت و عمق‌های مختلف حرکت کمینه باشد که انتخاب سرعت بهینه از طریق شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است [15]. صنعتی‌زاده¹¹ و همکاران (1395)، در مقاله تحلیل کماتش پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای با مقطع بیضی تحت اثر بارهای جزئی به روش نوار محدود، به دلیل پایین بودن مدول برشی عرضی مصالح کامپوزیت از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول استفاده کرده است. توابع تغییر مکان و جابجایی از ترکیب روش المان محدود و نوار محدود به دست آمده است. در این پژوهش با استفاده از تحلیل خطی مقدار ویژه، بارکمانش پوسته‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی با مقطع بیضی برای لایه‌بندی‌ها، هندسه و بارگذاری‌های جزئی محاسبه شده و نتایج آن با نتایج نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس مقایسه شده است [16]. میرزایی و بدری¹² (1392)، نیز در پژوهش بهینه‌سازی دینامیکی بدنه زیردریایی و ملحقات آن به کمک روش ژنتیک، بهینه‌سازی دینامیکی بدنه را به صورتی که نیروهای هیدرودینامیکی آن به‌صورت جداگانه مدل‌سازی شده و به‌صورت پارامتری در معادلات پایداری زیردریایی وارد شده است را انجام داده‌اند. همچنین بهینه‌سازی محل قرار گرفتن سطوح کنترل و برجک به عنوان

مدرن شده که شناسایی آن‌ها را مشکل‌تر نیز کرده است. به طور کلی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر زیردریایی تابع عواملی همچون آشفتگی جریان و شکل بدنه زیردریایی می‌باشد. به علت پیچیدگی هندسه‌ی زیردریایی و نیز پیچیده بودن مشخصات سیال اطراف آن، محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آن بصورت تحلیلی غیرممکن است. بدین جهت تنها از روش عددی و یا تجربی می‌توان نیروهای وارد بر زیردریایی را مورد مطالعه قرار داد [3]. روش‌های عددی به دلیل سرعت بالا، دقت مناسب و همچنین ارزان بودن در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی، کاربرد وسیعی دارد. همچنین در روش‌های عددی، پارامترهای مختلفی قابل تغییر و بررسی است. با استفاده از مدل‌های ریاضی می‌توان نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر جسم را به‌صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان کرد [4]. لذا به طور اساسی در مقاله‌ی حاضر، نمایه¹ مقطع طولی و عرضی یک زیردریایی، که در عمق مشخصی قرار دارد، بهینه‌سازی شده است. تحلیل این مسأله با رویکرد برهم‌کنش سیال - سازه یکطرفه انجام شده است. سپس توسط روش‌های بهینه‌سازی، نمایه طولی و عرضی بهینه می‌شود و این روند تا رسیدن به مقادیر مطلوب تکرار می‌شود. معمولاً بهینه‌سازی‌های صورت گرفته در مطالعات مربوط به زیردریایی، یا بصورت بهینه کردن بدنه برای کم کردن نیروهای پسا و یا بصورت بهینه کردن بدنه برای تحمل بار کمانشی است [5].

بدنه فشار زیردریایی²، به دلیل اینکه بیشترین قسمت بدنه را تشکیل می‌دهد، بزرگترین سطحی است که فشار را تحمل می‌کند و از جنس کامپوزیت پایه پلیمری در نظر گرفته می‌شود. مواد کامپوزیتی علاوه بر دارا بودن استحکام کافی برای سازه، باعث سبک‌تر شدن زیردریایی و در نتیجه مانورپذیری بیشتر آن می‌شود [6]. در مورد لایه‌چینی هم از لایه‌چینی متداول برای مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود. این لایه‌چینی‌ها باعث ایجاد بیشترین مقاومت از نظر کمانش می‌شود و همچنین تعداد لایه‌های مورد استفاده، باید مقداری باشد که متداول باشد و در مقالات و پژوهش‌های گذشته مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و در حال حاضر بصورت متداول در اینگونه زیردریایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [7-8]. لذا با انجام تحلیل تنش زیردریایی با هندسه اولیه مورد نظر، نیروها و تنش‌های وارده به بدنه، محاسبه می‌شود و از نظر هیدرودینامیکی و سازه‌ای بررسی می‌شود. سپس توسط روش‌های بهینه‌سازی، نمایه طولی و عرضی بهینه می‌شود و این روند تا رسیدن به مقادیر مطلوب تکرار می‌شود.

2- پیشینه تحقیق

سابقه استفاده از کامپوزیت‌های پیشرفته در دهه 1940 در آمریکا و شوروی سابق باز می‌گردد. آن‌ها در رقابتی تنگاتنگ با یکدیگر، موفق به ساخت کامپوزیت پایه پلیمری الیاف بور - رزین اپوکسی برای استفاده در صنعت هوافضا شدند. 20 تا 30 سال پس از آن، کامپوزیت‌های پایه پلیمری به طور گسترده‌ای در صنایع شهری از جمله ساختمان و حمل و نقل بکار برده شد [9]. در پژوهش واسودف³ و همکاران (2017)، به بهینه‌سازی شکل هندسی یک شناور زیرسطحی پرداخته شده است. این بهینه‌سازی صرفاً از دیدگاه دینامیک سیالات محاسباتی⁴ انجام شده است و اثرات چرخش پروانه موتور زیردریایی نیز در نظر گرفته شده است. در این بهینه‌سازی از روش ژنتیک⁵ استفاده شده و نمایه طولی زیردریایی به‌صورت پارامتری بهینه‌سازی شده

7 Paz and Munoz

8 Almeida and Tonacio

9 Craven

10 Matbo

11 Sanatizadeh

12 Mirzaee and Badri

1 Profile

2 Pressure hull

3 Vasudev

4 Computational Fluid Dynamics (CFD)

5 Genetic algorithm

6 Bin Li

در نرم‌افزار انسیس کامپوزیت پری-پست^۲ و روند بهینه‌سازی نیز آورده شده است. روند حل مسئله در شکل 1 به صورت نمادین قابل مشاهده است.

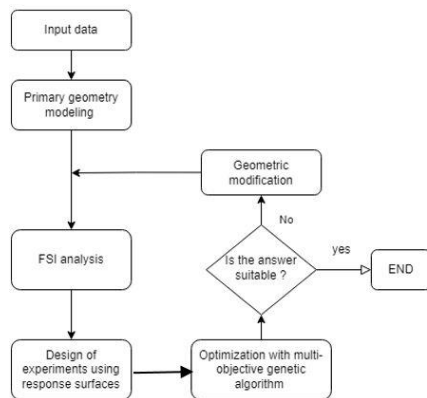


Fig. 1 Problem solving flowchart

شکل 1 روند نامی حل مسئله

3-1 مدل‌سازی هندسه بدنه زیردریایی

برای مدل‌سازی زیردریایی نیاز به یک هندسه اولیه است که این هندسه در پژوهشی توسط گراوس^۳ و همکاران [20] ارائه شده است. این نمایه هندسی بصورت تابع ریاضی برای مقاطع مختلف زیردریایی نوشته شده است. برای انجام مدل‌سازی ابتدا نقاطی که در این تابع صدق می‌کند محاسبه می‌شوند و سپس توسط نرم‌افزار سالیدورکز^۴ مدل‌سازی انجام شده است. در مرحله بعد، مدل سه‌بعدی ایجاد شده به نرم‌افزار انسیس دیزاین مدلر^۵ منتقل شده است تا مرز حل دینامیک سیالات محاسباتی ایجاد شود. هندسه زیردریایی شامل سه قسمت دماغه، بدنه فشار و دم است که تمامی این قسمت‌ها بصورت تابع ارائه شده است. قسمت دم و دماغه زیردریایی بصورت توابع درجه سه، ارائه شده‌اند. به منظور ترسیم این هندسه در نرم‌افزار مدل‌سازی، ابتدا باید نقاطی که در توابع صدق می‌کند، یافت شوند. به همین منظور با استفاده از نرم‌افزار متلب^۶ این نقاط محاسبه و یافت شده است. سپس این نقاط برای انجام مدل‌سازی به نرم‌افزار سالیدورکز منتقل شده‌اند. نقاط ذکر شده در جدول 1 ارائه شده است.

پارامترهای بهینه‌سازی برای برنامه تعریف شده است. همچنین برای مدل‌سازی نیروهای هیدرودینامیکی به روش تجزیه اثرات هر کدام از ملحقات جداگانه در نظر گرفته شده تا در برنامه بهینه‌سازی بتوان بر روی ممان‌های هیدرودینامیکی ملحقات، بهینه‌سازی صورت گیرد [17]. اکبری و همکاران (1400)، شبیه‌سازی و تحلیل هیدرودینامیکی یک شناور نظامی با در نظر گرفتن دو پروانه مخالف چرخنده، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته است. در این تحقیق از فرم بدنه شناور فریگیت DTMB5415 استفاده شده است که در قسمت اول با تغییر دادن زاویه انحنای محل جابجایی محل انحنای پاشنه، در چند حالت بهترین شکل پاشنه از نظر هیدرودینامیکی انتخاب شده است [18]. همتی و همکاران (1396)، در این ابتدا به مدل‌سازی و تعیین ممان اینرسی سکوی امیرکبیر پرداخته شده و سپس تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی به همراه مدل موج منطبق بر شرایط غالب در دریای خزر به بررسی تأثیر فرم هندسی سکوی نیمه شناور بر پاسخ سکوی پرداخته شده است. در این تحقیق ابتدا چندین پایه با اشکال مختلف و فاصله پایه‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و در انتها بهترین حالت از لحاظ جابجایی و نیروی وارده بر سکوی نیمه شناور به عنوان بهترین حالت گزارش شد [19].

با توجه به پژوهش‌های گذشته، این موضوع قابل مشاهده است که در اکثر پژوهش‌ها تحلیل بر مبنای فشار هیدرواستاتیکی بوده است و فقط بهینه‌سازی در قالب مقطع طولی زیردریایی و یا پارامترهای دیگر بوده است. نوآوری ارائه شده در مقاله حاضر، تحلیل زیردریایی تحت فشار هیدرودینامیکی بوده و بهینه‌سازی هم‌زمان هم در مقطع طولی و هم مقطع عرضی انجام گرفته است. در واقع این پژوهش در سه حوزه‌ی مختلف سیالات، جامدات و بهینه‌سازی انجام گرفته است.

3- روش حل مسئله

در شبیه‌سازی عددی پروژیه حاضر، با توجه به این که مقدار جابجایی‌های سازه کوچک است و همچنین به دلیل اینکه در بهینه‌سازی نیاز به تکرار حل برای هندسه‌های مختلف است از روش برهم‌کنش سیال-سازه یک‌طرفه استفاده شده است. در ادامه اقداماتی نظیر مدل‌سازی در چندین محیط مختلف، شبیه‌سازی و روش حل در نرم‌افزار انسیس فلونت^۱، شبیه‌سازی و روش حل

جدول 1 توابع هندسه زیردریایی

Table 1 Submarine geometry functions

تابع				
$R = R_{MAX} \left\{ 1.126x(0.3x-1)^4 + 0.442x^2(0.3x-1)^3 + 1 - (0.3x-1)^4(1.2x+1) \right\}^{1/2.1}$				
$R_{MAX} = 0.254m$				
$R = R_{MAX}$				
$R = R_{MAX} \left\{ r_h^2 + r_h k_0 \varepsilon^2 + (20 - 20r_h^2 - 4r_h k_0 - \frac{1}{3}k_1)\varepsilon^3 + (-45 + 45r_h^2 + 6r_h k_0 + k_1)\varepsilon^4 + (36 - 36r_h^2 - 4r_h k_0 - k_1)\varepsilon^5 + (-10 + 10r_h^2 + 4r_h k_0 + \frac{1}{3}k_1)\varepsilon^6 \right\}^{0.5}$				
$r_h = 0.1175$	$k_0 = 10$	$k_1 = 44.6244$	$\varepsilon = \frac{13.979167 - x}{3.33333}$	قسمت میانی $1.016 \leq x \leq 3.225$
$R = 0.1175 R_{MAX} \left[1 - (3.2x - 44.73333)^2 \right]^{0.5}$				

4 Solid Works
5 ANSYS Design Modeler
6 MATLAB

1 ANSYS Fluent
2 Ansys Composite PrepPost (ACP)
3 Groves

مدل‌های k-ε از آنجا که از فرضیات رینولدز بالا بودن جریان استفاده می‌کنند، برای حل معادلات در نواحی نزدیک دیواره با مشکلات زیادی مواجه می‌شوند. اما مدل k-ω را می‌توان برای پیش‌بینی تغییرات متغیرهای آشفتگی^۲ تا لبه دیواره‌های جامد مورد استفاده قرار داد.

3-2-1- شرایط مرزی و شبکه‌بندی

برای حل جریان حول این زیردریایی، مرز حل، بصورت یک مکعب مستطیل تعریف شده است. ابعاد این مرز با توجه به استانداردهای موجود و بصورت تجربی تعیین شده است. این مرزها باید به‌گونه‌ای تعیین شود که اثرات حاصل از گردابه‌ها و اغتشاشات جریان را بصورت کامل دربرگیرد و خود باعث بوجود آوردن اغتشاشات نامناسب نشود. فاصله این مرزها در جهت x از نوک و دم زیردریایی برابر 2 متر و در جهت y و z از سطح زیردریایی نیز برابر 2 متر است [23]. البته در استانداردهای موجود، این فاصله‌ها باید در حد 4 برابر قطر رعایت شود. قطر زیردریایی حاضر در بیشترین نقطه برابر 0.5 متر است. شرایط مرزی برای این تحلیل در شکل 4 نشان داده شده است. ضلع سمت چپ به عنوان سرعت ورودی، ضلع سمت راست فشار خروجی، اضلاع بالا و پایین و زیردریایی به عنوان دیوار در نظر گرفته شده‌اند.

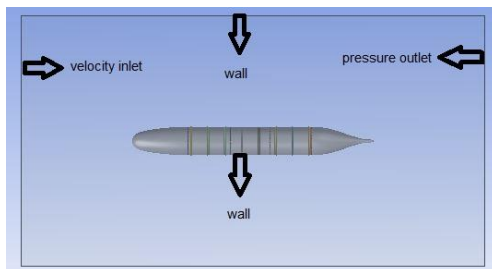


Fig. 4 Submarine Boundary Conditions

شکل 4 شرایط مرزی زیردریایی

برای شرط مرزی ورودی که از نوع سرعت است، با توجه به عدد رینولدز جریان، سرعت به‌صورت زیر محاسبه شده است:

$$Re_L = \frac{\rho u L}{\mu} = 1.2 \times 10^7 \rightarrow u = 2.8 \text{ m/s} \quad (1)$$

که در رابطه بالا L طول زیردریایی است که برابر با 4.36 متر و با توجه به خصوصیات فیزیکی آب، اعداد زیر قرار داده شده است:

$$\rho = 998.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}, \mu = 0.001 \frac{\text{Kg}}{\text{m.s}} \quad (2)$$

برای المان‌بندی نیز از نوع مش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. برای المان‌بندی در این تحلیل، از المان‌های هرمی استفاده شده است. این المان‌ها در دیواره‌های مرز حل و سطح زیردریایی بصورت منظم چیده شده‌اند. در المان‌بندی سطوح حل، سائز المان‌ها 0.2 متر و در سطح زیردریایی 0.04 متر است.

3-3- شبیه‌سازی و روش حل در کمانش

در این مقاله، برای حل کمانش بدنه زیردریایی، از نرم‌افزار انسیس و از قسمت مقدار ویژه کمانش^۳ استفاده شده است. در این بخش، قسمت‌های مختلف تحلیل توضیح داده خواهد شد.

پس از بدست آوردن نقاط نمایه زیردریایی در قسمت دماغه و دم، این نقاط به نرم‌افزار سالی‌دورکز منتقل شده‌اند. فواصل طولی این نقاط حدود 3 سانتی‌متر است. این نقاط به وسیله خطی منحنی به هم وصل می‌شود. سپس با چرخش این منحنی حول محور x، حجم سه‌بعدی دماغه و دم ایجاد می‌شود. برای ایجاد بدنه فشار، مدل‌سازی بصورت پارامتری انجام شده است. این پارامترها قابلیت تغییر دارند تا بتوانند شرایط مسأله بهینه‌سازی را ارضا نمایند و در بازه تعریف شده تغییر نمایند. همچنین در طول بدنه فشار، 7 رینگ تقویت‌کننده به فاصله 297 mm از هم ایجاد شده است. شعاع خارجی رینگ‌ها 254 mm است که مقطع آن مستطیل با ابعاد 25 × 20 mm در نظر گرفته شده است. وجود این رینگ‌ها باعث افزایش مقاومت زیردریایی نسبت به کمانش می‌شود. در نهایت نمایی کلی از زیردریایی مدل‌سازی شده در شکل 2 قابل مشاهده است. مقطع رینگ‌های تقویت‌کننده در شکل 3 نشان داده شده است.

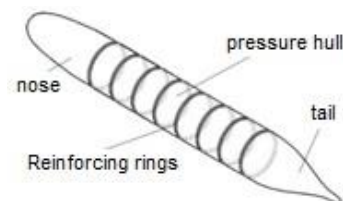


Fig. 2 Isometric view of the submarine

شکل 2 نمای سه‌بعدی زیردریایی

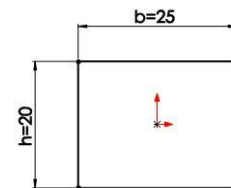


Fig. 3 Section dimensions of reinforcement rings in mm

شکل 3 اندازه مقطع رینگ‌های تقویت‌کننده به میلی‌متر

3-2- شبیه‌سازی و روش حل در محیط سیال

هدف این بخش از پژوهش این است که فشارهای اعمالی توسط جریان سیال را که شامل فشار هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی است، محاسبه شود و این میدان فشار برای محاسبه کمانش به قسمت استاتیک سازه^۱ منتقل شود. برای محاسبه جواب فشار بر روی بدنه زیردریایی از نرم‌افزار انسیس فلوئنت استفاده شده است. طول کل این زیردریایی 3.4 متر و بیشترین قطر آن 0.508 متر است. فشار در این قسمت تقریباً 18 مگاپاسکال است که بصورت هیدرواستاتیکی به تمام نقاط زیردریایی اعمال شده است. البته در این فشار، ضریب اطمینان 5.1 در نظر گرفته شده است [21]. زاویه حمله صفر درجه در نظر گرفته شده و عدد رینولدز جریان برابر 1.2E7 است [22].

برای حل دینامیک سیالات محاسباتی این جریان، از مدل جریان مغشوش k-ω استاندارد استفاده شده است. مدل‌های k-ω محبوبیت زیادی دارند زیرا دارای قدرت زیادی در هنگام انگرال‌گیری از معادلات به سمت دیواره هستند. همچنین مدل k-ω نسبت به مدل k-ε در جریان‌هایی که شامل کاهش سرعت و جدایش ناشی از گرادیان فشار معکوس هستند، بهتر عمل می‌کند. اغلب

3 Eigenvalue Buckling

1 Statics Structural
2 Turbulence

3-3-1- فشار اعمالی

فشاری که بر روی قسمت‌های مختلف زیردریایی اعمال می‌شود، نتیجه حل معادلات جریان در نرم‌افزار آنسیس فلوئنت است. پس از حل جریان حول زیردریایی در این نرم‌افزار، فشار موجود بر زیردریایی قابل انتقال به قسمت استاتیک سازه است. این فشار وارد شده از دینامیک سیالات محاسباتی، بصورت میدان فشار است که حاصل جمع برداری فشار عمودی⁴ و تنش برشی⁵ روی سطح جسم است [24]. در شکل 7 خطوط تراز فشار منتقل شده قابل مشاهده است.

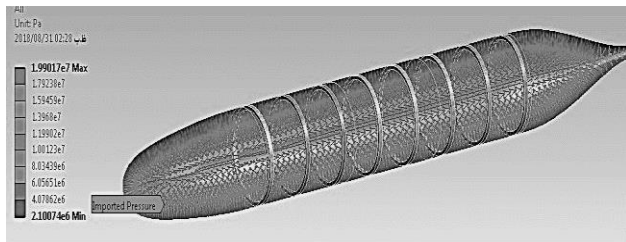


Fig. 7 Pressure contour transmitted (Pa)

شکل 7 کانتور فشار منتقل شده (Pa)

3-4- شبیه‌سازی بدنه کامپوزیتی

برای شبیه‌سازی کامپوزیت چندلایه مورد استفاده در بدنه زیردریایی و رینگ‌های تقویت‌کننده، از نرم‌افزار آنسیس کامپوزیت پری-پست استفاده شده است. در پژوهش حاضر از مشخصات چندلایه مطرح شده در پژوهش بین‌لی و همکاران استفاده شده است [11]. و در یک بهینه‌سازی اولیه، ضخامت هر لایه از این چندلایه بهینه‌سازی شده است. ضخامت لایه‌ها برابر و از جنس کربن/اپوکسی در نظر گرفته شده است. تعداد لایه‌ها، ضخامت اولیه هر لایه و لایه‌چینی بدنه و رینگ‌های تقویت‌کننده در جدول 2 آمده است.

جدول 2 مشخصات چندلایه

Table 2 laminated composite specifications

تعداد کل لایه‌ها	ضخامت هر لایه (mm)	زاویه لایه‌چینی
10	1.8	$[0, 45, 90, -45, 45]_{sym}$

در این پژوهش از معیار شکست تسای-وو⁶ برای مواد کامپوزیت استفاده شده است زیرا در این معیار بین مقاومت فشاری و کششی تمایز قائل می‌شود. این ویژگی تسای-وو باعث شده است تا یکی از متداول‌ترین معیارهای شکست در مواد کامپوزیت باشد. معیار تسای-وو در سه بعد، دارای شش مؤلفه تنش است.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (3)$$

در این رابطه F_i و F_{ij} تانسورهای مقاومت با درجات مختلف بوده و همچنین $\sigma_4 = \tau_{23}$ ، $\sigma_5 = \tau_{31}$ و $\sigma_6 = \tau_{12}$ است. رابطه (1) برای حالت تنش صفحه‌ای با تنش غشایی بصورت زیر است:

$$I_F = F_{11} \sigma_{11}^2 + F_{22} \sigma_{22}^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + F_{11} \sigma_{11} + F_{22} \sigma_{22} + 2F_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} \quad (4)$$

4 Normal pressure
5 Shear stress
6 Tsi-Wu

هندسه مدل‌سازی شده در همه محیط‌ها یکسان است. در المان‌بندی سطح زیردریایی، از المان چهارضلعی هشت گره‌ای غیر خطی استفاده شده است که در قسمت میانی بدنه زیردریایی بصورت منظم قرار گرفته شده است. سائز این المان‌ها 0.04 متر در نظر گرفته شده است و تعداد المان‌ها 2530 عدد است. در المان‌بندی رینگ‌های تقویت‌کننده نیز از المان‌های مکعبی هشت نقطه‌ای استفاده شده است. در رینگ‌ها سائز المان‌ها برابر با 0.01 متر است. تعداد المان‌ها برای هر رینگ 930 عدد است. به دلیل حجم زیاد محاسبات و محدودیت‌های سخت‌افزاری از المان مکعبی بجای المان‌های مثلثی استفاده شده است. شکل‌های 5 و 6، المان‌بندی زیردریایی و رینگ‌های تقویت‌کننده را در محیط جامدات نشان می‌دهد.

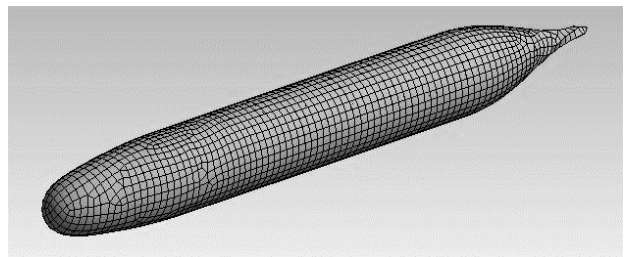


Fig. 5 Submarine mesh

شکل 5 المان‌بندی زیردریایی

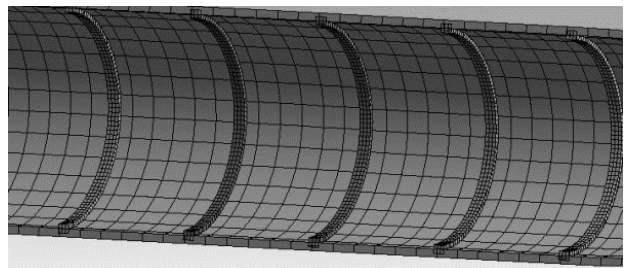


Fig. 6 Reinforcement rings mesh

شکل 6 المان‌بندی رینگ‌های تقویت‌کننده

با اینکه زیردریایی در عمل مانورهای مختلفی را انجام می‌دهد، اما به عنوان یک بررسی متفاوت با تحقیقات قبلی که شرایط فشار هیدروستاتیک را در نظر گرفته بودند و عملاً زیردریایی را در یک عمق مشخص، به صورت ثابت لحاظ نموده بودند، در این تحقیق، یکی از مانورهای حرکتی زیردریایی به صورت حرکت رو به جلو با سرعت ثابت در نظر گرفته می‌شود و از نیروهای ایجاد شده بر اثر ضربه صرف نظر شده است و نتایج با در نظر گرفتن نیروی حاصل از فشار هیدرودینامیکی محاسبه شده است. همانطور که در قسمت نتایج ملاحظه خواهد شد، در نظر گرفتن همین مانور ساده در بحث بهینه‌سازی بدنه زیردریایی، علیرغم تغییرات جزئی در هندسه آن، تأثیر قابل توجهی در عملکرد جامداتی-سیالاتی آن خواهد داشت. بنابراین دو نقطه از زیردریایی انتخاب شده است که یک نقطه در قسمت ابتدایی و نقطه دیگر در انتهای زیردریایی قرار دارد. حرکت نقطه ابتدای زیردریایی در همه جهات گرفته شده و از قید تکیه‌گاه ثابت¹ استفاده شده است. حرکت نقطه‌ای انتهایی زیردریایی نیز با استفاده از قید جابجایی² در جهات Y و Z گرفته شده است. با توجه به این شرایط مرزی و حرکت رو به جلو، زیردریایی تحت فشار هیدرودینامیک قرار دارد.

1 Fixed Support
2 Displacement
3 Imported pressure

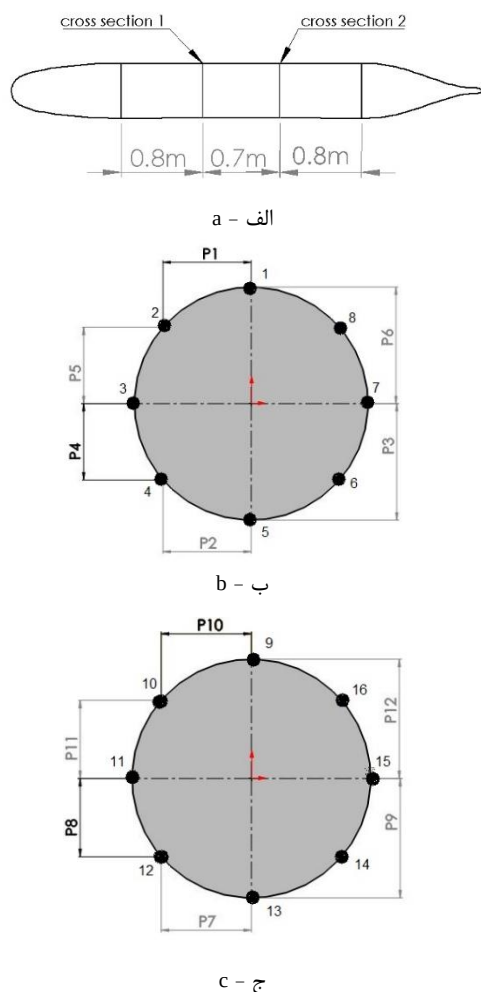


Fig. 8 (a) Location of cross sections (b) Design variables in cross section 1 (c) Design variables in cross section 2

شکل 8 الف) محل قرارگیری مقاطع عرضی، ب) متغیرهای طراحی در مقطع

عرضی 1، ج) متغیرهای طراحی در مقطع عرضی 2

همچنین قیود اعمالی در این مسأله بهینه‌سازی عبارت‌اند از: ضریب بار کمانش و ضریب اطمینان عدد معیار آسیب. ضریب بار کمانش از حل کمانش بدنه زیردریایی تحت بار هیدرودینامیکی بدست می‌آید. ضریب اطمینان عدد معیار آسیب نیز با استفاده از معیار تسای-وو که برای قسمت کامپوزیتی زیردریایی محاسبه می‌شود، بدست می‌آید.

4- اعتبارسنجی حل

4-1- اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی

برای اعتبار سنجی مقاله حاضر، از نتایج مطرح شده در پژوهشی که کیم⁴ و همکاران [22] ارائه داده‌اند استفاده شده است. در این مقاله ضریب فشار زیردریایی بصورت تجربی در یک تونل باد اندازه‌گیری شده است و همچنین با استفاده از حل دینامیک سیالات این نتایج اعتبار سنجی شده است. زیردریایی بررسی شده در این تونل باد، کاملاً از نظر هندسی مشابه زیردریایی در مقاله حاضر است. در شکل 9 نتایج حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی قابل مشاهده است.

که پارامترهای مقاومت به شکل زیر هستند:

$$\begin{aligned} F_{11} &= \frac{1}{X_t X_c} & F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c} & F_1 &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \\ F_2 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} & F_{12} &= -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} & F_{66} &= \frac{1}{S^2} \end{aligned} \quad (5)$$

شکست زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار IF به 1 برسد و از آن تجاوز کند.

3-5- بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ¹ استفاده شده است. این روش شامل یک طراحی آزمایش² است که به وسیله یک روش، نقاط طراحی انتخاب می‌شود که در این پژوهش از روش طراحی مرکب مرکزی³ استفاده شده است. سپس جواب مسأله در این نقاط محاسبه می‌شود و از جواب‌ها یک رویه گذرانده می‌شود. این رویه حاصل از جواب‌ها، سطح پاسخ⁴ نامیده می‌شود. پس از ایجاد این سطح، به وسیله روش‌های بهینه‌سازی مانند روش ژنتیک⁵، نقاط بهینه‌ی این سطح پیدا شده و جواب بهینه مسأله محاسبه می‌شود. سپس پاسخ واقعی نقاط حاصل از بهینه‌سازی محاسبه می‌گردد.

در مقاله حاضر، دو مرتبه بهینه‌سازی انجام شده است. در بهینه‌سازی اولیه، فقط ضخامت لایه‌ها به عنوان متغیر طراحی انتخاب شده تا بتوان به چندلایه کامپوزیتی مطلوب رسید. در بهینه‌سازی کلی، هندسه‌ی زیردریایی، بهینه‌سازی می‌شود. در هر مقطع 8 نقطه فرض شده است. هر یک از دونقطه‌ی زیر با یکدیگر قرینه هستند:

(1,5),(2,8),(3,7),(4,6),(9,13),(10,16),(11,15),(12,14)

با توجه به قرینه بودن نقاط ذکر شده و اینکه نقاط (1,5,9,13) دارای عرض صفر و نقاط (3,7,11,15) دارای طول صفر است، از 16 متغیر طول و عرض نقاط فرض شده، تعداد این متغیرها در هر مقطع عرضی 6 عدد می‌شود و با توجه به اینکه 2 مقطع عرضی در نظر گرفته شده است، در مجموع 12 متغیر وجود دارد. در شکل 8 محل قرارگیری مقاطع و متغیرهای طراحی در مقطع عرضی زیردریایی نشان داده شده است.

این متغیرها نقطه‌ای هستند که به وسیله یک اسپلاین به هم متصل شده‌اند و در دو مقطع از بدنه زیردریایی به فاصله 0.7 متر از هم وجود دارند. این مقاطع عرضی نیز به وسیله یک اسپلاین به هم متصل شده‌اند که در صورت تغییر هندسه این مقاطع عرضی، مقطع طولی نیز تغییر هندسه خواهد داشت. پس هم مقطع عرضی و هم مقطع طولی بهینه‌سازی می‌شوند. این نقاط در هر دو مقطع عرضی در نظر گرفته شده یکسان هستند. این متغیرها در توزیع فشار روی بدنه و در نتیجه در بار کمانش و ضریب اطمینان استحکامی تأثیر گذارند و لذا به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین جهت انجام فرایند بهینه‌سازی، برای هر کدام از متغیرهای طراحی به منظور طراحی آزمایش، حدود پایین و بالا در نظر تعریف شده است که در جدول 8 قابل مشاهده است. همچنین 263 حالت برای طراحی آزمایش با استفاده از روش فول فاکتوریل بدست آمده که با توجه به تعداد زیاد حالت‌ها، از ذکر جزئیات جدول طراحی آزمایش صرف نظر شده است.

جدول 4 خطای محاسبه کمانش

Table 4 Buckling error

خطا (%)	ضریب بار کمانش تجربی	ضریب بار کمانش محاسبه شده
3.4	0.6	0.62

3-4- استقلال حل از شبکه

برای اینکه تحلیل از دقت خوبی برخوردار باشد، باید اندازه المان‌ها به حدی باشد که در صورت کوچک‌تر کردن آن‌ها، دقت حل بیشتر نشود. به همین منظور در نمودار زیر ضریب پسا با توجه به اندازه المان‌ها رسم شده است. با توجه به نمودار مشخص شده است که در صورتی که اندازه المان‌ها کمتر از 0.04 متر شود، ضریب پسا ثابت خواهد ماند.

5- نتایج

1-5- نتایج حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی

فشار محاسبه شده روی زیردریایی بصورت کانتور در شکل زیر ارائه شده است. این فشار همان فشاری است که برای تحلیل کمانش استفاده می‌شود. در قسمت میانی زیردریایی فشار کمتر از 20 مگاپاسکال است، زیرا در این قسمت -ها به دلیل ایجاد جدایش جریان، گردان فشار منفی وجود دارد. فشار هیدرودینامیکی با توجه به اینکه زیردریایی مورد مطالعه، تحقیقاتی بوده و ابعاد و همچنین سرعت کمی دارد، کم است ولی اگر شناور مورد مطالعه دارای سرعت زیادی باشد، این فشار هم به تناسب بیشتر خواهد شد. در شکل 12 بردار سرعت حول زیردریایی آورده شده است.

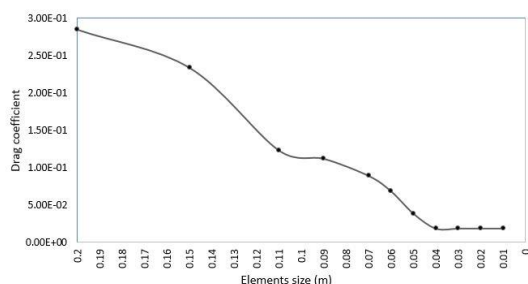


Fig. 10 Drag coefficient diagram by element size

شکل 10 نمودار ضریب پسا بر حسب اندازه المان

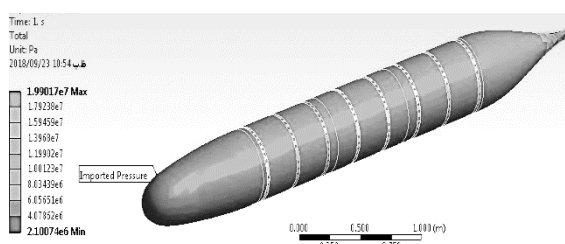


Fig. 11 Calculated pressure on submarine

شکل 11 فشار محاسبه شده بر روی زیردریایی

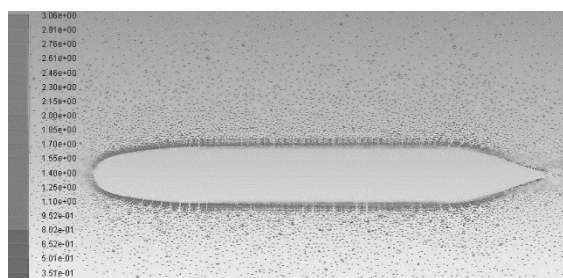
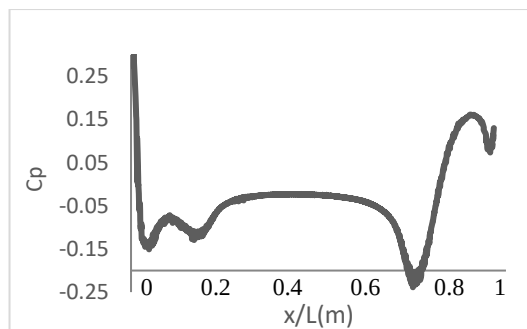
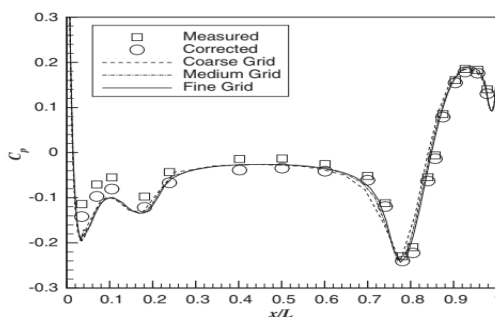


Fig. 12 Velocity vector around submarine (m/s)

شکل 12 بردار سرعت حول زیردریایی (m/s)



الف - ا



ب - ب

Fig. 9 (a) CP diagram resulting from submarine CFD solving that studied in this research (b) CP chart from experimental results [20]

شکل 9 (الف) نمودار C_p حاصل از حل جریان روی زیردریایی مورد مطالعه در این پژوهش (ب) نمودار C_p حاصل از نتایج آزمایشگاهی [22]

در شکل 9 (الف) مشاهده می‌شود که مقادیر محاسبه شده با مقادیر موجود در شکل 9 (ب) همپوشانی مطلوبی دارد. در جدول 3 خطای C_p در سه نقطه محاسبه شده است.

جدول 3 خطای محاسبه C_p

Table 3 CP Calculation Error

مکان (m)	مقدار محاسبه دینامیک سیالات محاسباتی	مقدار محاسبه تجربی	خطا (%)
X=0.78	-0.119	-0.115	3.4
X=2.178	-0.023	-0.021	8.6
X=4	0.154	0.160	12.5

با توجه به مقدار خطاهای موجود در جدول 3، روش محاسبه و همچنین اندازه المان‌ها در محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی مناسب بوده است.

2-4- اعتبارسنجی حل کمانش

با توجه به نتایج موجود در مرجع [25] که کمانش یک پوسته استوانه‌ای را که تحت فشار هیدرواستاتیکی است مورد بررسی قرار داده است، با استفاده از نرم‌افزار مقدار ویژه کمانش، کمانش این پوسته تحلیل شده است. این پوسته دارای 24 لایه است که در مجموع ضخامت پوسته 2.52 میلی‌متر می‌شود. با توجه به روش حل اتخاذ شده، تحلیل کمانش این پوسته انجام شده و نتایج با داده‌های تجربی موجود در مرجع [25] مقایسه شده است. طبق محاسبه انجام شده برای کمانش این پوسته، ضریب بار کمانش بدست آمده 0.621 است. در جدول 4، خطای محاسبه نسبت به مقدار تجربی آمده است. با توجه به این مقدار روش تحلیل در این پژوهش صحیح است و نتایج حاصله از اعتبار برخوردارند.

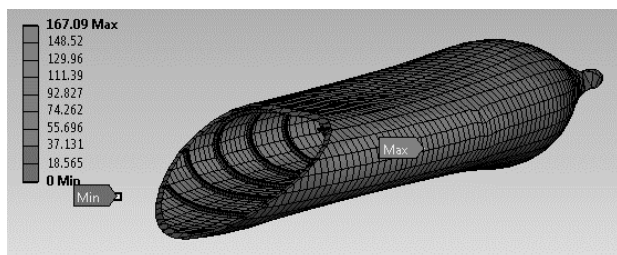


Fig. 13 First Mode of buckling with steel pressure hull

شکل 13 مود اول کمانش با بدنه فشار فولادی

2-2-5- نتایج کمانش زیردریایی کامپوزیتی قبل از بهینه شدن ضخامت بدنه فشار این زیردریایی و رینگ‌های تقویت‌کننده از جنس کربن/اپوکسی هستند و ضخامت هرلایه 1.8 میلی‌متر است. لایه‌چینی نیز بصورت $[0,45,90,-45,45]_{sym}$ است. ضریب اطمینان به دست آمده در این تحلیل که با استفاده از معیار تسای-وو محاسبه شده برابر 0.9 است. ضریب بار کمانش خطی محاسبه شده برای مود اول 0.52 است. با توجه به اینکه ضریب اطمینان کوچک‌تر از 1 است، زیردریایی قبل از کمانش تسلیم می‌شود. با توجه به این نتایج، باید ضخامت مورد بهینه‌سازی قرار گیرد که در قسمت‌های بعدی نتایج ارائه خواهد شد. در جدول 6 خواص مکانیکی کربن/اپوکسی ارائه شده است.

جدول 6 خواص مکانیکی کربن/اپوکسی [24]

Table 6 Mechanical properties of carbon/epoxy [24]

خاصیت	نماد	مقدار	واحد
ضخامت	t	0.105	mm
مدول الاستیک	E11	162	GPa
	E22	9.6	GPa
	E33	9.6	GPa
ضریب پواسون	ν_{12}	0.298	-
	ν_{13}	0.298	-
	ν_{23}	0.47	-
مدول برشی	G12	6.1	GPa
	G13	6.1	GPa
	G23	3.5	GPa

2-3-5- نتایج کمانش زیردریایی کامپوزیتی پس از بهینه شدن ضخامت پس از اینکه ضخامت بهینه شد، مقدار بهینه ضخامت برابر 2.17 میلی‌متر است. این ضخامت به عنوان ضخامت اصلی برای تحلیل کمانش برای انجام بهینه‌سازی هندسی بدنه زیردریایی قرار داده شد. ضریب اطمینان محاسبه شده با استفاده از معیار تسای-وو برابر با 1.11 است. با توجه به اینکه این عدد بزرگ‌تر از 1 است، شکست اتفاق نمی‌افتد. در شکل 14 ضریب اطمینان لایه 8م قسمت کامپوزیتی قابل مشاهده است.

2-5- نتایج حاصل از حل کمانش

2-5-1- نتایج کمانش زیردریایی قبل از کامپوزیتی شدن بدنه فشار

طبق نتایج بدست آمده از تحلیل، ضریب اطمینان شکست با استفاده از معیار فون مایز نسبت به تنش نهایی برابر با 5 است. این عدد نشان دهنده این است که این زیردریایی با جنس فولاد مقاومت بالایی در مقابل شکست دارد و با توجه به ضریب اطمینان یک و نیم برابری که در هنگام بارگذاری اعمال شده است، در اعماق بیشتری از سطح دریا قابلیت حرکت دارد. ضریب کمانش محاسبه شده برابر با 1.1425 است. در جدول 5 خواص مکانیکی فولاد قابل مشاهده است.

جدول 5 خواص مکانیکی فولاد

Table 5 Mechanical properties of steel

خاصیت	مقدار	واحد
چگالی	7850	Kg/m^3
مدول الاستیک	200	GPa
ضریب پواسون	0.3	-
مدول برشی	76.9	GPa
استحکام تسلیم	250	MPa
استحکام نهایی	450	MPa

نتایج بدست آمده با در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل‌های بزرگ (large deflection) در تحلیل استاتیکی می‌باشد که به وسیله تحلیل کمانش غیرخطی محاسبه شده است. لذا برای محاسبه فشار بحرانی برای کمانش غیرخطی از فرمول 6 استفاده می‌شود:

$$P_{cr} = P_{static} + \lambda P_{buckling} \quad (6)$$

در رابطه بالا، P_{static} فشار اعمال شده در بخش Static Structural نرم-افزار و $P_{buckling}$ فشار اعمال شده در بخش Eigenvalue Buckling نرم‌افزار است. به دلیل اینکه هر دو فشار یکسان است و عملاً با هم فرقی نمی‌کنند، پس رابطه بالا به شکل زیر قابل تغییر است:

$$P_{cr} = (1 + \lambda)P \quad (7)$$

در نتیجه برای ضریب بار کمانش محاسبه شده داریم :

$$P_{cr} = (1 + 1.1425)P = 2.1425P \quad (8)$$

در این تحلیل چون فشار اعمال شده در سرتاسر زیردریایی یکسان نیست، فشار بحرانی کمانش نیز عدد یکسانی نخواهد بود. به عنوان مثال در نقطه‌ای که فشار اعمالی بیشینه است، فشار بحرانی کمانش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{MAX} = 19.85 \text{ MPa}, \quad (9)$$

$$P_{cr} = 2.1425 \times 19.85 = 42.53 \text{ MPa} \quad (10)$$

که این عدد 17٪ استحکام تسلیم فولاد است. در شکل 12 برشی از بدنه زیردریایی که نشان دهنده مود اول کمانش است قابل مشاهده است.

جدول 7 مسأله بهینه‌سازی ضخامت هرلایه از کامپوزیت

Table 7 Optimizing the thickness of each layer of the composite

هدف بهینه‌سازی	پارامتر طراحی	قیود بهینه‌سازی
کمین ¹ کردن وزن	ضخامت هرلایه از کامپوزیت	1 > ضریب اطمینان 0 > ضریب بار کماتش

با توجه به اینکه متغیر طراحی در این مسأله یک پارامتر است، در مجموع 5 حالت در طراحی آزمایش انتخاب شده است. بازه‌ی تغییرات ضخامت بین 1.75 تا 3 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای هرکدام از این 5 حالت، ضریب بار کماتش و ضریب اطمینان محاسبه شده و با استفاده از این جواب‌ها یک سطح پاسخ تشکیل می‌شود. در نهایت با توجه به نقاط بدست آمده و شرایط مسأله بهینه‌سازی، بهینه‌سازی به روش ژنتیک انجام شده و نقاط داوطلب² از بین نقاط موجود در سطح پاسخ، محاسبه شده است. با توجه به اینکه هرچه ضخامت افزایش پیدا کند، ضریب بار کماتش و ضریب اطمینان نیز افزایش پیدا خواهد کرد، و با توجه به اینکه وزن به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است و سعی بر کمین کردن وزن است، اولین نقطه‌ای که قیود را ارضا کند به عنوان نقطه‌ی بهینه انتخاب می‌شود. اولین نقطه‌ای که این شرایط را داراست نقطه 2.17 است. سپس کماتش قسمت کامپوزیتی با ضخامت 2.17 میلی‌متر محاسبه شد. نتایج در جدول 8 ارائه شده است.

جدول 8 کماتش قسمت کامپوزیتی با ضخامت 2.17 میلی‌متر

Table 8 Buckling of the composite part with a thickness of 2.17mm

ضخامت	ضریب اطمینان	ضریب بار
2.17 mm	1.11	0.96

5-3-2- نتایج بهینه‌سازی هندسی بدنه زیردریایی

برای بهینه‌سازی هندسی بدنه‌ی زیردریایی، 12 متغیر طراحی هندسی در نظر گرفته شده است. در این مسأله بهینه‌سازی وزن و نیروی پسا به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند که هرکدام از آن‌ها باید به مقدار کمین خود برسند. در اولین اقدام طراحی آزمایش به وسیله روش ذکر شده در بخش قبل انجام شد. به دلیل وجود متغیرهای متعدد طراحی، 283 حالت برای طراحی آزمایش ایجاد شد و پس از حل، وزن، ضریب اطمینان، ضریب بار کماتش و نیروی پسا برای هر حالت محاسبه شد. از این اعداد محاسبه شده رویه‌ای تحت عنوان سطح پاسخ تشکیل و با استفاده از روش ژنتیک چند هدفه، پاسخ بهینه محاسبه می‌شود. این محاسبات با استفاده از مقادیر پیش فرض پارامترها که در محیط نرم‌افزاری لحاظ شده اجرا گردیده است و برای حل این مسأله، نیازی به تغییر آنها نبود. تغییر هرکدام از پارامترهای هندسی در بدنه زیردریایی، باعث به وجود آمدن تغییرات در ضریب اطمینان و ضریب کماتش می‌شود.

نقاط داوطلب پنج عدد در نظر گرفته شده است. از بین این نقاط، نقطه‌ای که بهترین شرایط را داراست انتخاب شده است. با توجه به اعداد موجود، نقطه‌ی شماره 2 به عنوان نقطه بهینه انتخاب شد. زیرا نسبت به نقاط دیگر، نیروی پسا کمتری را داراست. در جدول 9 مقایسه بین هندسه بهینه و هندسه اولیه زیردریایی قابل مشاهده است.

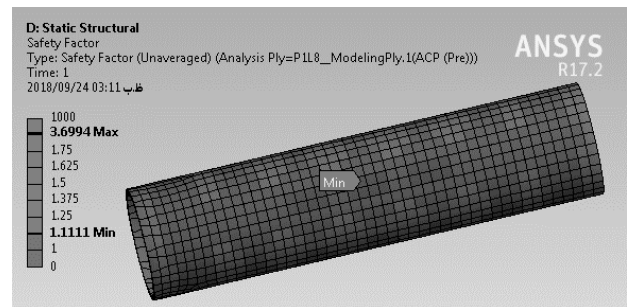


Fig. 14 Safety factor of the 8th layer of the composite part of the submarine

شکل 14 ضریب اطمینان لایه 8ام قسمت کامپوزیتی بدنه زیردریایی

در شکل 14 مشاهده می‌شود که با توجه به کانتور، اکثر نقاط دارای ضریب اطمینانی بالاتر از 1.11 و در حدود 1.375 و بالاتر قرار دارد. نقطه‌ای که دارای ضریب اطمینان 1.11 است در لایه 8ام قرار دارد که کانتور ضریب اطمینان این لایه در شکل قابل مشاهده است.

ضریب بار کماتش خطی مود اول برابر 0.9496 است. با توجه به اینکه ضریب بار بحرانی برابر است با $\lambda + 1$ ، کماتش اتفاق نمی‌افتد. با توجه به ضریب بار کماتش در مود اول، بار بحرانی کماتش بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{cr} = (1 + 0.9496)P = 1.9496P \quad (11)$$

مشابه قبل، در این تحلیل نیز چون فشار اعمال شده در سرتاسر زیردریایی یکسان نیست، فشار بحرانی کماتش نیز عدد یکسانی نخواهد بود. به عنوان مثال در نقطه‌ای که فشار اعمالی بیشینه است، فشار بحرانی کماتش به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{MAX} = 19.85 \text{ MPa}, \quad (12)$$

$$P_{cr} = 1.9496 \times 19.85 = 38.70 \text{ MPa} \quad (13)$$

با توجه به مقادیر بدست آمده زیردریایی دچار کماتش نخواهد شد. در شکل 15 مود اول کماتش نشان داده شده است.

5-3-3- نتایج بهینه‌سازی

5-3-1- نتایج بهینه‌سازی ضخامت لایه کامپوزیتی

پس از حل دینامیک سیالات محاسباتی و انتقال میدان فشار به قسمت جامدات نوبت حل مسأله بهینه‌سازی فرا می‌رسد. در جدول 7 خلاصه مسأله بهینه‌سازی قابل مشاهده است.

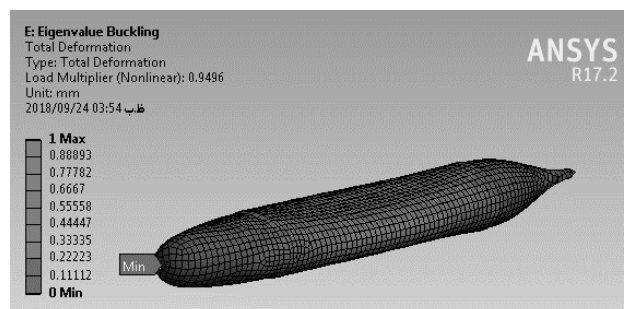


Fig. 15 First mode of submarine buckling with optimized composite pressure hull

شکل 15 مود اول کماتش زیردریایی با بدنه فشار بهینه شده کامپوزیتی

در شکل 16 (ب-ب) مشخص است که قسمت میانی زیردریایی، باریک‌تر شده است و مقطع زیردریایی به شکلی شبیه به بیضی تبدیل شده است. در شکل 17 نیز مقاطع عرضی بهینه‌سازی شده قابل مشاهده است.

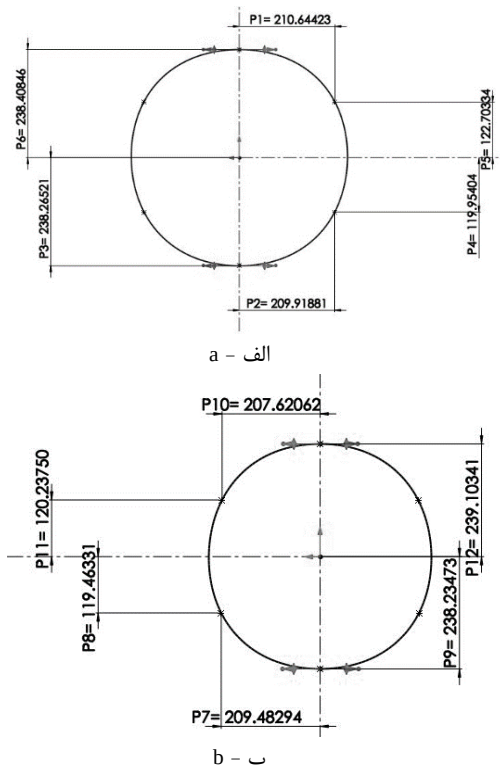


Fig. 17 (a) Cross section 1 (b) Cross section 2 (dimensions in mm)

شکل 17 الف) مقطع عرضی 1، ب) مقطع عرضی 2 (اندازه‌ها به میلی‌متر هستند)

همانطور که در شکل 17 قابل مشاهده است، مقاطع عرضی دایروی پس از بهینه‌سازی تقریباً شبیه به بیضی شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، بهینه‌سازی هندسی بدنه زیردریایی هم در مقطع عرضی و هم در مقطع طولی انجام شده است.

6- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر سعی بر این بوده است تا هندسه بدنه یک زیردریایی تحت فشار هیدروستاتیکی و با نگاه به استحکام سازه، بهینه‌سازی شود.

با توجه به نتایج بدست آمده، با بهینه‌سازی هندسه، بدنه‌ی زیردریایی دچار تغییراتی شد که باعث شد وزن آن 5.35٪ و نیروی پسا وارده بر آن 10.1٪ کاهش پیدا کند و نمایه هندسه نمایه هندسه زیردریایی هم در مقطع طولی و هم در مقطع عرضی بهینه‌سازی شود. این کاهش وزن و نیروی پسا برای زیردریایی گامی ابتدایی و مؤثر در راستای افزایش مانورپذیری و کارایی بیشتر آن به حساب می‌آید. در این پژوهش یک مانور حرکتی ساده زیردریایی در نظر گرفته شد و توصیه می‌شود دیگر مانورهای زیردریایی در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بدست آمده در این مقاله همچنین این موضوع را روشن کرد که در طراحی و ساخت زیردریایی می‌توان بجای مقاطع دایروی از اشکال هندسی دیگر مانند بیضی و یا شکل‌های هذلولوی بهره گرفت. در این مقاله با انجام بهینه‌سازی، امکان استفاده از مواد کامپوزیتی برای قسمتی از بدنه فراهم شد که نقش بسزایی در کاهش وزن بیشتر زیردریایی ایفا کرد.

جدول 9 مقایسه هندسه بهینه و اولیه

Table 9 Comparison of optimal and basic geometry

تغییر %	هندسه بهینه	هندسه اولیه	
5.35	132.5	140	وزن (Kg)
10.1	326	359	نیروی پسا (N)
1	1.09	1.11	ضریب اطمینان
30	0.6624	0.9496	ضریب بار کمانش

با توجه به جدول 9 کاهش ضریب بار کمانش و ضریب اطمینان دارای توجیه است. زیرا با کاهش وزن و تغییر هندسه به حد بهینه خود سازه ضعیف‌تر شده و وضعیت بهینه و مقادیر مرزی نزدیک شده است. همچنین تغییرات وزن و نیروی پسا مطلوب بوده و با کاهش مناسبی همراه بوده است. نیروی پسا محاسبه شده جمع نیروی پسا بر اثر ویسکوزیته و فشار می‌باشد که مقدار آن به ترتیب برابر است با 149 و 177 نیوتون. مشخصات هندسی نقطه بهینه در جدول 10 به شرح زیر است:

جدول 10 مشخصات هندسی نقاط اولیه و بهینه

Table 10 Geometrical specifications of primary and optimal points

پارامتر	اندازه بهینه (mm)	اندازه اولیه (mm)	حد بالا (mm)	حد پایین (mm)
P12	239.1	254	264	244
P11	120.2	127	137	117
P10	207.6	219.8	230	210
P9	238.2	254	264	244
P8	119.5	127	137	117
P7	209.5	219.8	230	210
P6	238.5	254	264	244
P5	122.7	127	117	137
P4	119.9	127	117	137
P3	238.2	254	264	244
P2	209.9	219.8	230	210
P1	210.6	219.8	230	210

همانطور که در جدول 10 ملاحظه می‌شود، اندازه پارامترهای طراحی نسبت به مقادیر ابتدایی تغییر اندکی داشته‌اند اما همین تغییر اندک باعث بهبود ضریب کمانش و نیروی پسا و همچنین کاهش وزن شده است. در شکل 16 هندسه‌ی زیردریایی قبل و بعد از بهینه شدن قابل مشاهده است.

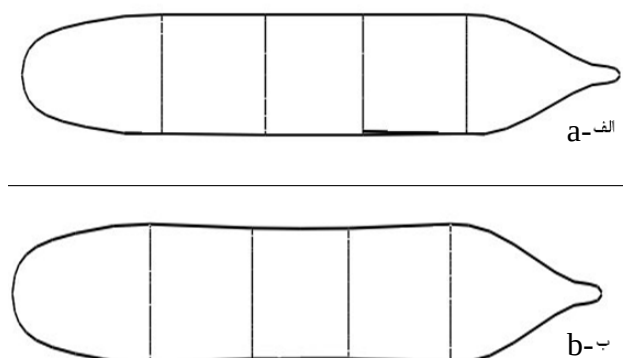


Fig. 16 (a) Primary Geometry (b) Optimized Geometry

شکل 16 الف) هندسه اولیه، ب) هندسه بهینه

7- مراجع

- Industry, Tehran, Faculty of Civil Engineering, Tarbiat Dabir Shahid Rajaei University., 2015.
- [17] Mirzaee, D., Badri, M., “Dynamic optimization of the submarine hull and its accessories using genetic algorithm,” In Persian, 15th Marine Industry Conference, 2015.
- [18] Akbari, K., Bardideh, H., “Numerical hydrodynamic analysis of military float with double parallel propeller and heel shape effect,” In Persian, Engineering of high-speed vessels, Vol. 20, No. 58, pp. 3-9, 2021.
- [19] Hemmati, M., Kazemi, S., “Optimizing the geometric form of a semi-floating platform by numerical method,” In Persian, 19th Marine Industry Conference, 2017.
- [20] Groves, N.C., Huang, T.T. and Chang, M.S., “Geometric characteristics of DARPA suboff models,” Dtrc/Shd-1298-01, pp. 82, 1989.
- [21] Gao, T., Wang, Y., Pang, Y. and Cao, J., “Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD,” Engineering applications of computational fluid mechanics, Vol. 10, No. 1, pp. 599–607, 2016.
- [22] Kim, J., Park, I. and Van, S., “RANS computations of hydrodynamic forces and moments acting on a submarine,” the 6th international conference on hydrodynamics, pp. 83-88, 2004.
- [23] Vasudev, K.L., Sharma, R. and Bhattacharyya, S.K., “Shape optimisation of an AUV with ducted propeller using GA integrated with CFD,” Ships and Offshore Structures, Vol. 13, No. 2, pp. 194–207, 2018.
- [24] Hur, S.H., Son, H.J., Kweon, J.H. and Choi, J.H., “Post buckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure,” Composite Structures, Vol. 86, No. 1–3, pp. 114–124, 2008.
- [25] “History of submarines,” In Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_submarines&oldid=1085644730, available in January 18, 2019.
- [1] Aras, M. and Basar, F., “Analysis Movement of Unmanned Underwater Vehicle using the Inertial Measurement Unit,” International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE), Vol. 1, No. 10, pp. 47-53, 2013.
- [2] Herman, H. E., “Electrostatic sensing for underwater object detection and localization,” PhD thesis, UCLA, USA, 2013.
- [3] Taylor, L., Pankajakshan, R., Jiang, M., Sheng, C., Briley, W., Whitfield, D., Davoudzadeh, F., Boger, D., Gibeling, H. and Gorski, J., “Large-scale simulations for maneuvering submarines and propulsors,” In 29th AIAA, Plasmadynamics and Lasers Conference, pp. 2930, 1998.
- [4] Blachut, J. and Smith, P., “Buckling of multi-segment underwater pressure hull,” Ocean Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 247–260, 2008.
- [5] de Almeida, F.S., “Optimization of laminated composite structures using harmony search algorithm,” Composite Structures, Vol. 221, pp. 110852, 2019.
- [6] Tianfeng, Z. and Xianhong, F., “Upheaval buckling solution for submarine pipelines by segmented ditching and hot water flushing,” Ocean Engineering, Vol. 102, pp. 129-135, 2015.
- [7] Valentinis, F. and Woolsey, C., “Nonlinear control of a subscale submarine in emergency ascent,” Ocean Engineering, Vol. 171, pp. 646-662, 2019.
- [8] Xu, Z., Hu, Z., Zhao, L., Zhang, Y., Yang, Z., Hu, S. and Li, Y., “Application of temperature field modeling in monitoring of optic-electric composite submarine cable with insulation degradation,” Measurement, Vol. 133, pp. 479-494, 2019.
- [9] Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P. and Challis, K., “Review of advanced composite structures for naval ships and submarines,” Composite Structures, Vol. 53, No. 1, pp.21-42, 2001.
- [10] Vasudev, K.L., Sharma, R. and Bhattacharyya, S.K., “Shape optimisation of an AUV with ducted propeller using GA integrated with CFD,” Ships Offshore Struct, Vol. 13, No. 2, pp. 194–207, 2018.
- [11] Li, B., Pang, Y.J., Cheng, Y.X. and Zhu, X.M., “Collaborative optimization for ring-stiffened composite pressure hull of underwater vehicle based on lamination parameters,” International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 373–381, 2017.
- [12] Paz, J.D.M. and Muñoz, O.D.T., “Multiobjective Optimization of a Submarine Hull Design,” Ship Science & Technology, Vol. 7, No. 14, pp. 27-42, 2017.
- [13] de Almeida, T.L. and Tonacio, V.C., “Passenger Submarine Concept Design for Oil Production Offshore Systems,” Ship Science and Technology, Vol. 4, No. 8, pp. 9-23, 2011.
- [14] Craven, R., Graham, D. and Dalzel-Job, J., “Conceptual design of a composite pressure hull,” Ocean Engineering, Vol. 128, pp. 153–162, 2016.
- [15] Matbo, F. and Zare, H., “Numerical and experimental study of hydrodynamic forces on a submarine,” In Persian, The First International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, Tehran, Baqer al-Uloom Research Organization (AS), 2015.
- [16] Sanatizadeh, M., Rasoulan, E., “Buckling analysis of cylindrical composite shells with elliptical cross section under the effect of partial loads by finite strip method,” In Persian, The First National Conference on the Application of Composites in the Construction



ارزیابی عمر خستگی صفحه‌ی ساندویچی کامپوزیتی به روش مکانیک آسیب پیوسته همراه با المان بین لایه‌ای

بیژن محمدی^{1*}، محمد حجت وطن‌خواه²

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

2- دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، bijan_mohammadi@iust.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
با توجه به گسترش استفاده از مواد مرکب در صنایع مختلف، همواره افزایش دقت در تحلیل خستگی سازه‌های مرکب موردتوجه است. با توجه به ساختار سازه‌های ساندویچی، حالت‌های خرابی مختلفی هنگام بارگذاری متناوب در این سازه‌ها به وجود می‌آید. هرچه تأثیر این حالت‌ها بر یکدیگر هنگام ارزیابی عمر خستگی دقیق‌تر در نظر گرفته شود، دقت پیش‌بینی‌ها افزایش می‌یابد. در این پژوهش به کمک ترکیب دو زیر برنامه‌ی USDFLD و UMAT در نرم‌افزار آباکوس ابزار جدیدی ارائه شده است تا اثر متقابل خستگی پوسته‌های سازه‌ی ساندویچی و همچنین جدایش بین پوسته و هسته بر یکدیگر با استفاده از مدل‌های موجود دیده شود. این ابزار پس از اعتبار سنجی برای ارزیابی خستگی یک صفحه‌ی ساندویچی با هسته‌ی PVC با سفتی‌های متفاوت 50 MPa، 3 GPa و 1 GPa و پوسته‌ی AS4/3501-6 با لایه‌چینی [0] ₄ و [90] ₄ استفاده شده است. در این تحلیل جدایش بین پوسته و هسته به کمک مدل ناحیه‌ی چسبیده و خستگی پوسته توسط مدلی بر پایه‌ی انرژی به‌صورت هم‌زمان استفاده شده است و اثرات حالت‌های خرابی بر یکدیگر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش سفتی هسته شروع جدایش ناحیه-ی اتصال هسته و پوسته دیرتر رخ می‌دهد و جدایش بین پوسته و هسته به سمت لبه‌های آزاد صفحه می‌رود. همچنین مشاهده شد که خرابی کنترل‌کننده‌ی عمر این سازه حالت جدایش بین پوسته و هسته است. نتایج بیانگر کاهش نرخ رشد پارامتر خرابی در ناحیه‌ی چسبیده در یک نقطه‌ی مشخص، افزایش نرخ رشد سطح ترک بین پوسته و هسته و افزایش نرخ رشد پارامتر خرابی در پوسته در طول بارگذاری هستند.	دریافت: 1401/07/21 پذیرش: 1401/09/08 کلیدواژگان المان چسبیده مکانیک خرابی محیط پیوسته حل اجزای محدود تحلیل خستگی سازه‌ی ساندویچی

Fatigue analysis of composite sandwich panel by continuum damage mechanics method with interlayer element

Bijan Mohammadi^{1*}, Mohammad Hojat Vatankhah¹

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

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, bijan_mohammadi@iust.ac.ir

Keywords

Cohesive zone
Continuum damage mechanic
Finite element
Sandwich panel
Fatigue analysis

Abstract

According to the structure of sandwich panels, different failure modes occur during periodic loading in these structures. When the effect of these modes on each other is considered, the predictions will be more accurate. In this research, a new tool presented with the help of the combination of USDFLD and UMAT subroutine in the Abaqus software to see the mutual fatigue effect of the face and the delamination between the face and the core using the existing models. This tool is used for fatigue analysis of a sandwich beam with a PVC core with different stiffness and AS4/3501-6 composite faces with [0]₄, [90]₄ layup. The delamination between the face and the core is analyzed by cohesive zone model and the face fatigue by an energy-based model simultaneously. The results showed that with the increase of the core stiffness, the delamination between the face and the core, caused by fatigue, begins later and moves towards the free edges of the plate. It was also observed that the failure mode that controls the life of this structure is the delamination between the face and the core. The results show the decrease in the growth rate of the damage parameter in the cohesive zone for specified element, increase of the crack growth rate and growth rate of the damage parameter in the face during loading.

1-مقدمه

پل و پوسته‌های بدنه اتومبیل مورد استفاده قرار می‌گیرند که حداقل وزن سازه و حداکثر سفتی و مقاومت از ویژگی‌های مهم آن‌ها است. در چنین کاربردهایی، سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی غالباً تحت بارگذاری مکرر که

سازه‌های ساندویچی این روزها در کاربردهای گسترده‌ای از قبیل سازه‌های هوایی، کشتی‌های دریایی، سازه‌های حمل‌ونقل، مخازن، یخچال‌ها، عرشه‌های

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mohammadi, B., Vatankhah, M. H., "Fatigue analysis of composite sandwich panel by continuum damage mechanics method with interlayer element," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1952-1960, 2023.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.563374.1802

همکاران [13] آزمون‌هایی برای بررسی تأثیر ترک در ناحیه‌ی اتصال پوسته و هسته روی عمر خستگی تیرهای ساندویچی انجام داده‌اند. یانگ و همکاران [14] به بررسی رفتار استاتیکی و خستگی تیرهای ساندویچی با پوسته کامپوزیتی تقویت‌شده توسط الیاف شیشه و هسته چوبی تقویت‌شده پرداخته‌اند.

این پژوهش برای دوری از هزینه‌های مالی و زمانی و عدم جامع بودن آزمون‌های تجربی ابزاری جامع در قالب روش اجزای محدود ارائه کرده است که بتوان از مدل‌های خستگی موجود برای نمونه‌های کامپوزیتی استفاده کرد به صورتی که مدهای مختلف خرابی در سازه‌ی ساندویچی و تأثیر آن‌ها بر یکدیگر را در نظر بگیرد و با هزینه‌ای کمتر تأثیر تغییر خواص سازه بر روی عمر خستگی آن را بررسی کند و همچنین انعطاف‌پذیری لازم برای اعمال مدل‌های مختلف را داشته باشد. در این روش از مدل تحلیل خستگی بر پایه‌ی انرژی که توسط محمدی و همکاران [15] ارائه شده است برای تحلیل خستگی پوسته‌ی کامپوزیتی سازه‌ی ساندویچی و از مدل ناحیه‌ی چسبنده تورن و همکاران [16] برای تحلیل جدایش بین پوسته و هسته‌ی سازه‌ی ساندویچی تحت بارگذاری متناوب استفاده شده است. این ابزار هم‌زمان از دو زیر برنامه‌ی $USDFLD^3$ و $UMAT^4$ در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌کند. زیر برنامه‌ی $USDFLD$ برای اعمال اثرات خستگی بر مدل ناحیه‌ی چسبنده و زیر برنامه‌ی $UMAT$ برای پیاده‌سازی مدل تحلیل خستگی پوسته‌ی کامپوزیتی استفاده شده است. این الگوریتم⁵ جدید هرچند مزایای بیان شده را دارد اما از یکی از اصلی‌ترین معایب حل اجزای محدود یعنی نیاز به کامپیوترهای قوی برای حل سازه‌های سه‌بعدی و پیچیده در امان نیست و برای پیاده‌سازی آن در تخمین عمر خستگی سازه‌های پیچیده با المان‌های سه‌بعدی نیاز به فراهم کردن دستگاه‌های قوی است. همچنین این الگوریتم همچنان از ثوابتی برای تخمین عمر خستگی پوسته و اتصال پوسته و هسته استفاده می‌کند که نیاز به داده‌های تجربی دارد.

2- مدل‌های تحلیل خستگی پوسته و ناحیه‌ی چسبنده

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، از دو مدل تحلیل خستگی مجزا برای ایجاد ابزار جدیدی برای تحلیل خستگی سازه‌ی ساندویچی کامپوزیتی استفاده شده است. روابط هرکدام از این دو مدل در ادامه توضیح داده شده است.

2-1- مدل تحلیل خستگی پوسته‌ی کامپوزیتی

محمدی و همکاران [15] برای تفکیک مناسب مدهای خرابی در جهت‌های مختلف یک چندلایه‌ی کامپوزیتی سه متغیر آسیب مجزا در جهت مادی در نظر گرفته‌اند که رابطه‌ی نرخ رشد آسیب هر مود برحسب مجموع ترم‌هایی از انرژی کرنشی که در رشد آسیب آن مود مؤثرند، به‌صورت روابط 1 تا 3 فرض می‌شوند:

$$\frac{dD_1}{dN} = c_1 \left(\frac{\Delta W_1}{W_1^0} \right)^{m_1} \quad (1)$$

$$\frac{dD_2}{dN} = c_2 \left(\frac{\Delta W_2}{W_2^0} \right)^{m_2} \quad (2)$$

$$\frac{dD_3}{dN} = c_2 \left(\frac{\Delta W_3}{W_3^0} \right)^{m_2} \quad (3)$$

ممکن است منجر به شکست در اثر خستگی شوند (مثلاً بارهای مکرر امواج بر روی بدنه کشتی، یا بارهای مکرر ترافیک وسایل نقلیه موتوری بر روی یک عرشه‌ی پل) قرار دارند. محدودکننده‌های عمر در سازه‌ی ساندویچی کامپوزیتی در شرایط بارگذاری چرخه‌ای طولانی‌مدت، یک فرایند پیچیده را تشکیل می‌دهند. برای تغییر خواص مواد، تغییر توزیع تنش و تعیین عمر سازه، چندین سازوکار آسیب ممکن است رشد کرده و در تعامل باشند. هرچه مدل تحلیل خستگی این تعاملات را بیشتر در نظر بگیرد، پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه می‌کند. مدل‌های خستگی موجود دو مشکل دارند. یا می‌توانند پدیده‌ی خستگی در پوسته یا هسته یا اتصال این دو را بررسی کنند که این مدل‌ها تأثیر خستگی در قسمت‌های مختلف سازه بر یکدیگر را نمی‌بینند و دقت مناسبی ندارند. یا مدلی است که ثوابت آن برای هر سازه‌ی ساندویچی نیاز به داده‌های تجربی زیاد و صرف هزینه و زمان بسیاری دارد. لذا روش یا مدلی لازم است که بتواند علاوه بر کاهش هزینه‌ها، اثر خستگی قسمت‌های مختلف بر یکدیگر را ببیند. همچنین انعطاف‌پذیری لازم برای استفاده از مدل‌های مختلف خستگی ارائه شده را داشته باشد.

برمن و همکاران [1] در مورد عملکرد و خستگی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم تحت خمش چهار نقطه‌ای تحقیق کرده‌اند. از مدل تنش-کرنش موضعی برای تخمین عمر تیر ساندویچی با ترک اولیه استفاده کرده‌اند. شیدخت و همکاران [2] به بررسی اثر نوع و هندسه‌ی اتصال در میزان بارپذیری سازه‌ی ساندویچی تحت خمش به کمک داده‌های تجربی پرداختند. شنوی [3] و همکاران در مورد خواص استاتیکی و خستگی سازه‌های ساندویچی با هسته‌ی فوم مطالعه کرده‌اند. مطالعات تجربی نشان داده است که برش در هسته عامل خرابی در تیرهای ساندویچی با هسته‌ی فوم تحت خمش بوده است. میرزاپور و همکاران [4] تأثیر شرایط محیطی هنگام ساخت بر بارپذیری سازه‌های ساندویچی را به کمک آزمایش‌های تجربی بررسی کردند. شیپ شاو [5] و همکاران آزمون‌های خستگی برای تیر ساندویچی با هسته فوم با محوریت نرخ رشد ترک در ناحیه‌ی اتصال هسته و پوسته انجام داده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که نرخ رشد ترک در نمونه تحت تنش با دامنه‌ی ثابت به‌صورت پیوسته افزایش پیدا می‌کند. هارت و همکاران [6] تیر ساندویچی با پوسته آلومینیومی و هسته‌ی فوم را تحت خمش چهار نقطه‌ای چرخه‌ای را بررسی کرده‌اند. عمده‌ی حالت‌های خرابی برای کمناش پوسته و برش هسته بودند. کانی [7] و همکاران به بررسی اثر فرکانس بارگذاری چرخه‌ای به روی خواص خستگی تیر ساندویچی با پوسته‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه و دو هسته‌ی PVC^1 متفاوت پرداخته‌اند. نتایج بدین‌صورت است که عمده خرابی تیرها تحت تمام بارگذاری‌های چرخه‌ای به علت ترک ایجادشده در هسته بوده است. داوود و همکاران [8] آزمون استاتیکی و خستگی به روی تیر ساندویچی با هسته فوم انجام داده‌اند. مشاهده کردند که تیرهای انعطاف‌پذیرتر عمر خستگی بیشتری نسبت به تیرهای غیر منعطف دارند. خباز [9] مطالعه‌ای روی حالت‌های خرابی و منحنی‌های عمر FRP^2 انجام داده است و مدلی نیمه تجربی را برای تخمین عمر خستگی پیشنهاد داده است. سوزوکی و همکاران [10] ارائه‌ای برای بررسی اثر نوع بارگذاری روی پارامترهای خستگی تیرهای ساندویچی با پوسته تقویت‌شده توسط الیاف شیشه داده‌اند. وو و همکاران [11] به مطالعه‌ی رفتار استاتیکی و خستگی سازه‌های ساندویچی با هسته‌ی لانه‌زنبوری با روش‌های تجربی و تئوری پرداخته‌اند. مارتاکوس و همکاران [12] و کامسل و

³ User Subroutine Define Field Variables

⁴ User Material

⁵ Algorithm

¹ Polyvinyl Chloride

² Fiber-Reinforced Plastic

$$\frac{\partial d}{\partial N} = \begin{cases} \frac{[(1-d)\varepsilon_m^f + d\varepsilon_m^0]^2}{\varepsilon_m^f \varepsilon_m^0} \times \frac{C}{L_{cz}} \left(\frac{\Delta G}{G_c}\right)^m & G_{max} \geq G_{th} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

ε_m^f کرنش معادل المان در نقطه‌ی شکست و ε_m^0 کرنش معادل المان در نقطه‌ی شروع نرم شوندگی است. C و m همان ثوابت رابطه‌ی پاریس برای نرخ رشد طول ترک و G_c انرژی شکست المان می‌باشند. ΔG نیز از طریق رابطه‌ی 11 محاسبه می‌شود.

$$\Delta G = \frac{h_0 k \varepsilon_m^0}{2} \left[\varepsilon_m^f - \frac{(\varepsilon_m^f - \varepsilon_m^0)^2}{\varepsilon_m^f - \varepsilon_m^0} \right] \times (1 - R^2) \quad (11)$$

که در آن ε_m کرنش معادل المان در وضعیت موردنظر و h_0 ضخامت المان است. R نیز نسبت بار است. ثوابت‌های C و m برای مودهای مختلط به کمک روابط 12 و 13 که توسط بلانکو و همکاران [17] ارائه شده است محاسبه می‌شوند.

$$\ln c = \ln c_I + \left(\frac{G_S}{G_T}\right) \ln c_m + \left(\frac{G_S}{G_T}\right)^2 \ln \frac{c_{II}}{c_I c_m} \quad (12)$$

$$m = m_I + m_m \left(\frac{G_S}{G_T}\right) + (m_{II} - m_I - m_m) \left(\frac{G_S}{G_T}\right)^2 \quad (13)$$

که c_I و m_I ثابت‌های رابطه‌ی پاریس برای مود I و c_{II} و m_{II} ثابت‌های معادله‌ی پاریس برای مود II هستند. c_m و m_m نیز ثابت‌های مادی هستند که از برازش نتایج تجربی حاصل می‌شوند. این محققین همچنین نرخ‌های انرژی کرنشی کل بحرانی را نیز به صورت تابع درجه‌دو مطابق رابطه‌ی 14 فرض نمودند.

$$G_c = G_{Ic} + G_m \left(\frac{G_S}{G_T}\right) + (G_{IIc} - G_{Ic} - G_m) \left(\frac{G_S}{G_T}\right)^2 \quad (14)$$

که در آن G_m ضریبی است که از آزمایش مود ترکیبی به دست می‌آید. لازم به ذکر است که در حالت مود ترکیبی، نرخ‌های انرژی کرنشی مرتبط باحالت آستانه‌ی رشد ترک خستگی (G_{th})، معمولاً به صورت تابعی از نرخ‌های انرژی کرنشی مربوط به شروع رشد ترک خستگی مودهای خالص، مشابه معادله در نظر گرفته شده برای نرخ‌های انرژی کرنشی بحرانی، در نظر گرفته می‌شود. بنزگاق و کنان [18] رابطه‌ی 15 را پیشنهاد کردند.

$$G_{th} = G_{Ith} + (G_{IIth} - G_{Ith}) \left(\frac{G_S}{G_T}\right)^{\eta_{th}} \quad (15)$$

در رابطه‌ی اخیر، η_{th} ثابتی است که از آزمایش خستگی تحت شرایط مود ترکیبی به دست می‌آید.

طول ناحیه‌ی چسبنده که با L_{cz} در رابطه‌ی 10 مشخص شده است، برای مود I خالص به کمک رابطه‌ی رایس [16] طبق معادله‌ی 16 قابل تخمین است.

$$L_{cz} = \frac{9\pi E_3 G_{max}}{32 \tau_0^2} \quad (16)$$

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

با توجه به اینکه خستگی در پوسته و جدایش بین پوسته و هسته‌ی سازه هم‌زمان تحلیل می‌شود، الگوریتمی مطابق شکل 1 برای تحلیل سازه در نرم-

در این رابطه‌ها اندیس‌های 1 و 2 و 3 به ترتیب مربوط جهات الیاف، عمود بر الیاف در داخل صفحه و عمود بر صفحه چندلایه می‌باشند و ثوابت C_i و m_i ثوابت تجربی می‌باشند.

در روابط 1 تا 3، ΔW تغییرات چگالی انرژی کرنشی W در چرخه بارگذاری خستگی جاری در نقطه انتگرال‌گیری موردنظر است. در نظر گرفتن تغییرات انرژی کرنشی در این روابط به نوعی اثرات نسبت بار را در مدل وارد می‌کند. به علاوه عناصر (W_i^0) به صورت روابط 4 تا 6 تعریف می‌شوند.

$$W_1^0 = (1 - D_1) \frac{X_T^2}{E_X} \quad (4)$$

$$W_2^0 = (1 - D_2) \frac{Y_T^2}{E_Y} \quad (5)$$

$$W_3^0 = (1 - D_3) \frac{Y_T^2}{E_Y} \quad (6)$$

در این روابط X_T و Y_T به ترتیب استحکام کششی اولیه تک لایه در جهت الیاف و عمود بر الیاف و E_X و E_Y به ترتیب سفتی اولیه تک لایه در جهت الیاف و عمود بر آن می‌باشند.

همچنین مقدار ترم‌های انرژی کرنشی تعریف شده در روابط 1 تا 3 برحسب مؤلفه‌های تنش و متغیرهای آسیب در سه جهت 1 و 2 و 3، از روابط 7 تا 9 به دست می‌آید.

$$W_1 = \frac{\sigma_{11}^2}{2E_1(1 - D_1)} - \frac{v_{12}\sigma_{11}\sigma_{22}}{2E_1(1 - D_1)} - \frac{v_{12}\sigma_{11}\sigma_{33}}{2E_1(1 - D_1)} + \frac{\sigma_{13}^2}{2G_{12}\sqrt{(1 - D_1)(1 - D_3)}} + \frac{\sigma_{12}^2}{2G_{12}\sqrt{(1 - D_1)(1 - D_2)}} \quad (7)$$

$$W_2 = \frac{\sigma_{22}^2}{2E_2(1 - D_2)} - \frac{v_{21}\sigma_{11}\sigma_{22}}{2E_2(1 - D_2)} - \frac{v_{23}\sigma_{33}\sigma_{22}}{2E_2(1 - D_2)} + \frac{\sigma_{23}^2}{2G_{23}\sqrt{(1 - D_2)(1 - D_3)}} + \frac{\sigma_{12}^2}{2G_{12}\sqrt{(1 - D_1)(1 - D_2)}} \quad (8)$$

$$W_3 = \frac{\sigma_{33}^2}{2E_2(1 - D_3)} - \frac{v_{21}\sigma_{11}\sigma_{33}}{2E_2(1 - D_3)} - \frac{v_{23}\sigma_{33}\sigma_{22}}{2E_2(1 - D_3)} + \frac{\sigma_{13}^2}{2G_{12}\sqrt{(1 - D_1)(1 - D_3)}} + \frac{\sigma_{23}^2}{2G_{23}\sqrt{(1 - D_2)(1 - D_3)}} \quad (9)$$

2-2- مدل ناحیه‌ی چسبنده تحت بارگذاری خستگی

تورن و همکاران [16] یک مدل خرابی برای شبیه‌سازی رشد جدایی بین لایه‌ای تحت بارگذاری خستگی پر چرخه پیشنهاد کردند. اساس مدل این محققین، ارائه‌ی یک قانون چسبنده بود که از برقراری ارتباط میان مکانیک شکست و آسیب به منظور تخمین میزان تغییر تدریجی متغیر آسیب در طول چرخه‌های خستگی استفاده می‌کند. برای برقراری این ارتباط از مفهوم انرژی کرنشی المان چسبنده استفاده کردند و رابطه‌ی 10 را پیشنهاد دادند.

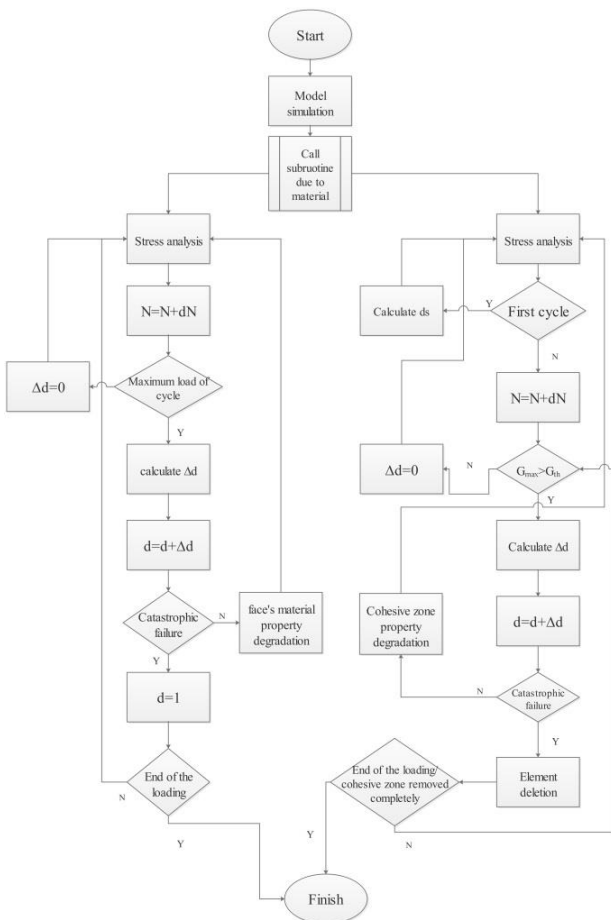


Fig. 1 Fatigue analysis algorithm

شکل 1 الگوریتم تحلیل خستگی سازه‌ی ساندویچی

در مدل اجزای محدود از المان‌های کرنش صفحه‌ای 4 گره‌ای برای بازوها (پوسته‌ی بالا و پایین ناحیه‌ی چسبنده) استفاده شده است. برای شبیه‌سازی ناحیه‌ی چسبنده نیز از المان‌های چسبنده‌ی 4 گره‌ای نیز استفاده شده است.

پارامترهای قانون پاریس که در شبیه‌سازی عددی مورد نیاز است از طریق برازش منحنی خطی به داده‌های تجربی [19] به دست آمده است و خواص خستگی ماده در جدول 1 گزارش شده است. بار در دو مرحله اعمال شده است: مرحله اول شبه استاتیکی است و به حداکثر بار اعمال شده ختم می‌شود. فرض بر این است که هیچ آسیب خستگی در این مرحله رخ نمی‌دهد. در مرحله‌ی بعد، چرخه‌های بارگذاری خستگی اعمال شده است.

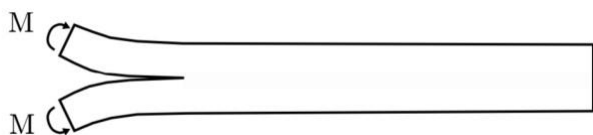


Figure 2 Loading pattern for model Specimen for cohesive zone subroutine validation [16]

شکل 2 مدل بارگذاری مود I بر روی نمونه برای اعتبار سنجی زیربرنامه‌ی ناحیه‌ی چسبنده [16]

افزار آباکوس توسط دو زیر برنامه‌ی USDFLD و UMAT اعمال شده است. زیر برنامه‌ی USDFLD برای اعمال مدل خستگی در ناحیه‌ی چسبنده و زیر برنامه‌ی UMAT برای اعمال مدل خستگی بر پوسته‌ی کامپوزیتی سازه است. همان گونه که در شکل 1 مشخص است، در هر پله از بارگذاری هر نقطه‌ی انتگرال‌گیری مطابق با ماده‌ای که برای آن تعریف شده است زیر برنامه‌ی مربوطه را صدا می‌زند و خواص ناحیه‌ی چسبنده و پوسته مطابق با مدل مربوط به خود که در بخش 2 توضیح داده شده است کاهش پیدا می‌کنند.

در هر مرحله از نمو بارگذاری نرم افزار برای نقاط انتگرال‌گیری المان‌های چسبنده اگر به مرحله‌ی بیشینه‌ی بارگذاری در چرخه رسیده باشد، مطابق با رابطه‌ی 11 مقدار تغییرات انرژی کرنشی را محاسبه می‌کند. اگر این مقدار از مقدار انرژی کرنشی آستانه‌ی خستگی که از رابطه‌ی 15 به دست آورده آمده است بیشتر باشد مقدار تغییر متغیر آسیب خستگی مربوط به آن طبق رابطه‌ی 10 محاسبه و به روز می‌شود. اگر مقدار تغییرات انرژی کرنشی چرخه از حد آستانه‌ی خستگی بیشتر نشود یا بارگذاری به حد بیشینه در چرخه نرسیده باشد، متغیر آسیب خستگی نسبت به نمو قبلی تغییر نمی‌کند و ثابت باقی می‌ماند. در هر مرحله که بارگذاری به بیشینه‌ی خود در چرخه می‌رسد و متغیر آسیب خستگی آن تغییر می‌کند، خواص ناحیه‌ی چسبنده و متعاقباً نمودار دوخطی ناحیه‌ی چسبنده و انرژی کرنشی شکست آن تغییر می‌کند. این فرآیند تا زمانی که انرژی کرنشی بیشینه در چرخه‌ی بارگذاری به مقدار انرژی کرنشی شکست ماده برسد ادامه پیدا می‌کند.

در هر مرحله از نمو بارگذاری برای نقاط انتگرال‌گیری المان‌های پوسته بعد از تحلیل تنش، نرم افزار رسیدن به بیشینه‌ی بار در چرخه را کنترل می‌کند. اگر به بار بیشینه در چرخه نرسیده باشد، مقدار متغیر آسیب مربوط به آن تغییر نمی‌کند و ثابت باقی می‌ماند؛ اما زمانی که نمو بارگذاری به مقدار بیشینه در چرخه‌ی بارگذاری می‌رسد، مقدار تغییر متغیرهای آسیب طبق رابطه‌ی 1 تا 3 محاسبه و به روز می‌شود. هنگامی که متغیرهای آسیب تغییر می‌کنند خواص مکانیکی پوسته کاهش یافته و به روز می‌شوند. این فرآیند تا زمانی که مقدار تنش در پوسته به استحکام کاهش یافته‌ی آن برسد ادامه پیدا می‌کند. ویژگی منحصربه‌فرد این روند این است که به طور هم زمان خستگی در پوسته و ناحیه‌ی چسبنده را تحلیل می‌کند و باعث می‌شود که اثرات خستگی در پوسته و کاهش خواص آن بر روی تنش و خستگی در ناحیه‌ی چسبنده و بالعکس دیده شود.

3-1- اعتبار سنجی زیر برنامه‌ی ناحیه‌ی چسبنده

برای اعتبار سنجی نتایج عددی از داده‌های تجربی آسپ و همکاران [19] استفاده شده است. نمونه با کربن/پوکسی HTA/6376C پیش آغشته شده توسط Hexcel ساخته شده است. لایه‌چینی به صورت $[0_{12}/(\pm 5/0_4)_s]$ است که در آن علامت // به صفحه ترک اولیه (محل استفاده از المان‌های چسبنده) اشاره دارد. طول نمونه 150 میلی‌متر، عرض 20 میلی‌متر، با دو بازوی 1.55 میلی‌متری و طول ترک اولیه 35 میلی‌متر است. خواص ماده در جدول 1 نشان داده شده است. در مدل اجزای محدود، بازوهای نمونه با گشتاورهای مخالف بارگذاری می‌شوند (شکل 2) تا نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای مود I که مستقل از طول ترک است به دست آید. نرخ آزادسازی انرژی کرنشی با گشتاور اعمال شده به صورت رابطه‌ی 17 مرتبط است:

$$G_I = \frac{M^2}{bEI} \quad (17)$$

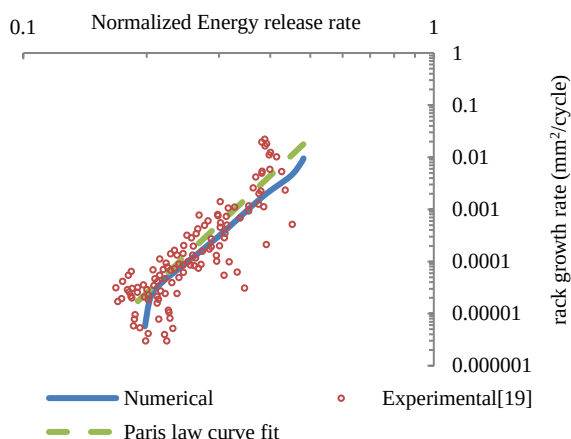


Figure 3 Validation of USDFLD subroutine for mode I loading

شکل 3 اعتبارسنجی زیر برنامه‌ی USDFLD تحت بارگذاری مود I

جدول 2 خواص استاتیکی و خستگی کامپوزیت AS4/3501-6 [15]

Table 2 Static and fatigue properties of AS4/3501-6 [15]

مقدار	خواص
E_{xx}	147 (GPa)
$E_{yy} = E_{zz}$	9 (GPa)
$G_{xy} = G_{xz}$	5 (GPa)
G_{yz}	3 (GPa)
$\nu_{xy} = \nu_{xz}$	0.3
ν_{yz}	0.42
X_t	2004 (MPa)
X_c	1197 (MPa)
$Y_t = Z_t$	53 (MPa)
$Y_c = Z_c$	204 (MPa)
$S_{xy} = S_{xz}$	137 (MPa)
S_{yz}	42 (MPa)
m_1	6.62
m_2	5.85
c_1	1.36×10^{-5}
c_2	7.74×10^{-4}

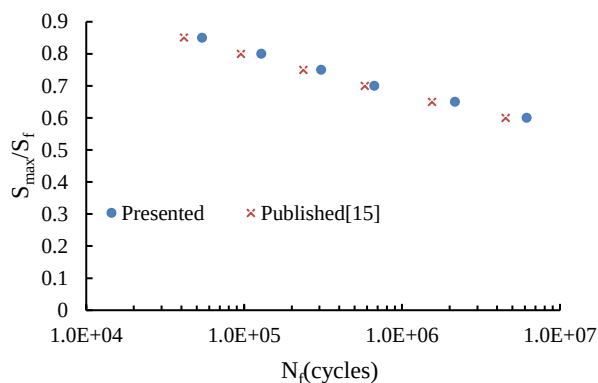


Figure 4 Validation of UMAT subroutine for tension-tension load and 0.1 load ratios

شکل 4 اعتبارسنجی زیر برنامه‌ی UMAT تحت بار کشش-کشش در راستای الیاف و نسبت بار 0.1

جدول 1 خواص استاتیکی و خستگی کامپوزیت HTA/6376C [19,20]

Table 1 Static and fatigue properties of HTA/6376C [19,20]

مقدار	خواص
K	$(MPa)10^4$
τ_n^0	30 (MPa)
τ_s^0	30 (MPa)
G_{Ic}	0.26 (N/mm)
G_{IIc}	1.002 (N/mm)
η_{th}	2.737
C_I	0.00308 (mm/cycles)
C_{II}	0.1495 (mm/cycles)
C_m	458087.2 (mm/cycle)
CZ thickness	0.005 (mm)
G_{Ith}	0.06 (N/mm)
G_{IIth}	0.1 (N/mm)
m_I	5.4
m_{II}	4.5
m_m	4.94

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها و داده‌های تجربی در شکل 3 نشان داده‌شده‌اند. می‌توان مشاهده کرد که مدل ناحیه‌ی چسبنده‌ی پیاده شده هر سه ناحیه رشد ترک خستگی را محاسبه می‌کند. در منطقه‌ی II، جایی که نرخ رشد ترک از قانون پاريس پیروی می‌کند، مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین پیش‌بینی‌ها و داده‌های تجربی به‌دست‌آمده است. در منطقه I نرخ رشد ترک برای مقادیر کوچک نرخ آزادسازی انرژی نرمال شده ناچیز است و داده‌های عددی از روند داده‌های تجربی پیروی می‌کنند. تفاوت معنی‌داری بین داده‌های عددی و تجربی در منطقه‌ی III مشاهده می‌شود. یکی از دلایل این تفاوت این است که نرخ رشد ترک موجود در منطقه‌ی III بسیار بالا است؛ بنابراین، یک مدل خستگی کم چرخه به‌جای پر چرخه برای این منطقه مناسب‌تر است. با این حال، با وجود این تفاوت، مدل می‌تواند نرخ رشد ترک منطقه‌ی III را پیش‌بینی کند.

2-3- اعتبارسنجی زیر برنامه‌ی خستگی پوسته

برای صحت‌سنجی زیر برنامه‌ی UMAT نوشته‌شده، یک چندلایه‌ی کامپوزیتی با لایه‌چینی [0₁₆]₂ از جنس AS4/3501-6 که خواص آن در جدول 2 قابل مشاهده است. برای این اعتبارسنجی چندلایه با طول 101.6 mm، عرض 25.4 mm و ضخامت 2.336 mm (برای 16 لایه) تحت بارگذاری کشش-کشش با نسبت بار 0.1 در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از حل توسط زیر برنامه‌ی نوشته‌شده با نتایج مرجع [15] مقایسه و در شکل 4 گزارش شده است. مقایسه‌ی نتایج نشان از درستی عملکرد زیر برنامه‌ی UMAT نوشته‌شده دارد. مقدار خطاهایی که در شکل 4 مشاهده می‌شود به علت تفاوت در نحوه‌ی پیاده‌سازی مدل و شبیه‌سازی آن در این پژوهش و مرجع [15] است. ثوابت مربوط به مدل خستگی استفاده‌شده برای ماده‌ی AS4/3501-6 در جدول 2 گزارش شده است.

3-3- شبیه‌سازی صفحه‌ی ساندویچی کامپوزیتی

با استفاده از ابزاری که در شکل 1 الگوریتم آن نشان داده شده است و اجزای آن در بخش قبل اعتبارسنجی شده‌اند، تیری ساندویچی تحت ارزیابی خرابی قرار گرفته است. این سازه به طول 60 mm و عرض 30 mm با ضخامت 3.01 mm در نرم‌افزار آباکوس همان‌گونه که در شکل 5 مشخص است شبیه‌سازی شده است. این ضخامت متشکل از 8 لایه با زاویه‌ی 0 درجه و هریک به ضخامت 0.125mm و نواحی چسبنده‌ی دو طرف هسته هریک به ضخامت 0.005mm و هسته‌ای به ضخامت 2mm است.

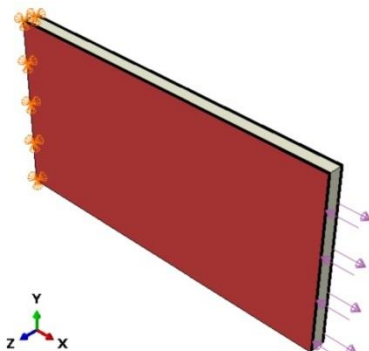


Fig. 5 Sandwich panel model in abaqus for loading1

شکل 5 مدل هندسی و بارگذاری ساندویچی کامپوزیتی برای بارگذاری

1

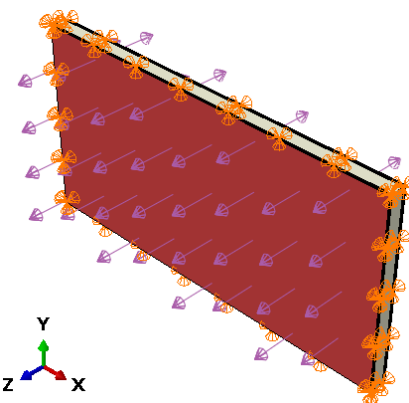


Fig. 6 Sandwich model in abaqus for loading2

شکل 6 مدل هندسی و بارگذاری ساندویچی کامپوزیتی برای بارگذاری

2

پوسته‌ی بالایی هسته تحت بار فشاری 40MPa و پوسته‌ی زیرین آن تحت بارکششی 40MPa قرار گرفته است. این بارگذاری به صورت چرخه‌ای با نسبت بار 0.1 به سازه اعمال شده است. همچنین برای اعمال شرایط مرزی، همان‌گونه که در شکل 5 قابل مشاهده است، انتهای صفحه در راستای سه جهت مختصات بسته شده است. همچنین برای بررسی نحوه‌ی رشد ترک بارگذاری مطابق با شکل 6 مورد بررسی واقع شده است.

در این شبیه‌سازی از المان‌های C3D8 برای پوسته، C3D8R برای هسته و COH3D8 برای ناحیه‌ی چسبنده استفاده شده است.

پوسته‌ی سازه از جنس کامپوزیت AS4/3501-6 در نظر گرفته شده است که خواص استاتیکی و خستگی آن در جدول 2 گزارش شده است. خواص خستگی و استاتیکی ناحیه‌ی چسبنده مطابق با جدول 1 فرض شده است. هرچند این فرض می‌تواند اشتباه باشد اما با توجه به اینکه خواص صحیح آن در دسترس نیست و همچنین هدف استفاده از ابزار ایجاد شده و همچنین حساسیت سنجی سازه نسبت به تغییر سفتی هسته است، علی‌رغم

اینکه پاسخ‌های حاصل از تحلیل از لحاظ عددی دارای خطا می‌باشند اما برای تأیید کارکرد ابزار ایجاد شده و روند تأثیر سفتی هسته بر خرابی سازه قابل اعتماد هستند. برای بررسی اثر سفتی هسته بر خرابی سازه، هسته با ضریب پواسون¹ 0.3 و سفتی‌های 50MPa، 1GPa و 3GPa مورد ارزیابی واقع شده است.

4- نتایج

در ابتدا برای حساسیت سنجی سفتی هسته بر خرابی سازه تحت بارگذاری متناوب، با تغییر خواص هسته مطابق با مقدارهای بیان شده در بخش قبل، تحلیل‌های خستگی با ترکیب دو زیر برنامه‌ی UMAT و USDFLD انجام شده است. نتایج این تحلیل در شکل 7 قابل مشاهده است. نتایج گزارش شده در شکل 7 برای نقطه‌ای به فاصله‌ی 16 mm از مرکز محل اعمال شرایط مرزی در ناحیه‌ی چسبنده بر روی صفحه‌ی بالایی سازه‌ی ساندویچی گزارش شده‌اند. دلیل انتخاب این نقطه این است که به مقدار کافی از محل اعمال شرایط مرزی و تأثیرات آن دور است و همچنین از نقاطی است که زودتر به مرحله‌ی خرابی کامل رسیده است.

همان‌گونه که در شکل 7 مشخص است هرچه میزان سفتی هسته‌ی سازه کاهش یافته است خرابی ناشی از خستگی در لایه‌ی چسبنده زودتر شروع شده است. علت این روند آن است که با توجه به اینکه سازه از نوع معین است و بارگذاری و شرایط مرزی برای هر سه تحلیل یکسان است و همچنین المان انتخابی از محل اعمال شرایط مرزی فاصله‌ی کافی دارد، با افزایش سفتی هسته مقدار کرنش معادل در المان مشخص کاهش می‌یابد. در نتیجه بیشینه‌ی نرخ رها سازی انرژی کرنشی کاهش یافته و ناحیه‌ی چسبنده دیرتر به نرخ رها سازی انرژی کرنشی آستانه‌ی خستگی می‌رسد و شروع پدیده‌ی خستگی دیرتر در آن رخ می‌دهد.

همان‌گونه که از شکل‌های 8، 9 و 10 قابل مشاهده است با افزایش سفتی هسته، خرابی ناشی از خستگی در ناحیه‌ی چسبنده از حالت گسترش در مرکز اتصال به گسترش در لبه‌های اتصال تغییر کرده است. هرچه هسته سفتی بیشتری داشته باشد باعث می‌شود که کرنش‌های عرضی در ناحیه‌ی لبه‌های آزاد صفحه کمتر شود. این کاهش کرنش عرضی در قسمت هسته باعث افزایش اختلاف کرنش بین هسته و پوسته می‌شود که این عامل سبب بیشتر شدن خرابی ناشی از خستگی در این ناحیه می‌شود.

در شکل 11 مقایسه‌ای از روند رشد خرابی خستگی در لایه‌ی چسبنده و لایه‌ی بحرانی پوسته (لایه‌ای که زودتر دچار خرابی شده است) برای پوسته با لایه‌چینی [90₄] درجه گزارش شده است. چون پارامتر خرابی در لایه‌ی بحرانی پوسته از 1e-8 کمتر است، حالت کنترل‌کننده‌ی عمر خستگی در این سازه با خواص و بارگذاری ذکر شده در بخش قبل، جدایش بین پوسته و هسته است. این علتی بر این است در بررسی خرابی‌های ناشی از خستگی، لایه‌ی چسبنده بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. به همین دلیل برای مشاهده و مقایسه‌ی نرخ رشد پارامتر خرابی در شکل 11 محور عمودی نسبت به بیشینه‌ی پارامتر خرابی بعد از 100000 چرخه در المان بحرانی بی‌بعد شده است. این نتایج برای تعداد چرخه‌ی یکسان ثبت شده‌اند. قابل مشاهده است که شروع خرابی ابتدا در ناحیه‌ی چسبنده بوده است. همچنین سرعت رشد پارامتر خرابی خستگی در ابتدا در ناحیه‌ی چسبنده بیشتر و به تدریج از سرعت رشد آن کم شده است و سرعت رشد پارامتر خرابی در المان بحرانی پوسته به صورت صعودی است. علت کاهش سرعت رشد خرابی در المان

¹ Poisson's ratio



Fig. 10 Fatigue damage variable distribution in cohesive zone of sandwich panel for upper interface after 70000 cycles & core stiffness = 1GPa

شکل 10 توزیع پارامتر خرابی خستگی در ناحیه‌ی چسبنده برای سطح اتصال بالایی صفحه‌ی ساندویچی بعد از 70000 چرخه با هسته‌ای به سفتی 1GPa

طبق رابطه‌های 7، 8 و 9 با افزایش کرنش در حالت بار کنترل مقدار ΔW در هر چرخه افزایش می‌یابد و متعاقباً طبق رابطه‌های 4، 5 و 6 سرعت رشد خرابی با افزایش تعداد چرخه افزایش پیدا می‌کند.

ثابت بودن پارامتر خرابی در طول فرآیند باربرداری در هر چرخه علت پله‌های ریزی است که در نمودارهای رشد پارامتر خستگی مشاهده می‌شود.

هدف از گزارش شکل 11 مقایسه‌ی سرعت و نحوه‌ی رشد پارامتر خرابی ناشی از خستگی در المان‌های بحرانی ناحیه‌ی چسبنده و پوسته است.

نتایج مطرح‌شده تا به اینجا مربوط به یک المان خاص بوده است. برای مشاهده و درک نحوه‌ی رشد ترک در ناحیه‌ی بین پوسته و هسته باید خرابی در کل ناحیه‌ی اتصال بررسی شود و نتایج در یک المان نمی‌تواند درک درستی از نحوه‌ی رشد ترک در سطح را بدهد. به همین دلیل رشد سطح ترک برای بارگذاری نوع دوم موردبررسی واقع‌شده است و نتایج آن در شکل 12 قابل‌مشاهده است. همان‌گونه که در شکل 12 مشخص است، هرچند مطابق نتایج قسمت قبل سرعت رشد پارامتر خرابی خستگی در یک المان با افزایش تعداد چرخه‌ی بارگذاری کاهش‌یافته است، اما سطح ترک با افزایش تعداد چرخه‌ی بارگذاری رشد می‌کند و همچنین سرعت رشد سطح ترک بعد از خرابی 80 درصد سطح اتصال به‌صورت دفعی و ناگهانی افزایش زیادی پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که مقدار بحرانی پارامتر خرابی ناشی از خستگی برای المان‌های ناحیه‌ی چسبنده 0.35 در نظر گرفته‌شده است.

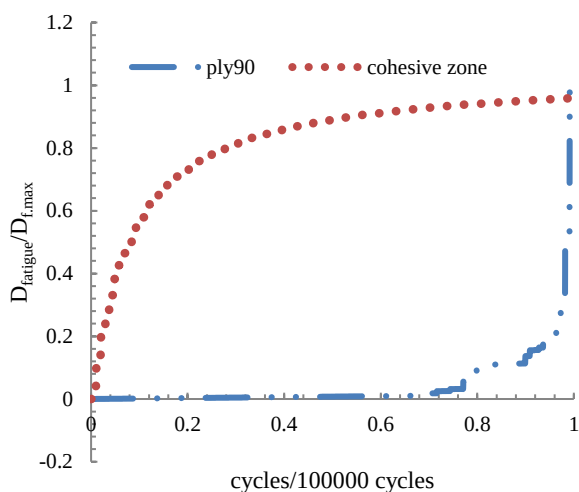


Fig. 11 Compare fatigue damage variable growth in critical element of cohesive zone with critical element of face

شکل 11 مقایسه‌ی رشد پارامتر خرابی خستگی در المان‌های بحرانی ناحیه‌ی چسبنده و پوسته‌ی سازه‌ی ساندویچی

بحرانی ناحیه‌ی چسبنده کاهش مساحت زیر مدل دوخطی ناحیه‌ی چسبنده با پیشروی خستگی است. هرچه تعداد چرخه‌ی بارگذاری و مقدار پارامتر خرابی خستگی در ناحیه‌ی چسبنده رشد می‌کند مساحت زیر مدل دوخطی ناحیه‌ی چسبنده و متعاقباً نرخ آزادسازی انرژی کرنشی کاهش می‌یابد؛ اما در پوسته‌ی سازه با شروع خرابی ناشی از بارگذاری خستگی میزان باربرداری پوسته کم می‌شود و به علت بار کنترل بودن بارگذاری میزان کرنش در هر چرخه افزایش پیدا می‌کند.

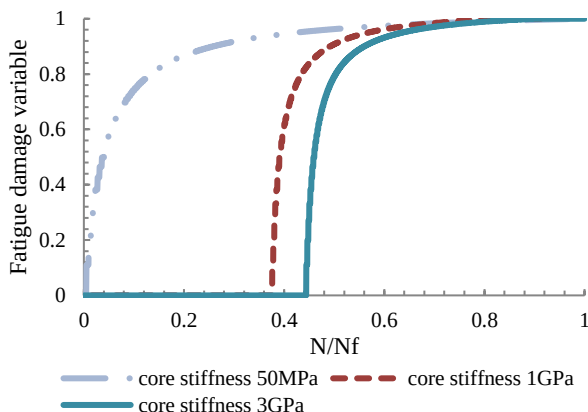


Fig. 7 Compare fatigue damage variable growth in cohesive zone with different core stiffness for upper interface & R=0.1

شکل 7 مقایسه‌ی رشد پارامتر خرابی خستگی در ناحیه‌ی چسبنده با هسته‌های مختلف برای سطح اتصال بالایی و نسبت بار 0.1



Fig. 8 Fatigue damage variable distribution in cohesive zone of sandwich panel after 70000 cycles for upper interface & core stiffness = 20MPa

شکل 8 توزیع پارامتر خرابی خستگی در ناحیه‌ی چسبنده برای سطح اتصال بالایی صفحه‌ی ساندویچی بعد از 70000 چرخه با هسته‌ای به سفتی 20MPa



Fig. 9 Fatigue damage variable distribution in cohesive zone of sandwich panel after 70000 cycles for upper interface & core stiffness = 50MPa

شکل 9 توزیع پارامتر خرابی خستگی در ناحیه‌ی چسبنده برای سطح اتصال بالایی صفحه‌ی ساندویچی بعد از 70000 چرخه با هسته‌ای به سفتی 50MPa

6- مراجع

- [1] Burman, M., Zenkert, D., "Fatigue of foam core sandwich beams- 2: effect of initial damage," International journal of fatigue, Vol. 19, pp.563-578, 1997.
- [2] Rashiddadash, S., Sadighi, M., Dariushi, S., "Experimental and numerical investigation of sandwich panels with bilateral connection under static loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 415-426, 2018.
- [3] Sheno, R. A., Aksu, S., Allen, H. G., "Flexural fatigue characteristics of FRP sandwich beams," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 16, pp.649-662, 1993.
- [4] Sheno, R. A., Clark, S. D., Allen, H. G., "Fatigue behavior of polymer composite sandwich beams," Journal of Composite Materials, Vol. 29, pp.2423-2445, 1995.
- [5] Shipsha, A., Burman, M., Zenkert, D., "Interfacial fatigue crack growth in foam core sandwich structures," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 22, pp.123-131, 1999.
- [6] Harte, A. M., Fleck, N. A., Ashby, M. F., "The fatigue strength of sandwich beams with an aluminum alloy foam core," International journal of fatigue, Vol. 23, pp.499-507, 2001.
- [7] Kanny, K., Mahfuz, H., "Flexural fatigue characteristics of sandwich structures at different loading frequencies," Composite Structures, Vol. 67, pp.403-410, 2005.
- [8] Dawood, M., Taylor, E., Ballew, W., "Static and fatigue bending behavior of pultruded GFRP sandwich panels with through-thickness fiber insertions," Composites Part B: Engineering, Vol. 41, pp.363-374, 2010.
- [9] Khabbaz, R. S., "Fatigue Life Prediction of Adhesively-Bonded Fiber-Reinforced Polymer Structural Joints under Spectrum Loading Patterns," Doctoral dissertation, EPFL, Switzerland, 2012.
- [10] Suzuki, T., Mahfuz, H., "Fatigue characterization of GFRP and composite sandwich panels under random ocean current loadings," International journal of fatigue, Vol. 111, pp.124-133, 2018.
- [11] Wu, X., Yu, H., Guo, L., Zhang, L., Sun, X., Chai, Z., "Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure," Composite Structures, Vol. 213, pp.165-172, 2019.
- [12] Martakos, G., Andreasen, J. H., Berggreen, C., Thomsen, O. T., "Experimental investigation of interfacial crack arrest in sandwich beams subjected to fatigue loading using a novel crack arresting device," Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 21, pp.401-421, 2019.
- [13] Cameselle-Molares, A., Vassilopoulos, A. P., Keller, T., "Two-dimensional fatigue debonding in GFRP/balsa sandwich panels," International journal of fatigue, Vol. 125, pp.72-84, 2019.
- [14] Yanga, C., Xiaolong, L., Fanga, H., Shib, H., Liua, W., Zhua, D., "An experimental investigation of static and fatigue behavior of GFRP sandwich beams with a web reinforced wood core," Construction and Building Materials, Vol. 252, pp.119-194, 2020.
- [15] Salimi-majd, D., Helmi, M., Mohammadi, B., "Damage growth prediction of unidirectional layered composites under cyclic loading using an energy based model," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 7, pp. 173-180, 2015.
- [16] Turon, A., Costa, J., Camanho, P. P., Dávila, C. G., "Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No.11, pp. 2270-2282, 2007.
- [17] Blanco, N., Gamstedt, E. K., Asp, L. E., Costa, J., "Mixed-mode delamination growth in carbon-fiber composite laminates under cyclic loading," International journal of solids and structures, Vol. 41, pp. 4219-4235, 2004.

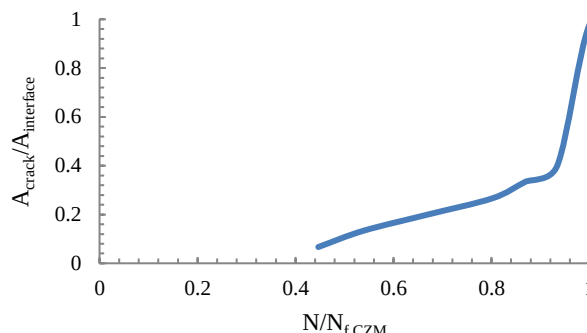


Fig. 12 Growth crack area in interface

شکل 12 رشد سطح ترک در ناحیه‌ی اتصال پوسته و هسته

5- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش ایجاد ابزار جدیدی برای حل اجزای محدود بوده است. به صورتی که برای اولین بار حل اجزای محدود بتواند به صورت هم‌زمان خستگی در پوسته و جدایش بین پوسته و هسته را مشاهده کند و همچنین انعطاف‌پذیری لازم برای اعمال مدل‌های مختلف را داشته باشد. این پژوهش با ترکیب مدل‌های مختلف تحلیل خستگی متناسب با جنس و مکانیک خرابی مختص هر بخش از سازه و ارائه الگوریتمی جدید باعث شده است که اثر خستگی در پوسته و کاهش خواص مکانیکی آن در تنش و خستگی در ناحیه‌ی اتصال پوسته و هسته (ناحیه‌ی چسبنده) و بالعکس دیده شود.

با توجه به نتایج گزارش‌شده در قسمت قبل، برای صفحه‌ی ساندویچی کامپوزیتی تحت بار خمشی متناوب با نسبت بار 0.1 و خواص خستگی و استاتیکی بیان‌شده می‌توان دریافت که:

- سازه‌ی ساندویچی یادشده عملکرد مناسبی در برابر بارگذاری متناوب ندارد. چون قبل از اینکه پوسته تمام ظرفیت باربرداری خود در بارگذاری متناوب را استفاده کند سازه دچار جدایش در ناحیه‌ی اتصال پوسته و هسته می‌شود.
- با افزایش سفتی هسته خرابی ناشی از خستگی در ناحیه‌ی چسبنده برای نقطه‌ی بحرانی و دور از شرایط مرزی دیرتر شروع می‌شود؛ اما سرعت رشد آن بعد از شروع خرابی ناشی از خستگی بیشتر از سازه با هسته‌های نرم‌تر است.
- با افزایش سفتی هسته جدایش پوسته از هسته بیشتر به سمت لبه‌های آزاد می‌رود و از مرکز اتصال پوسته و هسته دور می‌شود.
- حالت کنترل‌کننده‌ی عمر سازه در بارگذاری متناوب جدایش بین پوسته و هسته است.
- با افزایش تعداد چرخه‌ی بارگذاری سرعت رشد خرابی خستگی برای یک المان مشخص در ناحیه‌ی اتصال پوسته و هسته کاهش پیدا می‌کند و در پوسته سرعت رشد خرابی ناشی از خستگی بیشتر می‌شود. همچنین واماندگی در نقاط بحرانی پوسته برای سازه با پوسته‌ای با لایه‌چینی [4]90 به صورت ناگهانی رخ می‌دهد.
- با افزایش تعداد چرخه‌ی بارگذاری، مساحت سطح ترک در ناحیه‌ی اتصال پوسته و هسته و همچنین سرعت رشد آن افزایش می‌یابد.

- [18] Benzeggagh, M. L., Kenane, M., "Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus," Composites science and technology, Vol. 49, pp. 439-449, 1996.
- [19] Asp, L., Sjogren, A., Greenhalgh, E., "Delamination growth and thresholds in a carbon/epoxy composite under fatigue loading," Journal of Composites, Technology and Research, Vol.23, pp. 55-68, 2001.
- [20] Robinson, P., Galvanetto, U., Tumino, D., Bellucci, G., "Numerical simulation of fatigue-driven delamination using interface elements," International journal for numerical methods in engineering, Vol. 63, pp. 1824-1848, 2005.



مدل توسعه یافته میکرومکانیکی برای پیش بینی خواص الکتریکی نانوکامپوزیت های پلیمری حاوی نانولوله های کربنی

مجتبی مظاهری¹، جواد پاینده پیمان^{2*}

1- استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران.

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران.

* همدان، صندوق پستی 3733-1-65169، j.payandeh@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/07/26

پذیرش: 1401/10/10

کلیدواژگان

نانوکامپوزیت پلیمر رسانا،

نانولوله کربنی،

فاز میانی،

آستانه پرکولاسیون،

مدل میکرومکانیکی

چکیده:

در این مقاله، یک مدل توسعه یافته میکرومکانیکی برای پیش بینی رسانایی الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت های پلیمری حاوی نانولوله های کربنی ارائه شده است. این مدل بر اساس نظریه میدان میانگین و با در نظر گرفتن پدیده تونل زنی کوانتومی الکترون ها بین نانو پرکننده ها ایجاد شده است. نانولوله های کربنی به شکل استوانه فرض شده اند که یک لایه بین فازی آن ها را پوشش داده است. نانولوله های کربنی به صورت تصادفی در مکان های مختلف در داخل ماتریس پلیمری و با جهت گیری تصادفی توزیع شده اند. تأثیر پارامترهای گوناگون نظیر ابعاد هندسی نانولوله های کربنی، نسبت اندازه آن ها، ضخامت لایه بین فازی، تونل زنی کوانتومی الکترون ها، رسانایی ماتریس پلیمر، رسانایی نانولوله های کربنی و رسانایی لایه بین فازی بر روی رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت در مدل نظری در نظر گرفته شده اند. مدل ارائه شده رفتارهای الکتریکی نانوکامپوزیت ها را در ناحیه عایق، ناحیه پرکولاسیون و ناحیه فلزی و همچنین گذار تیز رسانایی یا آغاز پرکولاسیون و ناحیه فلزی در کسر حجمی های بالا را به خوبی بازتولید می کند. نتایج نشان می دهد که با افزایش اندازه نانولوله های کربنی در نانوکامپوزیت، آستانه پرکولاسیون کاهش می یابد. مقدار رسانایی پرکننده و ماتریس به ترتیب تنها بر ناحیه فلزی و عایق اثرگذار هستند. به منظور صحت سنجی، نتایج آزمایشگاهی موجود در مطالعات قبلی با مدل حاضر پیش بینی شده است که مدل ارائه شده به خوبی این نتایج تجربی را پیش بینی می کند.

A developed micromechanical model to predict electrical properties of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes

Mojtaba Mazaheri¹, Javad Payandehpeyman^{2*}

1- Department of Basic Science, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

* P.O.B. 65169-1-3733, Hamedan, Iran, j.payandeh@hut.ac.ir

Keywords

Conductive polymer nanocomposite,
Carbon nanotube, Interphase, Percolation
threshold, Micromechanical model

Abstract

In this paper, a developed micromechanical model to predict the effective electrical conductivity of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes was presented. This model was based on mean field theory and considering the quantum tunneling phenomenon of electrons between nanofillers. Carbon nanotube was assumed to be cylindrical, which was covered by an interphase layer. Carbon nanotubes were randomly distributed and oriented inside the polymer matrix. The effect of various parameters such as the geometric dimensions of carbon nanotubes, their aspect ratio, the thickness of the interphase layer, the quantum tunneling of electrons, the conductivity of the polymer matrix, the conductivity of carbon nanotubes and the conductivity of the interphase layer on the effective conductivity of the nanocomposite were considered in the theoretical model. The presented model reproduced the electrical behavior of nanocomposites in the insulating region, the percolation region, and the metal region, as well as the sharp transition of conductivity or the beginning of percolation and the metal region in high volume fractions. The results showed that by increasing the size of carbon nanotubes in nanocomposite, the percolation threshold decreased. The conductivity values of the filler and the matrix, respectively, only affected the metal and insulation areas. Finally, the present model was used to reproduce the experimental reported data that the predicted results were in good agreement with the experimental data.

Please cite this article using:

Mazaheri, M., Payandehpeyman, J., "A developed micromechanical model to predict electrical properties of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1961-1969, 2023.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.563716.1805

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1-مقدمه

استفاده از نانوکامپوزیت‌ها به دلیل خواص فوق‌العاده مختلف آن‌ها در سال‌های اخیر گسترش بسیار زیادی پیدا کرده است [1]. نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری با توجه به وزن بسیار کم و مراحل ساخت ساده‌تر که منجر به کاهش هزینه‌های تولید آن‌ها می‌شود [2]، در حال جایگزینی سایر مواد در صنایع مختلف شده است [3]. در میان پرکننده‌های مختلف کامپوزیت‌ها، نانولوله‌های کربنی به دلیل استحکام بسیار بالا، رسانایی الکتریکی و گرمایی فوق‌العاده در کنار انعطاف بسیار زیاد آن، جایگاه ویژه‌ای در تولید نانوکامپوزیت‌ها پیدا کرده است [4,5]. نانوکامپوزیت پلیمری رسانا¹ با پرکننده نانولوله‌های کربنی به دلیل ویژگی‌های الکتریکی، گرمایی و مکانیکی دارای کاربردهای زیادی در ابزارهای الکترونیکی قابل کشش² [6]، محافظ تداخل الکترومغناطیسی [7] و حسگرها هستند [8]. افزودن کسر حجمی مشخصی از نانولوله‌های کربنی به نانوکامپوزیت پلیمری منجر به افزایش ناگهانی رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت پلیمری می‌شود که به عنوان آستانه پرکولاسیون³ شناخته می‌شود [9].

رسانایی الکتریکی و نسبت اندازه نانولوله‌های کربنی از رسانایی الکتریکی و نسبت اندازه⁴ پرکننده‌های کربنی مانند کربن بلک⁵، گرافن و فیبرهای کربنی بیشتر است. در نتیجه نانوکامپوزیت‌های پلیمر حاوی نانولوله‌های کربنی آستانه پرکولاسیون در بازه $P_c = 0.017 - 0.021$ دارند که کمتر از آستانه پرکولاسیون نانوکامپوزیت‌های حاوی پرکننده‌های دیگر کربنی مانند کربن بلک [10]، گرافن و فیبرهای کربنی است [11]. نحوه توزیع مکانی و جهت‌گیری نانولوله‌های کربنی در داخل پلیمر منجر به تولید نانوکامپوزیت‌هایی با ساختار همگن⁶، ساختار تجمع‌یافته⁷ و ساختار جدا شده⁸ می‌گردد. رسانایی الکتریکی در نانوکامپوزیت‌ها بر اساس دو سازوکار شبکه رانش در ماتریس و پدیده تونل زنی کوانتومی الکترون‌ها بین پرکننده‌ها رخ می‌دهد [10]. در سازوکار شبکه رانش، نانولوله‌های کربنی رسانا هستند و با افزایش کسر حجمی یک شبکه اتصال رسانا در داخل ماتریس تشکیل می‌دهند. بنابراین، الکترون‌ها می‌توانند در داخل نانولوله‌های کربنی و بین آن‌ها از طریق اتصال‌ها حرکت کنند. در سازوکار تونل زنی کوانتومی، الکترون‌های رانش می‌توانند در بین نانولوله‌هایی که در فاصله‌های نزدیک هستند تونل زنی کنند. وقتی نانولوله‌های کربنی در فاصله‌ای کمتر از طول تونل زنی⁹ از یکدیگر قرار می‌گیرند الکترون‌ها می‌توانند از داخل ماتریس و یا لایه بین فازی به صورت تونل زنی از یک نانولوله به نانولوله دیگر تونل بزنند. نانولوله‌های کربنی در کسر حجمی‌های کم در داخل ماتریس پخش می‌شوند و بنابراین احتمال اتصال آن‌ها به یکدیگر بسیار کم است و در نتیجه سازوکار تونل زنی سهم عمده‌ای در رانش الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها دارد [12].

رسانایی الکتریکی و پدیده پرکولاسیون در نانوکامپوزیت‌های پلیمر رسانا به ویژگی‌های فیزیکی و شکل هندسی نانولوله کربنی، ماتریس پلیمر، فاز میانی یا لایه بیرونی پرکننده‌ها در ماتریس، انرژی سد تونل زنی، فاصله تونل زنی بین نانولوله‌های کربنی و توزیع نانولوله‌ها و جهت‌گیری فضایی نانولوله‌ها در نانوکامپوزیت بستگی دارد [10]. برای پیش‌بینی رسانایی و آغاز پرکولاسیون نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی از روش‌های محاسباتی از قبیل شبیه‌سازی مونت کارلو [13] و روش‌های امان محدود [14] استفاده شده‌است.

روش‌های محاسباتی عددی پر هزینه و طولانی هستند و فرمول‌بندی دقیق ندارند. مدل‌سازی‌های گوناگون هم ارائه شده‌اند که در هر یک از آن‌ها تعدادی از ویژگی‌های پرکننده‌ها، لایه بین فازی و ماتریس را در نظر گرفته‌اند [15]. به طور مثال، در مدل‌های بر اساس مدل کلاسیکی پرکولاسیون، رفتارهای قانون توان برای رسانایی در نظر می‌گیرند. این مدل‌ها، تنها رفتار سیستم در نزدیکی آستانه گذار را می‌توانند پیش‌بینی کنند و رفتارهای بخش رسانا و عایق را به خوبی پیش‌بینی نمی‌کنند. در این مدل‌های کلاسیک، سازوکار تونل زنی کوانتومی الکترونی و ویژگی‌های لایه بین فازی در نظر گرفته نمی‌شود [16]. مدل‌های ریاضی و پدیده‌شناسی هم ارائه شده‌اند که در آن‌ها همه پارامترهای فیزیکی و هندسی بخش‌های سیستم در نظر گرفته نمی‌شوند. یک مدل همگن میدان مؤثر شلبی-موری-تاناکا برای محاسبه رسانایی الکتریکی مؤثر RVE کامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربنی با زمینه سیمانی ارائه شده‌است [17]. در این مدل [17] رسانایی مؤثر RVE شامل سه بخش رسانایی ماتریس، رسانایی ناشی از تونل زنی الکترون‌ها و رسانایی ناشی از رانش بین نانولوله‌های کربنی است. سه بخش رسانایی ماتریس سیمانی، رسانایی ناشی از تونل زنی الکترون‌ها و رسانایی ناشی از رانش بین نانولوله‌های کربنی به صورت جداگانه محاسبه و در پایان با هم جمع می‌شوند. مدل همگن میدان مؤثر اشلیبی-موری-تاناکا علی‌رغم پیش‌بینی مناسب رسانایی الکتریکی مؤثر RVE در ناحیه فلزی، یک شکستگی در ناحیه آغاز پرکولاسیون دارد و پیوستگی رفتار داده‌های تجربی را نمی‌تواند بازتولید کند [17].

در مقاله حاضر، یک مدل میکرومکانیکی توسعه یافته بر اساس نظریه میدان میانگین براگمن برای شبیه‌سازی نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی با فاز میانی ارائه شده است. در این مدل فیزیکی همه ویژگی‌های رسانایی ماتریس، رسانایی ناشی از تونل زنی الکترون‌ها، رسانایی پرکننده‌ها، رسانایی لایه‌های بین فازی، ابعاد هندسی پرکننده‌ها و فاز میانی و جهت‌گیری تصادفی پرکننده‌ها بر روی رسانایی مؤثر RVE تأثیر می‌گذارند. با استفاده از این مدل، رسانایی الکتریکی مؤثر RVE به عنوان تابعی از پارامترهای مختلف فیزیکی و هندسی بخش‌های ماتریس، پرکننده و فاز میانی به صورت تحلیلی به دست می‌آید. در مدل حاضر بر خلاف مدل ارائه شده در مرجع [17] که فرض کرده است ذرات نانولوله دارای انحنای شدید بوده و به صورت کلوخه‌ای در کل زمینه سیمانی پخش شده‌اند، فرض شده‌است که ذرات نانولوله ساختار میله‌ای بدون انحنای داشته و به صورت کاملاً یکنواخت و تصادفی در زمینه پلیمری پراکنده شده‌اند. به منظور بررسی توانایی و صحت‌سنجی مدل ارائه شده برای پیش‌بینی رفتار رسانایی کامپوزیت‌های پلیمری، از نتایج تجربی چهار نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربنی با ماتریس‌های پلیمری استفاده شده‌است. این مدل توانایی بازتولید نتایج تجربی رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت در بازه گسترده‌ای از کسر پرکننده‌ها را دارد. رفتار رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت در ناحیه عایق، ناحیه گذار پرکولاسیون و ناحیه فلزی (رسانا) به دست می‌آید که با تغییرات پیوسته نتایج تجربی همخوانی دارد.

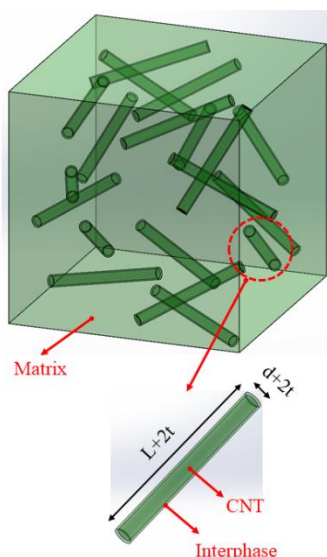
2- مبانی توسعه مدل

نحوه تغییرات رسانایی نانوکامپوزیت‌ها با افزایش پرکننده‌های رسانا در شکل 1 نشان داده شده است. نانوکامپوزیت‌ها با کسر حجمی بسیار کم از نانولوله‌های کربنی، فاصله بین نانولوله‌ها زیاد است و احتمال رانش و تونل

⁶ Homogeneous structure⁷ Aggregated structure⁸ Segregated structure⁹ Tunneling distance¹ Conductive polymer nanocomposite² Stretchable electronic device³ Percolation threshold⁴ Aspect ratio⁵ Carbon black

می‌توان برای توصیف رسانایی در نانوکامپوزیت‌های با توزیع ناهمگن با ساختار تجمع شده و ساختار جدا شده استفاده کرد [20] اما در این مقاله نانوکامپوزیت با ساختار توزیع همگن در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل 2(a-الف) دیده می‌شود، نانولوله‌های کربنی به شکل استوانه با ارتفاع L و قطر d در نظر گرفته شده و فاز میانی با ضخامت t آن را پوشانده است. نسبت اندازه، نسبت طول به قطر، پرکننده‌های مجتمع استوانه‌ای شکل به صورت $M = \frac{L+2t}{d+2t}$ تعریف می‌شود.

(الف-ا)



(ب-ب)

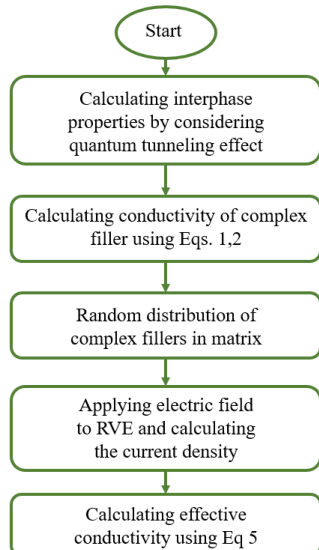


Fig. 2 (top) representative volume element (RVE) of a polymer nanocomposite containing carbon nanotubes, (bottom) composite filler containing a cylindrical carbon nanotube of diameter d and length L covered with an interfacial layer of thickness t . (b) Flow chart of the procedure for calculation of effective conductivity of nanocomposites.

شکل 2 (الف) (بالا) عنصر حجم نماینده (RVE) نانوکامپوزیت پلیمر حاوی نانولوله‌های کربنی، (پایین) پرکننده مجتمع حاوی نانولوله کربنی استوانه‌ای شکل با قطر d و طول L که با فاز میانی با ضخامت t پوشانده شده است. (ب) فلوچارت روند محاسبه رسانایی معادل نانوکامپوزیت

زنی الکترون‌ها بین نانولوله‌های کربنی بسیار کم است، در نتیجه نانوکامپوزیت رفتار عایق گونه دارد. با افزایش کسر حجمی نانولوله‌های کربنی در داخل ماتریس، احتمال اتصال نانولوله‌ها و در نتیجه رسانش و تونل‌زنی الکترون‌ها افزایش می‌یابد. در بازه مشخصی از کسر حجمی نانولوله‌های کربنی، رسانایی نانوکامپوزیت به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد که ناحیه پرکولاسیون نامیده می‌شود و در شکل 1 دیده می‌شود. کسر حجمی که به ازای آن بیشترین تغییر در رسانایی نانوکامپوزیت رخ می‌دهد آغاز پرکولاسیون نامیده می‌شود. در کسر حجمی‌های بالاتر از آغاز پرکولاسیون، رسانایی نانوکامپوزیت به صورت مجانبی افزایش می‌یابد و به یک مقدار نهایی نزدیک می‌شود که ناحیه فلزی یا رسانا نامیده می‌شود. ناحیه عایق، ناحیه پرکولاسیون و ناحیه فلزی در شکل 1 دیده می‌شوند. با افزایش کسر حجمی نانولوله‌ها در داخل ماتریس که به صورت شماتیک در ناحیه‌های مختلف شکل 1 دیده می‌شود احتمال تشکیل شبکه رسانش در ماتریس افزایش می‌یابد و در نتیجه رسانایی نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد [16].

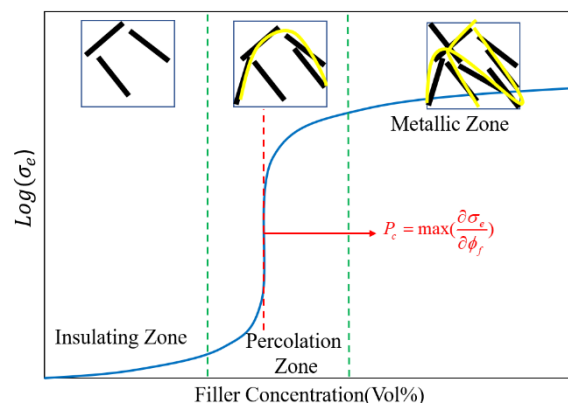


Fig. 1 Conductivity of nanocomposite versus volume fraction of conductive fillers. Insulating, percolation and metallic regions are shown. The conduction network formed by the fillers in each of these areas are specified.

شکل 1 رسانایی نانوکامپوزیت بر حسب کسر حجمی پرکننده‌های رسانا. ناحیه‌های عایق، پرکولاسیون و فلزی نشان داده شده‌اند. شبکه رسانش تشکیل شده توسط پرکننده‌ها در هر یک از این ناحیه‌ها مشخص شده‌اند.

در این بخش، مبانی تئوری یک مدل میکرومکانیکی توسعه یافته ارائه می‌شود تا با استفاده از آن رفتارهای رسانایی و پرکولاسیون نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی، که در شکل 1 دیده می‌شود، را توضیح داد. با استفاده از این رهیافت رسانایی الکتریکی و پرکولاسیون نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانو صفحه‌های گرافن [18] و ویژگی‌های الاستیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانو صفحه‌های خاک رس بررسی شده‌است [19]. روند کلی حل مسئله در شکل 2 نشان داده شده است. وقتی نانولوله‌های کربنی در داخل ماتریس پلیمر توزیع می‌شوند، فاز میانی سطح بیرونی پرکننده‌ها را پوشش می‌دهد. فاز میانی ویژگی‌های فیزیکی مابین ویژگی‌های فیزیکی نانولوله کربنی و ماتریس پلیمر دارد. نانولوله کربنی با فاز میانی به عنوان پرکننده مجتمع¹ شناخته می‌شود که در شکل 2(a-الف) دیده می‌شود. در شکل 2(a-الف)، عنصر حجم نماینده² (RVE) دیده می‌شود که پرکننده‌های مجتمع در داخل این حجم در مکان‌های تصادفی و با جهت‌گیری تصادفی توزیع شده‌اند. از این مدل

² Representative volume element

¹ Complex filler

$$\vec{E}_{in,m} = \sum_{k=x,y,z} \frac{1}{1+B_{m,k}(\sigma_{m,k}-\sigma_{e,k})/\sigma_{e,k}} \vec{E}_0 \quad (7)$$

که $B_{m,k}$ و $B_{com,k}$ به ترتیب ضریب واقطبش نانولوله‌های مجتمع و ضریب واقطبش ذره‌های پلیمر در راستای k ($k = x, y, z$) هستند که به شکل هندسی نانولوله‌های مجتمع و ذره‌های پلیمر وابسته هستند. با توجه به اینکه رسانایی نانولوله‌های مجتمع در راستاهای مختلف با یکدیگر تفاوت دارد، چگالی جریان الکتریکی در داخل نانولوله‌های کربنی مجتمع در راستاهای k به صورت زیر هستند:

$$J_{in,com,k} = \sigma_{com}^k E_{in,com,k} \quad (8)$$

اما رسانایی ذره‌های پلیمر در همه راستاها با یکدیگر برابر هستند. بنابراین چگالی جریان در داخل ذرات پلیمر به صورت زیر است:

$$J_{in,m} = \sigma_m E_{in,m} \quad (9)$$

با قرار دادن رابطه‌های (6) تا (9) در رابطه (5)، معادله رسانایی الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت‌های نانولوله کربنی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\sum_{k=x,y,z} (1 - \frac{\phi_f}{\alpha}) \frac{\sigma_{e,k} - \sigma_m}{\sigma_{e,k} + B_{m,k}(\sigma_m - \sigma_{e,k})} + \sum_{k=x,y,z} \frac{\phi_f}{\alpha} \frac{\sigma_{e,k} - \sigma_{com}^k}{\sigma_{e,k} + B_{com,k}(\sigma_{com}^k - \sigma_{e,k})} = 0 \quad (10)$$

که ϕ_f کسر حجمی نانولوله‌های کربنی لخت داخل ماتریس است و $\alpha = \frac{\pi(\frac{d}{2})^2 L}{\pi(\frac{d+2t}{2})^2 (L+2t)}$ نسبت حجم نانولوله کربنی لخت به حجم نانولوله کربنی مجتمع است. بنابراین، $\frac{\phi_f}{\alpha}$ کسر حجمی نانولوله‌های کربنی مجتمع در ماتریس است.

بر اساس نظریه میدان میانگین، با توجه به توزیع تصادفی مولکول‌های پلیمر در جهات و زوایای مختلف که در واقع ماتریس را تشکیل داده‌اند، آن‌ها به صورت ذره‌های کروی شکل معادل در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، ضرایب واقطبش برای ذره‌های پلیمر در راستاهای مختلف k ($k = x, y, z$) با یکدیگر برابر هستند:

$$B_{m,k} = 1/3 \quad (11)$$

با توجه به اینکه نانولوله‌های کربنی به صورت استوانه‌های بلند در نظر گرفته شده‌اند، ضرایب واقطبش برای نانولوله‌های کربنی به صورت زیر هستند:

$$B_{com,x} = B_{com,y} = \frac{1-B_{com,z}}{2} \quad (12)$$

با جایگذاری رابطه‌های (11) و (12) در رابطه (10)، عبارت زیر برای معادله رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت به دست می‌آید:

$$3 \left(1 - \frac{\phi_f}{\alpha} \right) \frac{\sigma_e - \sigma_m}{2\sigma_e + \sigma_m} + \frac{\phi_f}{3\alpha} \left[\frac{\sigma_e - \sigma_{com}^z}{\sigma_e + B_{com}^z(\sigma_{com}^z - \sigma_e)} + 4 \frac{\sigma_e - \sigma_{com}^x}{2\sigma_e + (1 - B_{com}^z)(\sigma_{com}^x - \sigma_e)} \right] \quad (13)$$

با توجه به اینکه نسبت اندازه نانولوله‌های کربنی بسیار بزرگ است، $M = \frac{L+2t}{d+2t} \gg 1$ ضریب واقطبش در راستای محور استوانه به صورت زیر نوشته می‌شود:

برای به دست آوردن رسانایی الکتریکی عنصر حجم نماینده این نانوکامپوزیت در شکل (الف-2)، ابتدا رسانایی الکتریکی یک پرکننده مجتمع به دست می‌آید. دستگاه مختصات موضعی را برای پرکننده مجتمع در پایین شکل 2 به صورتی در نظر می‌گیریم که محور z در راستای طول استوانه و محورهای x و y در راستای عمود بر طول استوانه باشند. بنابراین رسانایی پرکننده مجتمع باید در راستاهای x و y و z به دست آید. با توجه به مقطع دایروی استوانه و ضخامت یکسان لایه بین‌فازی، رسانایی پرکننده مجتمع در راستاهای x و y با یکدیگر برابر هستند [21]. بنابراین، دو رسانایی در امتداد محور استوانه و در راستای عمود بر محور استوانه به نام‌های رسانایی طولی، σ_{com}^z ، در راستای محور z و رسانایی عرضی، σ_{com}^x ، در راستای محورهای x و y برای پرکننده مجتمع در نظر گرفته می‌شود. پرکننده مجتمع در راستای محور z شامل 4 قسمت است. این قسمت‌ها شامل الف-استوانه نانولوله کربنی لخت با قطر d و طول L در مرکز، ب-پوسته جانبی استوانه‌ای به قطر داخلی d ، قطر خارجی $d + 2t$ و طول L ، ج و د-پوسته‌های به شکل استوانه کوتاه در دو انتهای نانولوله با قطر $d + 2t$ و ضخامت t هستند. با استفاده از قاعده مقاومت‌های موازی و قاعده مقاومت‌های متوالی، رسانایی معادل پرکننده مجتمع در راستای طولی یا محور z به صورت زیر به دست می‌آید [22]:

$$\sigma_{com}^z = \frac{\sigma_{int}(L+2t)[\sigma_f d^2 + \sigma_{int}[(d+2t)^2 - d^2]]}{\sigma_{int}L(d+2t)^2 + 2t[\sigma_f d^2 + \sigma_{int}[(d+2t)^2 - d^2]]} \quad (1)$$

رسانایی عرضی پرکننده مجتمع در راستای x (y) از حل معادله لاپلاس برای پرکننده مجتمع [16] به صورت زیر به دست می‌آید [23]:

$$\sigma_{com}^x = \frac{\sigma_{int}}{L+2t} \left[L \frac{2\sigma_f d^2 + (\sigma_f + \sigma_{int})[(d+2t)^2 - d^2]}{2\sigma_{int}d^2 + (\sigma_f + \sigma_{int})[(d+2t)^2 - d^2]} + 2t \right] \quad (2)$$

برای به دست آوردن رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت فرض می‌کنیم که نانولوله‌های کربنی مجتمع به صورت تصادفی در ماتریس توزیع شده‌اند. میدان الکتریکی و جریان الکتریکی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

با توجه به اینکه نانولوله‌های کربنی مجتمع در مکان‌های کاتوره‌ای و با جهت‌گیری کاتوره‌ای در داخل ماتریس توزیع شده‌اند، رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت در جهت‌های x ، y و z با یکدیگر برابر هستند. بنابراین، با استفاده از نظریه قطبش میانگین، رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربنی (σ_e) با میانگین‌گیری بر روی عنصر حجم نماینده به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\langle \vec{J} \rangle = \sigma_e \langle \vec{E} \rangle \quad (5)$$

وقتی یک میدان الکتریکی خارجی ($\vec{E}_0$) به نانوکامپوزیت اعمال می‌شود، در داخل نانولوله‌های مجتمع و ذره‌های پلیمر میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی ایجاد می‌گردد. با استفاده از توزیع این میدان‌ها و چگالی جریان الکتریکی رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت به دست می‌آید. میدان الکتریکی داخل نانولوله‌های مجتمع و ذره‌های پلیمر که بر روی همه جهت‌ها میانگین‌گیری شده به صورت زیر به دست می‌آیند [24]:

$$\vec{E}_{in,com} = \sum_{k=x,y,z} \frac{1}{1+B_{com,k}(\sigma_{com,k}-\sigma_{e,k})/\sigma_{e,k}} \vec{E}_0 \quad (6)$$

3- ارائه نتایج و بحث

در این قسمت، به منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی و فیزیکی نانولوله‌های کربنی و ماتریس بر روی رفتار الکتریکی نانوکامپوزیت، منحنی نیمه‌لگاریتمی رسانایی کامپوزیت بر حسب درصد حجمی پرکننده مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. از آنجا که باید پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گیرد، در هر مرحله یک پارامتر را تغییر داده و بقیه را طبق جدول 1 ثابت در نظر می‌گیریم. این پارامترها بر اساس مقادیر معمول گزارش شده در مقالات مختلف تعیین شده‌است.

جدول 1 پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی

Table 1 Parameters used in modeling

$\sigma_m(\frac{S}{m})$	$\sigma_f(\frac{S}{m})$	$d(nm)$	$\lambda(e)$	M	$t(nm)$
10^{-12}	10^6	10	1	100	1

در ابتدا به بررسی اثرات پارامترهای کوانتومی λ و d_c بر روی شکل‌گیری شبکه رسانایی در نانوکامپوزیت‌های پلیمری رسانا در شکل 4 پرداخته شده‌است. رسانایی نانوکامپوزیت بر حسب درصد پرکننده به ازای λ های مختلف در شکل 4(الف-a) رسم شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش λ باعث کاهش رسانایی در ناحیه فلزی می‌شود. دلیل این مسئله این است که با توجه به قسمت تئوری (شکل 3)، افزایش λ به معنی افزایش انرژی لازم برای تونل‌زنی می‌باشد. در واقع با افزایش λ الکترون‌ها به انرژی بیشتری برای پرش بین ذرات پرکننده نیاز دارند و این مسئله باعث کاهش رسانایی ناحیه بین‌فازی می‌شود. در نتیجه، با کاهش رسانایی ناحیه بین‌فازی، رسانایی نهایی کامپوزیت معادل هم کاهش پیدا می‌کند. نکته دیگر اینکه، λ اثری بر روی آستانه پرکولاسیون (شکل 1) ندارد. به بیان دیگر با توجه به نواحی شرح داده شده در شکل 1، تغییرات λ باعث جابجایی ناحیه آستانه پرکولاسیون و در نتیجه درصد پرکولاسیون نشده‌است. با توجه به موارد فوق می‌توانیم نتیجه بگیریم که تغییرات λ باعث تغییر سطح رسانایی فقط در ناحیه فلزی شده و در نواحی پرکولاسیون و عایق اثر محسوسی ندارد.

در شکل 4(ب-b)، رسانایی نانوکامپوزیت بر حسب درصد پرکننده به ازای d_c های مختلف رسم شده‌است. افزایش d_c به معنی افزایش فاصله تونل‌زنی می‌باشد که باعث می‌شود الکترون‌ها به راحتی از بین ذرات منتقل نشوند. بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رود، افزایش d_c باعث کاهش رسانایی نانوکامپوزیت در قسمت فلزی می‌شود. البته اگر این فاصله زیاد شود، باعث کاهش بسیار زیاد رسانایی می‌شود که ممکن است حتی در ناحیه فلزی هم کامپوزیت رسانایی کافی را نداشته باشد. اثر d_c در قسمت‌های پرکولیشن و عایق شبیه تغییرات λ می‌باشد و عملاً اثر قابل محسوسی بر این نواحی و در نتیجه آستانه پرکولاسیون ندارد. نتایج مشابهی از اثرات پارامترهای کوانتومی بر روی کامپوزیت‌های رسانا با پرکننده‌های نانو صفحه‌های گرافن تخت [18]، نانو صفحه‌های گرافن فیلت شده [16] و نانوذره‌های کروی کربن بلک [21] گزارش شده‌است که نتایج مقاله حاضر را تأیید می‌کند. در مقالات مختلفی به اثر بسیار مهم هندسه ذرات و ناحیه بین‌فازی در رسانایی و آستانه پرکولاسیون کامپوزیت‌های رسانا اشاره شده‌است. این اثرات در شکل 5 مورد بررسی قرار گرفته‌است. در شکل 5(الف-a) تغییرات رسانایی بر حسب افزایش پرکننده به ازای قطرهای 1-20 nm نانولوله کربنی رسم شده‌است.

$$B_{com}^z = 1 - \frac{M}{(M^2-1)^{\frac{3}{2}}} [M(M^2-1)^{\frac{1}{2}} - \text{ArcCosh } M]. \quad (14)$$

با استفاده از رابطه (13) رسانایی نانوکامپوزیت را می‌توانیم محاسبه کنیم. برای مدل‌سازی فاز میانی به صورت زیر عمل می‌کنیم. در ساز و کار تونل‌زنی کوانتومی الکترونی، الکترون‌ها می‌توانند بین نانولوله‌های مختلف از منطقه بین فازی تونل بزنند و باعث رسانش تونل‌زنی و در نتیجه افزایش رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت شوند [18]. وقتی دو نانولوله کربنی در فاصله d_c از یکدیگر قرار دارند الکترون‌ها می‌توانند از سطح مقطع تماس S بین نانولوله‌ها تونل زنی کنند. در واقع این تونل زنی در ناحیه لایه‌های بین فازی که پوشش نانولوله‌های کربنی هستند رخ می‌دهد. بنابراین، مقاومت الکتریکی ناشی از تونل زنی بین این دو نانولوله کربنی به صورت زیر نوشته می‌شود [25]:

$$R_{int} = \frac{d_c \hbar^2}{Se^2(2m\lambda)^{1/2}} \exp\left(\frac{4\pi d_c}{\hbar}(2m\lambda)^{1/2}\right) \quad (15)$$

که m و e به ترتیب جرم و بار الکتریکی الکترون و $\hbar$ ثابت پلانک است. λ و d_c به ترتیب انرژی سد تونل‌زنی و فاصله تونل‌زنی هستند. در ادامه رابطه (15) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R_{int} = \frac{d_c}{\sigma_{int} S} \quad (16)$$

بنابراین، با استفاده از رابطه‌های (15) و (16) رسانایی ناحیه بین فازی که ناشی از تونل زنی الکترون‌ها می‌باشد، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{int} = \frac{e^2(2m\lambda)^{1/2}}{\hbar^2} \exp\left(-\frac{4\pi d_c}{\hbar}(2m\lambda)^{1/2}\right) \quad (17)$$

در این مدل مقدار فاصله تونل‌زنی به صورت $d_c = 2t$ فرض شده است. در شکل 3، رسانایی لایه بین فازی بر حسب انرژی سد تونل زنی به ازای مقادیر مختلف فاصله تونل زنی رسم شده‌است. رسانایی لایه بین فازی به ازای مقادیر کم انرژی سد تونل زنی مقادیر بالاتری دارد و با افزایش انرژی سد تونل زنی مقدار آن کاهش می‌یابد. همچنین در شکل 3 دیده می‌شود که فاصله تونل زنی هم تأثیر بزرگی بر روی رسانایی لایه بین‌فازی دارد در مقادیر کم فاصله تونل‌زنی، رسانندگی مقادیر زیادی دارد اما با افزایش فاصله تونل‌زنی، رسانایی کاهش می‌یابد. فلوجارت حل مسئله در (ب-b) 2 نشان داده شده است.

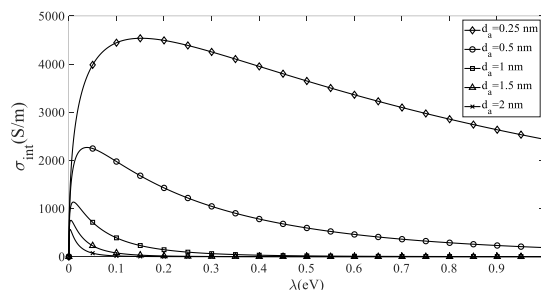


Fig. 3 (top) representative volume element (RVE) of a polymer nanocomposite containing carbon nanotubes, (bottom) composite filler containing a cylindrical carbon nanotube of diameter d and length L covered with an interfacial layer of thickness t .

شکل 3 رسانایی لایه بین‌فازی بر حسب تغییرات انرژی سد تونل‌زنی (λ) به ازای مقادیر مختلف فاصله تونل‌زنی (d_c).

خواص رسانایی کلی نانوکامپوزیت را افزایش دهند. نتایج مشابهی در منابع گزارش شده است که افزایش نسبت طول در ذرات رسانا با هندسه‌های مختلف صفحه‌ای و میله‌ای باعث بهبود فوق‌العاده خواص رسانایی کامپوزیت‌های پلیمری رسانا شده‌است [10].

در شکل 5 (ج-ب)، رسانایی نانوکامپوزیت بر حسب درصد پرکننده به ازای ضخامت ناحیه بین فازی مختلف رسم شده‌است. همان‌طور که از شکل 5 (ج-ب) مشهود می‌باشد، افزایش ضخامت ناحیه بین فازی از 1 nm تا 10 nm باعث کاهش آستانه پرکولاسیون از حدود 0.0045 تا 0.0005 و افزایش رسانایی در نواحی عایق و پرکولاسیون شده‌است. دلیل این مسئله می‌تواند افزایش حجم ناحیه بین فازی به دلیل افزایش ضخامت این ناحیه باشد. بنابراین از آنجا که رسانایی ناحیه بین فازی از ماتریس بیشتر می‌باشد، افزایش این حجم به معنی افزایش کلی رسانایی می‌باشد. نکته دیگر اینکه با توجه به عدم تغییرات رسانایی در ناحیه فلزی می‌توان نتیجه گرفته که ضخامت ناحیه بین فازی اثر محسوسی در رسانایی کامپوزیت بعد از رسانا شدن ندارد.

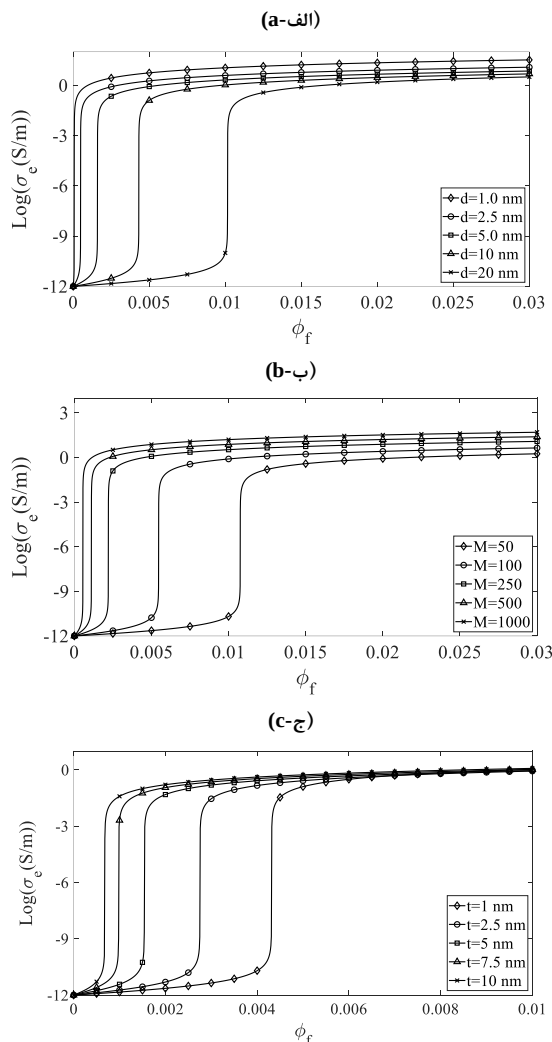


Fig. 5 Effective electrical conductivity of nanocomposite in terms of volume fraction of carbon nanotubes for different values of (a) nanofiller diameter (d), (b) aspect ratio (M), and (c) interphase layer thickness (t).

شکل 5 رسانایی الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت بر حسب کسر حجمی نانولوله‌های کربنی به ازای مقادیر مختلف (الف) قطر نانوذره‌ها (d), (ب) نسبت اندازه (M) و (ج) ضخامت لایه بین فازی (t).

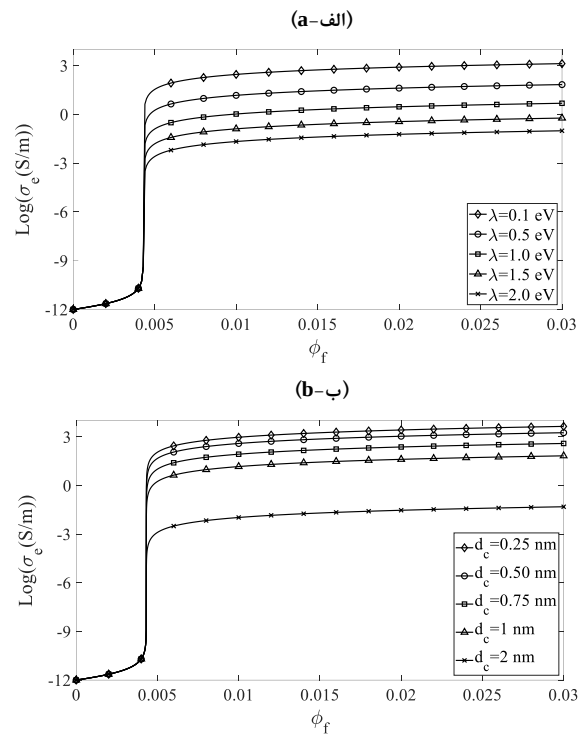


Fig. 4 (a) Effective electrical conductivity of nanocomposite in terms of volume fraction of carbon nanotubes for different values of tunneling barrier energy (λ) and (b) Effective electrical conductivity of nanocomposite in terms of volume fraction of carbon nanotubes for different values of tunneling distance (d_c).

شکل 4 (الف) رسانایی الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت بر حسب کسر حجمی نانولوله‌های کربنی به ازای مقادیر مختلف انرژی سد تونل زنی (λ) و (ب) رسانایی الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت بر حسب کسر حجمی نانولوله‌های کربنی به ازای مقادیر مختلف فاصله تونل زنی (d_c).

همان‌طور که در شکل 5 (الف-ا) مشاهده می‌شود، کاهش قطر نانولوله دو اثر بسیار مهم بر روی خواص الکتریکی نانوکامپوزیت رسانا گذاشته‌است. اولین اثر افزایش قابل توجه رسانایی نانوکامپوزیت در هر سه ناحیه عایق، پرکولاسیون و فلزی می‌باشد. اثر دوم کاهش بسیار زیاد آستانه پرکولاسیون به دلیل کاهش قطر نانولوله می‌باشد که از نظر طراحی اهمیت بسیار زیادی دارد. دلیل این مسئله می‌تواند افزایش تعداد نانولوله‌ها (پرکننده‌های میله‌ای شکل) با کاهش قطر آن‌ها در یک درصد پرکننده ثابت باشد که باعث افزایش احتمال برخورد ذرات به یکدیگر و در نتیجه تشکیل شبکه سه بعدی رسانایی در داخل ماتریس باشد که در منابع نیز به آن اشاره شده است [10]. در شکل 5 (الف-ا) دیده می‌شود که با کاهش قطر از 20 nm به 1 nm، آستانه رسانایی از 0.010 به 7×10^{-5} کاهش پیدا کرده است. پارامتر مؤثر دیگر هندسی طول نانولوله می‌باشد که برای این منظور، قطر نانولوله $d = 10$ nm در نظر گرفته و نسبت طول از 50 تا 1000 افزایش داده و نتایج به صورت تغییرات رسانایی در درصدهای مختلف پرکننده در شکل 5 (ب-ب) نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش طول اثری مشابه کاهش قطر (شکل 5 (الف-ا)) داشته است. در واقع با افزایش نسبت طول نانولوله از 50 به 1000، رسانایی کامپوزیت بیش از 200 برابر که مقدار چشمگیری می‌باشد، افزایش یافته است و همزمان آستانه پرکولاسیون را از 0.01 به 6×10^{-4} کاهش داده است. در واقع با افزایش طول پرکننده‌ها، احتمال برخورد آن‌ها افزایش یافته و در نتیجه الکترون‌ها راحت‌تر می‌توانند بین ذرات رسانا حرکت کرده و در نتیجه

به منظور بررسی توانایی و صحت‌سنجی مدل ارائه شده برای پیش‌بینی رفتار رسانایی کامپوزیت‌های پلیمری، از نتایج تجربی چهار نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربنی با ماتریس‌های پلیمری PVDF [26]، TPU [27]، PC, ABS [28] و UHMWPE [29] استفاده شده‌است. به منظور برازش مدل بر روی نتایج تجربی، پارامترهای فیزیکی از قبیل رسانایی ماتریس، رسانایی نانولوله‌های کربنی، قطر و طول نانولوله‌های کربنی از منابع مربوطه استخراج شده و فاصله تونل‌زنی و ضخامت لایه بین‌فازی به عنوان پارامترهای متغیر استفاده شده‌است. ضرایب مورد استفاده در مدل حاضر و داده‌های اندازه‌گیری شده برای رسانایی الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت‌های در جدول 2 نشان داده شده و پیش‌بینی مدل از نتایج تجربی در شکل 7 دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، مدل حاضر به خوبی رفتار کامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی به نام‌های CNT/PVDF [26]، CNT/TPU [27]، CNT/PC, ABS [28] و CNT/UHMWPE [29] را در هر سه ناحیه عایق، ناحیه پرکولاسیون و ناحیه فلزی پیش‌بینی کرده‌است. مدل پیشنهادی رفتار رسانایی نانوکامپوزیت‌ها در ناحیه عایق و گذار پرکولاسیون را به خوبی بازتولید کرده‌است و شکستگی ندارد. در جدول 2 رسانایی ماتریس‌های پلیمر PVDF [26]، TPU [27]، PC, ABS [28] و UHMWPE [29] برابر 10^{-13} S/M و رسانایی نانولوله‌های کربنی برابر 10^6 S/M است که اختلاف آن‌ها برابر 19 مرتبه بزرگی است و این اختلاف زیاد بین مقادیر پارامترها منجر به ایجاد خطاهای بزرگ در انجام محاسبات می‌شود. علی‌رغم این اختلاف زیاد در مقادیر پارامترها، با استفاده از این مدل فیزیکی و روش‌های محاسبات عددی، رفتار رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت در قسمت عایق و در محدوده پرکولاسیون به صورت S شکل با منحنی پیوسته بازتولید شد. همچنین ضخامت ناحیه بین‌فازی و فاصله تونل‌زنی هرکدام به ترتیب در رنج 3-5 nm و 0.9-1.3 nm بدست آمده‌است که با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد.

4- نتیجه‌گیری

مدل ارائه شده به خوبی رفتار رسانایی نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانولوله کربنی را پیش‌بینی کرده‌است. این مدل نشان می‌دهد که با افزایش طول یا کاهش قطر نانولوله، خواص رسانایی کامپوزیت بهبود می‌یابد. همچنین تغییر رسانایی ماتریس و پرکننده به ترتیب فقط ناحیه عایق و فلزی را تغییر می‌دهد و اثری بر روی سایر قسمت‌ها ندارد. در واقع رسانایی پرکننده و ماتریس آستانه رسانایی کامپوزیت را تغییر نمی‌دهد و این آستانه تنها به هندسه ذرات وابسته می‌باشد. کاهش قطر نانولوله‌های کربنی از 20 nm به 1 nm یا متناسب با آن افزایش نسبت اندازه نانولوله‌های کربنی از 50 تا 1000 منجر به کاهش آغاز پرکولاسیون نانوکامپوزیت از 0.01 به حدود 1×10^{-5} می‌شود. نتایج این مدل به خوبی رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی با ماتریس‌های مختلف را پیش‌بینی می‌کند. نتایج مدل، آغاز پرکولاسیون تیز را برای نمونه‌های آزمایشگاهی به خوبی پیش‌بینی می‌کند و علاوه بر آن رسانایی الکتریکی مؤثر را در کسرهای حجمی بزرگ رفتار فلزی دارند را بازتولید می‌کند. مهم‌ترین دست‌آورد این مقاله این است که رفتار رسانایی مؤثر نانوکامپوزیت در ناحیه عایق به صورت منحنی پیوسته و نرم بازتولید می‌شود و مقادیر رسانایی بسیار کم نانوکامپوزیت در ناحیه عایق را پیش‌بینی می‌کند. این مدل شامل تعداد زیادی از پارامترهای فیزیکی و هندسی تأثیرگذار است و از این مدل می‌توان برای طراحی نانوکامپوزیت‌های مورد نظر با ویژگی‌های مشخص استفاده کرد.

در شکل 6 اثرات رسانایی پرکننده و ماتریس بر روی خواص الکتریکی کامپوزیت‌های رسانا مورد بررسی قرار گرفته‌است. هر چند اکثر پلیمرها که به عنوان ماتریس استفاده می‌شوند، عایق محسوب می‌شوند اما رسانایی‌های آن‌ها با هم متفاوت است. برای بررسی این مسئله رسانایی زمینه را از 10^{-6} تا 10^{-14} S/M مقدار تغییر داده و رسانایی کامپوزیت بر حسب درصد حجمی پرکننده به ازای ماتریس‌های مختلف در شکل 6 (ج-ب) رسم شده‌است. همان‌طور که کاملاً مشهود می‌باشد، افزایش رسانایی ماتریس فقط در ناحیه عایق باعث افزایش رسانایی کامپوزیت شده است و تأثیر محسوس در نواحی پرکولاسیون و فلزی ندارد. در واقع تغییر نوع پلیمر ماتریس، در درصد‌های بالاتر از آستانه پرکولاسیون، اثری بر روی رسانایی و آستانه پرکولاسیون ندارد. نکته دوم اینکه با افزایش رسانایی ماتریس، سطح رسانایی حالت عایق و فلزی به یکدیگر نزدیک شده‌است که از نظر فیزیکی قابل انتظار می‌باشد.

به منظور بررسی اثر رسانایی نانولوله بر روی خواص الکتریکی کامپوزیت، رسانایی پرکننده از 10^5 S/M تا 10^6 S/M تغییر داده شده‌است که در شکل 6 (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش رسانایی پرکننده در مقادیر پائین باعث افزایش رسانایی در ناحیه فلزی کامپوزیت شده است که البته برای مقادیر بالاتر رسانایی پرکننده به یک حالت اشباع رسیده (در بالاتر از 10^3) و تأثیر محسوس دیده نمی‌شود. نکته دوم اینکه تغییرات رسانایی پرکننده، اثر قابل مشاهده‌ای در نواحی عایق و پرکولاسیون ندارد و می‌توان نتیجه گرفت که آستانه پرکولاسیون مستقل از جنس پرکننده و ماتریس می‌باشد.

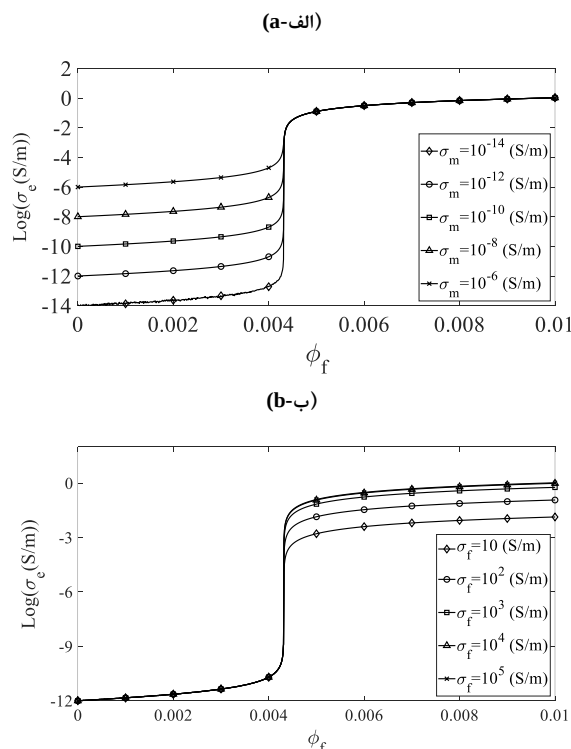


Fig. 6 Effective electrical conductivity of nanocomposite in terms of volume fraction of carbon nanotubes for different values of (a) nanofiller diameter (σ_m), and (b) aspect ratio (σ_f).

شکل 6 رسانایی الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت بر حسب کسر حجمی نانولوله‌های کربنی به ازای مقادیر مختلف (الف) رسانایی ماتریس (σ_m) و (ب) رسانایی نانولوله‌های کربنی (σ_f).

"Piezoresistive performance characterization of strain sensitive multi-walled carbon nanotube-epoxy nanocomposites," *Sensors Actuators, A Phys.*, Vol. 254, No. 2017, pp. 61–68, 2017.

- [9] Dietrich Stauffer, A.A., Dietrich Stauffer, Ammon Aharony - Introduction to percolation theory-CRC Press (1994).pdf, pp. 192.
- [10]Feng, C. and Jiang, L., "Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube (CNT)-polymer nanocomposites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 47, No. 1, pp. 143–149, 2013.
- [11]Tabatabaee, M., Taheri-Behrooz, F., Razavi, S.M., and Liaghat, G.H., "Electrical conductivity enhancement of Carbon/Epoxy composites using nanoparticles," *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 5, No. 4, pp. 605–614, 2019.
- [12]Mora, A., Han, F., and Lubineau, G., "Computational modeling of electrically conductive networks formed by graphene nanoplatelet-carbon nanotube hybrid particles," *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 26, No. 3, 2018.
- [13]Fang, C., Zhang, J., Chen, X., and Weng, G.J., "A Monte Carlo model with equipotential approximation and tunneling resistance for the electrical conductivity of carbon nanotube polymer composites," *Carbon N. Y.*, Vol. 146, pp. 125–138, 2019.
- [14]Lu, X., Yvonnet, J., Detrez, F., and Bai, J., "Multiscale modeling of nonlinear electric conductivity in graphene-reinforced nanocomposites taking into account tunnelling effect," *J. Comput. Phys.*, Vol. 337, pp. 116–131, 2017.
- [15]Taherian, R., "Experimental and analytical model for the electrical conductivity of polymer-based nanocomposites," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 123, pp. 17–31, 2016.
- [16]Mazaheri, M., Payandehpeyman, J., and Khamsehchi, M., "A developed theoretical model for effective electrical conductivity and percolation behavior of polymer-graphene nanocomposites with various exfoliated filleted nanoplatelets," *Carbon N. Y.*, Vol. 169, pp. 264–275, 2020.
- [17]García-Macías, E., D'Alessandro, A., Castro-Triguero, R., Pérez-Mira, D., and Ubertini, F., "Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites," *Compos. Part B Eng.*, Vol. 108, pp. 451–469, 2017.
- [18]Payandehpeyman, J., Mazaheri, M., and Khamsehchi, M., "Prediction of electrical conductivity of polymer-graphene nanocomposites by developing an analytical model considering interphase, tunneling and geometry effects," *Compos. Commun.*, Vol. 21, No. March, pp. 100364, 2020.
- [19]Payandehpeyman, J. and Mazaheri, M., "Parametric investigation of effective elastic properties of exfoliated polymer/clay nanocomposites using a developed mean-field model," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, Vol. 0, No. 0, pp. 1–12, 2021.
- [20]Farhadpour, M., Jahanaray, B., Pircheraghi, G., and Bagheri, R., "Simultaneous use of physical and chemical dispersants for electrical conductivity enhancement in polyamide 6/carbon nanotube/conductive carbon black hybrid nanocomposites," *Polym. Technol. Mater.*, Vol. 00, No. 00, pp. 1–13, 2021.
- [21]Mazaheri, M., Payandehpeyman, J., and Jamasb, S., "Modeling of Effective Electrical Conductivity and Percolation Behavior in Conductive-Polymer Nanocomposites Reinforced with Spherical Carbon Black," *Appl. Compos. Mater.*, No. 0123456789, 2021.
- [22]Yan, K.Y., Xue, Q.Z., Zheng, Q.B., and Hao, L.Z., "The interface effect of the effective electrical conductivity of carbon nanotube composites," *Nanotechnology*, Vol. 18, pp. 6, 2007.
- [23]Xue, Q., "The influence of particle shape and size on electric conductivity of metal-polymer composites," *Eur. Polym. J.*, Vol. 40, No. 2, pp. 323–327, 2004.
- [24]J. Griffiths, D., "Introduction to Electrodynamics David J. Griffiths Fourth Edition," ISBN 9788578110796, 2013.
- [25]Simmons, J.G., "Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film," *J.*

جدول 2 داده‌های تجربی مربوط به پارامترهای سیستم که از مقاله‌ها استخراج شده‌اند. از این داده‌های تجربی برای برازش مدل استفاده شده است.

Table 2 Experimental data related to system parameters that are extracted from articles. These experimental data have been used to fit the model.

نانوکامپوزیت و مرجع	σ_m ($\frac{S}{m}$)	σ_f ($\frac{S}{m}$)	d (nm)	dc (nm)	L (nm)	t (nm)
CNT/PVDF [26]	10^{-13}	10^6	9.5	0.9	1500	3
CNT/TPU [27]	10^{-12}	10^6	9.5	1.1	1500	5
CNT/PC,ABS [28]	2×10^{-12}	10^6	9.5	1.2	1500	3
CNT/UHMWPE [29]	10^{-13}	10^6	30	1.3	90000	3

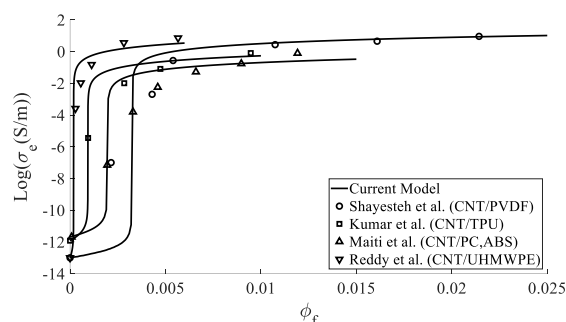


Fig. 7 Modeling results and measured data of effective electrical conductivity of nanocomposites in terms of volume fraction of carbon nanotubes based on laboratory results for CNT/PVDF [26], CNT/TPU [27], CNT/PC, ABS [28], and CNT/UHMWPE [29].

شکل 7 نتایج مدل‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده رسانایی الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت‌ها بر حسب کسر حجمی نانولوله‌های کربنی بر اساس نتایج آزمایشگاهی برای نانوکامپوزیت‌های [26] CNT/PVDF، [27] CNT/TPU، [28] CNT/PC,ABS و [29] CNT/UHMWPE

7- مراجع

- [1] Payandehpeyman, J., Parvini, N., Moradi, K., and Hashemian, N., "Detection of SARS-CoV-2 Using Antibody–Antigen Interactions with Graphene-Based Nanomechanical Resonator Sensors," *ACS Appl. Nano Mater.*, Vol. 4, No. 6, pp. 6189–6200, 2021.
- [2] Payandehpeyman, javad, Majzoobi, G., and Bagheri, R., "Deriving Parameters of Pressure-Dependent Yield Surface for Polymeric Composites Using Kriging-based Optimization Method," *Modares Mech. Eng.*, Vol. Inpress, 2015.
- [3] Malek-mohammadi, H., Majzoobi, G., and Payandehpeyman, J., "Experimental and analytical study of the compression behavior of graphene oxide and nano-clay reinforced polycarbonate nanocomposites at low strain rates," Vol. 6, No. 3, pp. 427–434, 2019.
- [4] Shokrieh, M.M. and Zeinedini, A., "Effect of CNTs debonding on mode I fracture toughness of polymeric nanocomposites," *JMADE*, Vol. 101, pp. 56–65, 2016.
- [5] Zeinedini, A., Shokrieh, M.M., and Ebrahimi, A., "The effect of agglomeration on the fracture toughness of CNTs-reinforced nanocomposites," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, Vol. 94, No. January, pp. 84–94, 2018.
- [6] Wernik, J.M. and Meguid, S.A., "Recent developments in multifunctional nanocomposites using carbon nanotubes," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 63, No. 5, pp. 1–40, 2010.
- [7] Verma, P., Saini, P., Malik, R.S., and Choudhary, V., "Excellent electromagnetic interference shielding and mechanical properties of high loading carbon-nanotubes/polymer composites designed using melt recirculation equipped twin-screw extruder," *Carbon N. Y.*, Vol. 89, pp. 308–317, 2015.
- [8] Sanli, A., Benchirouf, A., Müller, C., and Kanoun, O.,

- Appl. Phys.* , Vol. 34, No. 6, pp. 1793–1803, 1963.
- [26]Shayesteh Zeraati, A. and Sundararaj, U., “Carbon nanotube/ZnO nanowire/polyvinylidene fluoride hybrid nanocomposites for enhanced electromagnetic interference shielding,” *Can. J. Chem. Eng.* , Vol. 98, No. 5, pp. 1036–1046, 2020.
- [27]Kumar, S., Gupta, T.K., and Varadarajan, K.M., “Strong, stretchable and ultrasensitive MWCNT/TPU nanocomposites for piezoresistive strain sensing,” *Compos. Part B Eng.* , Vol. 177, pp. 107285, 2019.
- [28]Maiti, S., Suin, S., Shrivastava, N.K., and Khatua, B.B., “Low percolation threshold in melt-blended PC/MWCNT nanocomposites in the presence of styrene acrylonitrile (SAN) copolymer: Preparation and characterizations,” *Synth. Met.* , Vol. 165, No. 1, pp. 40–50, 2013.
- [29]Reddy, S.K., Kumar, S., Varadarajan, K.M., Marpu, P.R., Gupta, T.K., and Choosri, M., “Strain and damage-sensing performance of biocompatible smart CNT/UHMWPE nanocomposites,” *Mater. Sci. Eng. C* , Vol. 92, No. June, pp. 957–968, 2018.



بررسی سایش و کیفیت سطح در فرزکاری کامپوزیت پایه آلومینیومی 520 تقویت شده با ذرات SiC و Sn

محمود علیپور سوگوابار¹، سیدعلی نیکنام^{2*}، بهنام داودی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

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

* تهران، صندوق پستی 1684613114، saniknam@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:	چکیده
دریافت: 1401/08/15	کامپوزیت‌ها موادی ترکیبی با حداقل دو ماده هستند که یکی به عنوان زمینه و دومی به منظور افزایش خواص مفید به ماده پایه افزوده می‌شود. این مطالعه نیز در مورد یکی از کامپوزیت‌های پرکاربرد تحت عنوان کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیوم به همراه مواد تقویت کننده افزودنی شامل ذرات قلع و سیلیکون کارباید SiC, Sn می‌باشد. از جمله مزایای این کامپوزیت‌ها می‌توان به مواردی مثل سختی و استحکام بالا و همینطور وزن سبک اشاره نمود و همچنین معایب آن پایین بودن قابلیت ماشینکاری و سایش بالا در ابزارهای ماشینکاری می‌باشد. در نتیجه برای بهبود شرایط کنونی این مطالعه با رویکرد ماشینکاری کامپوزیت پایه آلومینیومی 520 و تحلیل آماری اثر پارامترهای برشی بر سایش ابزار و کیفیت سطح بعد از ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته می‌توان اذعان کرد که پارامترهای برشی تعریف شده اثر ممتاز و خوبی بر سایش ابزار داشتند. در اندازه‌گیری میزان سایش ابزارها حین ماشین کاری کامپوزیت ساخته شده به همراه ذرات تقویت کننده SiC, Sn همواره سرعت برشی بیشترین اثر و سرعت پیشروی و روش روانکاری و همچنین میزان عمق برشی کمترین اهمیت را بر سایش ابزار دارند.
پذیرش: 1401/10/13	
کلیدواژگان	
کامپوزیت پایه فلزی، آلومینیوم، توانایی ماشینکاری، کیفیت سطح، سایش ابزار	

Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles

Mahmoud Alipour Sougavabar¹, Seyed Ali Niknam^{2*}, Behnam Davoodi²

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

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

* P.O.B. 1684613114, saniknam@iust.ac.ir

Keywords

Metal matrix composite, Aluminium alloys, Machinability, Surface quality, Tool flank wear

Abstract

Composites are materials with at least two combined materials, one of which is added to the base material to increase its valuable properties. This study is also about one of the widely used composites called aluminum metal matrix composites (Al-MMC) and additional reinforcing materials, including Tin and Silicon carbide (SiC, Sn) particles. These composites have excellent features such as high hardness and strength and are lightweight, while they also pose low machinability. As a result, to improve the current conditions, this study was conducted with the approach of Al520 base composite machining and statistical analysis of the effect of cutting parameters on tool flank wear and surface quality after machining. Based on the investigations, it can be concluded that the defined cutting parameters had an excellent and good effect on tool flank wear. On the other hand, when studying the tool flank wear during the machining of such composites with reinforcing particles of SiC, Sn, the cutting speed always has the most significant effect, and the feed rate and lubrication method, as well as the amount of depth of cut, have the least effects on the flank wear size.

1- مقدمه

قطعات باید به مسائل مهمی از قبیل روش ساخت، دقت ابعادی، حفظ شکل صحیح اولیه در حین کاربرد، خواص مورد نظر و حفظ آن خواص برای مدت معین تحت شرایط محیط کار، امکان تعمیر و نگهداری آسان در هنگام کاربرد، سازگاری ماده با دیگر مواد اجزاء سیستم، بازیابی آسان ماده، مسائل زیست‌محیطی ماده در ارتباط با ساخت و تولید، هزینه تولید و در مواردی میزان وزن و نوع سطح ظاهری آن توجه شود [2]. از دیرباز تمام کشورهای صنعتی

پیشرفت‌های وسیع و سریعی که تا کنون در کلیه زمینه‌های صنعتی رخ داده است، مرهون دستیابی به مواد با کیفیت بالاتر است که در ساخت قطعات ماشین‌آلات و تجهیزات صنعتی به کار می‌روند. عموماً اغلب مهندسين شاغل در واحدهای صنعتی، به ویژه طراحی و ساخت در انتخاب و کاربرد مواد و بررسی و تحلیل شکست قطعات شرکت دارند [1]. عموماً در طراحی و ساخت

Please cite this article using:

Alipour Sougavabar, M., Niknam, S. A., Davoodi, B., "Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1970-1975, 2023.
<https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.1972218.1807>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

دریافته‌اند ابزارهای کاربردی در ماشینکاری کوتاه‌مدت برای کیفیت سطح مؤثر هستند [12]. همچنین پیشنهاد می‌دهند که عمر ابزار کاربردی برای سرعت‌های برش پایین 20 تا 30 متر بر دقیقه و نرخ پیشروی بالا در ماشین تراش برای ماشینکاری قابل‌قبول هستند و در استفاده از ابزار کاربردی در سرعت برش 250 متر بر دقیقه مشاهده شده که عمر آن برای تراشکاری کامپوزیت Al/MMC چهل دقیقه است. تحقیقات انجام شده در مورد انواع مختلف ابزار نشان می‌دهد که ابزارهای کاربردی مقرون به صرفه‌ترین ابزار، برای ماشینکاری کامپوزیت زمینه فلزی هستند [10]. بر اساس بررسی پیشینه پژوهش و بررسی مطالعات انجام یافته، موضوع این مطالعه به اثر پارامترهای برشی بر کیفیت سطح و سایش ابزار در ماشینکاری کامپوزیت پایه آلومینیومی 520 تقویت‌شده با ذرات Sn, SiC می‌باشد. بر اساس این پژوهش می‌توان یک روش به منظور ارتقاء تولید را با توجه به کیفیت مواد اولیه، استحکام و سختی مناسب، وزن سبک و همچنین توانایی ماشینکاری مناسب روی این ماده و عمر بیشتر ابزارهایی که روی این مواد کار براده برداری و تغییر شکل انجام دهند را تعیین نمود [4].

2- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

بر اساس جمع‌آوری اطلاعات و مطالعات انجام یافته پیرامون کامپوزیت پایه آلومینیومی می‌توان اذعان نمود که میزان مطالعات در کامپوزیت‌ها همواره با بررسی افزودن مواد تقویت‌کننده SiC به صورت جامع انجام شده است [11]، اضافه کردن عناصری نظیر Sn به ماده پایه تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. اثر عناصر مختلف ذرات تقویت‌کننده [14، 15] با تفاوت‌های زیادی در میزان نتایج کیفیت سطح و اثر آن بر کیفیت ماشینکاری و همچنین سایش ابزار و تأثیر آن بر عمر ابزار و همچنین میزان نیروها حین فرآیند ماشینکاری با تفاوت‌های زیادی همراه شده و هرگاه میزان عناصر تقویت‌کننده با مواد سخت نظیر SiC و Sn همراه باشد، کیفیت سطح و سایش ابزار و اصطکاک حاصله در حین فرایند برشی و در نتیجه عمر ابزار تحت تأثیر این مواد افزودنی قرار می‌گیرند. اهداف این مطالعه به شرح ذیل است:

- 1- بررسی میزان کیفیت سطح در ماشینکاری مواد کامپوزیتی پایه آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده مختلف نظیر (Sn و SiC)
- 2- بررسی میزان سایش ابزار در ماشینکاری مواد کامپوزیتی پایه آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده مختلف نظیر (Sn و SiC)

3- روش تحقیق

با استفاده از روش ریخته‌گری، دو قطعه کامپوزیتی اشاره شده در جدول شماره 1 ساخته و آماده شدند.

جدول 1 مواد ساخته‌شده کامپوزیتی با درصد عناصر تقویت‌کننده

Table 1 The fabricated composite materials

مواد کامپوزیتی	ماده پایه	ذرات تقویت‌کننده
1	Al 520	10 % SiC
2	Al 520	10 % SiC + 1 % Sn

بعد از اتمام عملیات و ساخت قطعات کامپوزیتی، جهت حصول اطمینان از توزیع درست و همگن ذرات و تولید با کیفیت، یک قسمت از نمونه ریخته شده پولیش شده و با میکروسکوپ الکترونی SEM مطابق شکل 1 مورد بررسی قرار گرفته شد. به‌جز چند نقطه که این ذرات به هم چسبیده شده‌اند، تقریباً

به دنبال موادی با نسبت استحکام به وزن بالا هستند که بتوانند علاوه بر کاهش هزینه مواد اولیه، باعث کاهش انرژی مصرفی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی شوند [2، 3]. با توجه به روحیه تنوع‌طلب انسان و همچنین احساس نیاز به سمت پیشرفت، صنایع نیز دستور کار خود را تنوع تولید و ساخت کالاهای با کیفیت برای جذب هرچه بیشتر مشتری و فروش بیشتر محصولات خود قرار دادند. حال این تنوع تولید می‌تواند در جهت ارتقاء روش‌های تولید، یا ارتقاء سطح کیفیت مواد اولیه و... لحاظ شود [1، 4]. لذا نیاز فوق باعث می‌شود محققین و پژوهشگران عرصه صنعت هر روز به دنبال جستجوی موادی باشند که به اهداف فوق نائل آیند. از این رو لازم است تا با آزمایش‌های متنوع و همچنین تحقیقات در مورد عناصر و افزودنی‌های مقوی و تأثیر آن روی ماده پایه، کامپوزیت‌ها را هرچه بیشتر مورد بررسی قرار داد. این مهم پدید نمی‌آید، مگر با مطالعه و شناخت هرچه بیشتر عناصر و ترکیبات افزودنی و شناخت خواص مواد پایه و افزودنی و آشنایی با روش‌های ساخت مختلف برای تصمیم‌گیری نهایی و استفاده بهتر مواد در صنایع و در نهایت بهبود وضعیت کالاهای تولیدی، و عمر مفید بیشتر محصولات، و صرف هزینه کمتر برای تولید این محصولات در کارخانه‌های صنعتی که در مجموع می‌تواند باعث رفاه، آسایش و امنیت بیشتر یکایک انسان‌های کره خاکی گردد [5، 6].

سالمات که تحقیقات برای دستیابی به مواد جدیدتر با خواص مکانیکی بهتر انجام گرفته و هنوز هم همگام با پیشرفت‌های سریع صنعتی دنبال می‌شود. هدف این تحقیقات [7] غالباً تولید موادی با نسبت مناسب استحکام کششی به چگالی، استحکام حرارتی بالا و خواص ویژه سطح خارجی (مانند مقاومت سایشی بالا) است. در سال‌های اخیر، نسل جدید مواد کامپوزیتی به عنوان ترکیبات کامپوزیت‌های پایه فلزی معرفی شده‌اند. تا به طور همزمان قدرت و سختی بیشتری را ارائه دهند [8]. منافع صنعتی منجر به تحقیقات عمیق در زمینه ماشینکاری کامپوزیت‌های پایه فلزی باشد. با این حال، تقویت فلز پایه با افزودن ذرات سخت به آن باعث افزایش سایش ابزار، کاهش قابلیت ماشینکاری، کاهش کیفیت سطح و افزایش هزینه‌های کلی تولید می‌گردد. بنابراین محققان و دانشمندان این عرصه بر آن شدند تا با روش‌های جدید و ذرات متفاوت افزودنی و نسبت ترکیبات گوناگون مواد کامپوزیتی مرغوب‌تری را تولید کنند که علاوه بر سختی و استحکام بالا قابلیت ماشینکاری را افزایش، سایش ابزار را کاهش و همچنین کیفیت سطح را بهبود بخشند [8، 9].

اکثر تحقیقات در ماشینکاری کامپوزیت زمینه فلزی با استفاده از ابزار کاربردی یا الماس چند کریستالی pcd^1 انجام شده است [3]. همچنین اکثر مطالعات انجام شده در دستگاه تراش صورت گرفته است [6، 7]. بعد از دستگاه تراش، دیگر ماشین‌ابزارهای حائز اهمیت به ترتیب فرز افقی و عملیات سوراخ‌کاری بوده که مورد مطالعه قرار گرفته است [1، 4]. مته‌هایی که در سوراخ‌کاری توصیه می‌شوند (PCD) با الماس پوشش داده شده است. با این حال، بسیاری از مطالعات ادعا می‌کنند که ابزار کاربردی یک جایگزین مناسب تحت شرایط خاص است [10]. در زمانی که سایش ابزار به سرعت شروع می‌شود پارامترهای مختلف برای تعیین شرایط مناسب ابزار مورد بررسی قرار می‌گیرند [10، 11]. این امر ویژه، بر مفید بودن ابزار کاربردی (به دلیل ارزان‌تر بودن) دلالت دارد. بسیاری از محققان پیشنهادهایی مبنی بر این‌که ابزار کاربردی برای ماشینکاری کامپوزیت زمینه فلزی مناسب نیست ارائه داده‌اند. تعدادی از محققان به این نتیجه رسیده‌اند که ابزارهای کاربردی تحت شرایط خاصی برای ماشینکاری کامپوزیت زمینه فلزی مفید هستند [3]. پژوهش‌گران

¹ Poly crystalline diamond

گرفتن شرایط و پارامترهای برشی، تعداد 128 آزمایش نیاز بود تا بتوان تمامی آزمایش‌ها با شرایط مختلف را مورد بررسی قرار داد. لذا به منظور جلوگیری از تکرار آزمایش‌ها، از روش تاگوچی استفاده شد و تعداد آزمایش‌ها در صورت پوشش کلیه شرایط به 16 آزمون کاهش یافت. طراحی آزمایش مطابق با جدول در نرم‌افزار Minitab آماده گردید.

جدول 3 پارامترهای ماشین‌کاری با روش تاگوچی L16 DOE

Table 3 The DOE-L16 orthogonal array used for each tested MMC

مدل روانکاری	سرعت برشی m/min	پیشروی mm/z	عمق برش mm	آزمایش
خشک	90	0.05	0.5	1
مرطوب	90	0.075	0.75	2
مرطوب	90	0.1	1	3
خشک	90	0.125	1.25	4
خشک	120	0.05	0.75	5
مرطوب	120	0.075	0.5	6
مرطوب	120	0.125	1.25	7
خشک	120	0.1	1	8
مرطوب	150	0.05	1	9
خشک	150	0.75	1.25	10
خشک	150	0.1	0.5	11
مرطوب	150	0.125	0.75	12
مرطوب	180	0.05	1.25	13
خشک	180	0.75	1	14
خشک	180	0.1	0.75	15
مرطوب	180	0.125	0.5	16

4- نتایج و بحث

تمامی اندازه‌گیری‌های کیفیت سطح ماشین‌کاری شده مطابق شکل 3 در بخش‌های ابتدا، مرکز و انتهای قطعات انجام شد. سپس تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر R_a , R_z که مؤلفه‌های اصلی کیفیت سطح هستند مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد میزان سایش پهلویی در ابزارهای برشی بررسی شد. بیشترین سایش ابزار در بین مواد ارائه شده اندازه‌گیری شده و به صورت نمودار و تصاویر SEM در انتهای این بخش آورده شده است.

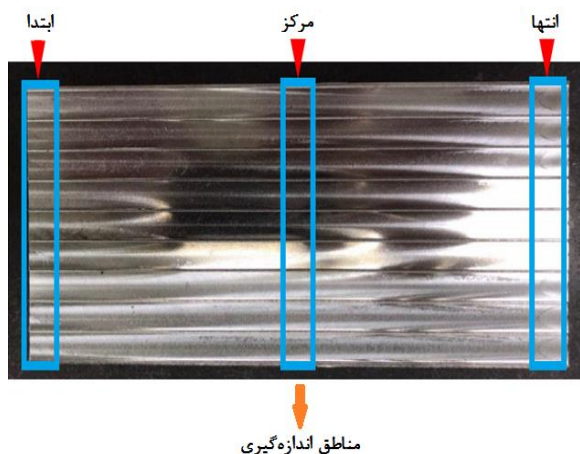


Fig. 3 Surface roughness measurement zones

شکل 3 مناطق اندازه‌گیری کیفیت سطح

در بقیه نقاط نشست یکسان مشاهده شد. با توجه به این نکته که تولید کامپوزیتی که مقدار SiC به کار رفته در آن در هیچ منطقه‌ای به هم نچسبیده باشند تقریباً غیرممکن است، لذا جهت اطمینان بیشتر، از تصاویر تحلیل مپ قطعات کامپوزیتی با دستگاه SEM استفاده شد.

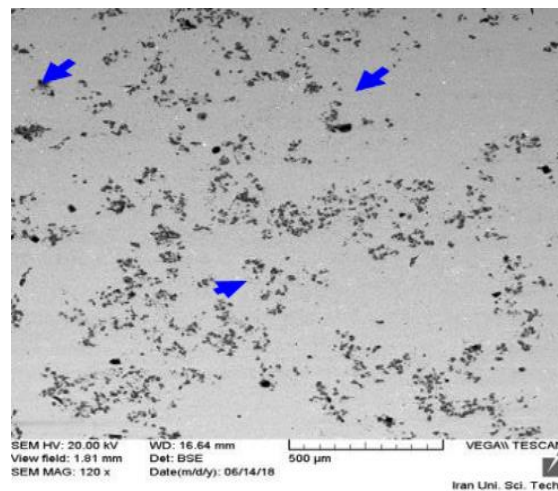


Fig. 1 SEM image of Al520 + 10 % SiC

شکل 1 تصویر SEM از ماده کامپوزیت آلومینیومی به همراه 10% SiC

بعد از ریخته‌گری، قطعه‌های مکعبی شکل از کامپوزیت زمینه آلومینیومی به ابعاد $11 \times 8 \times 1$ سانتیمتر تولید شد. برای انجام آزمایش‌های فرزکاری، پارامترهای برشی مطابق با جدول 2 استفاده شد. پارامترهای به کار رفته بر اساس مشاوره‌های فنی با شرکت سازنده ابزار انتخاب گردید.

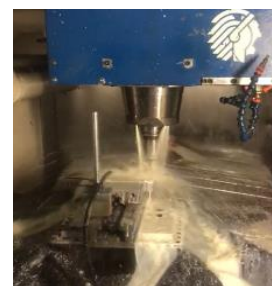
جدول 2 پارامترها و مشخصات آزمایش

Table 2 Experimental parameters used

شرایط آزمایش				پارامترهای برشی
180	150	120	90	سرعت برشی (m/min)
0.125	0.1	0.075	0.05	پیشروی (mm/z)
1.25	1	0.75	0.5	عمق برش (mm)
-	-	مرطوب	خشک	مدل روانکاری



روش خشک



روش مرطوب

Fig. 2 Overview of machining set up

شکل 2 چیدمان قطعات در حین فرزکاری

3-1- طراحی آزمایش با روش اورتاگونال ارای تاگوچی L16 DOE

به منظور تهیه آزمایش‌های مفید و کاهش تعداد آزمایش‌های تکراری، پارامترهای ماشین‌کاری مطابق جدول 3 با روش تاگوچی تهیه شد. با در نظر

1-4- کیفیت سطح

1-1-4- بررسی کیفیت سطح $Al\ 520 + 10\% SiC$

بر اساس مشاهدات انجام یافته در شکل 4 می‌توان اذعان کرد که نمودارهای Ra در این ماده دارای نوسان غیرخطی برحسب سرعت برشی و سرعت پیشروی و عمق برشی و همچنین دارای یک نوسان خطی در بخش روش خنک کاری هستند. در بررسی نتایج حاصله از Rz، در سرعت برشی 120 m/min میزان Rz کمتری نسبت به سایر شرایط برشی مشاهده شد، لذا شرایط کیفیت سطح در این نقطه بهتر از سایر نقاط می‌باشد. بر اساس تحلیل واریانس صورت یافته، هر دو مؤلفه به صورت آماری به تغییرات پارامترهای برشی حساس نیستند. یکی از دلایل این پدیده می‌تواند به علت کامپوزیتی بودن ماده باشد که صعود و نزول نمودارها بر اثر ماده تقویت‌کننده SiC می‌باشد که بسیار سخت بوده و به طور پراکنده در ماده موجود است. در این حالت لبه‌های برشی به طور تصادفی با این ماده برخورد می‌کنند و در نتیجه باعث سایش زیاد و آسیب‌های مکانیکی به لبه برشی ابزار می‌گردد. لذا امکان تحلیل و بیان روند علمی و سامان‌مند اثر پارامترهای برشی بر روی مؤلفه‌های کیفیت سطح را ناممکن می‌سازد.

2-1-4- بررسی کیفیت سطح $Al\ 520 + 10\% SiC + 1\% Sn$

با در نظر گرفتن شکل 5 می‌توان اذعان نمود که مؤلفه Ra در این ماده نیز به صورت آماری نسبت به تغییرات پارامترهای برشی حساس نبوده و تأثیر پارامترهای برشی به صورت غیرخطی است. مشابه با ماده اول، این پدیده را می‌توان ناشی از وجود ذرات SiC درون مواد یا اصطکاک اولیه برخورد ابزار با قطعه کار دانست. تأثیر پراکندگی ذرات SiC در کیفیت نهایی قطعه مؤثر است و در بیشتر مناطق نمودارهای غیرخطی و تغییرات نامتعارف در میزان افزایش Ra در شرایط و پارامترهای برشی وجود دارد.

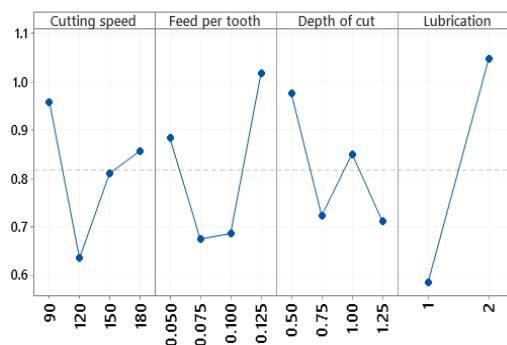


Fig. 4 Main effect plot of Ra recorded from the Enter section with $R^2 = 60.76\%$

شکل 4 تحلیل آنالیز واریانس بر روی Ra در بخش Enter به همراه $R^2 = 60.76\%$

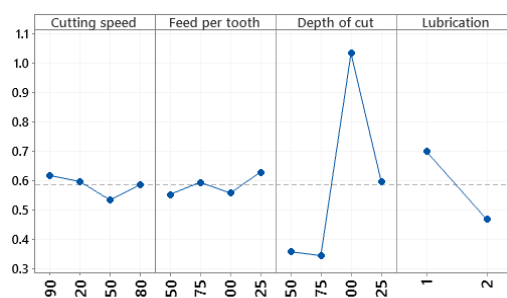


Fig. 5 Main effect plot of Ra recorded from the Enter section $R^2 = 58.32\%$

شکل 5 تحلیل آنالیز واریانس بر روی Ra در بخش Enter - $R^2 = 58.32\%$

در پایان و به عنوان نتیجه در بخش کیفیت سطح می‌توان عنوان کرد تأثیر پراکندگی ذرات تقویت‌کننده در میزان Ra مؤثر است و در بیشتر مناطق به علت توزیع ناهمگن ذرات تقویت‌کننده، نمودارهای غیرخطی و تغییرات نامتعارف در میزان افزایش Ra در شرایط و پارامترهای برشی وجود دارد. از این رو و در هر لحظه احتمال برخورد نوک ابزار برشی با ذرات تقویت‌کننده SiC وجود دارد. بر اثر برخوردهای احتمالی نیز آسیب‌های مکانیکی، حرارتی، سایش و همچنین افزایش در میزان ناهمواری‌های سطح بوجود می‌آید. غیر از برخی موارد که بدلیل برخورد تصادفی مواد SiC داخل ماده پایه با نوک ابزار برشی میزان Ra افزایش و کیفیت سطح را کاهش داد، در بقیه موارد می‌توان مشاهده کرد که میزان Ra بیشتر در حالت ماشین‌کاری خشک اتفاق افتاده است. بالاترین موارد Ra در نقاط ورودی ماشین‌کاری ثبت شده است که می‌تواند مربوط به برخورد اولیه بین ابزار و قطعه کار در یک زمان بسیار کوتاه باشد که باعث ایجاد شوک‌های حرارتی و مکانیکی می‌گردد. برای رفع این مشکل باید از روش‌های بهینه‌سازی مسیر ابزار و همچنین تغییر در زوایای برشی و شکل هندسی ابزار برشی استفاده نمود. البته برای تأیید این موارد بدلیل برخورد تصادفی ابزار با مواد ساینده SiC و باقی ذرات تقویت‌کننده در جریان ماشین‌کاری نیاز به مطالعات تکمیلی است. همچنین با توجه به مطالعات آماری صورت یافته در هر ماده و بررسی تأثیر مواد و پارامترهای برشی مختلف بر روی کیفیت سطح، می‌توان اذعان کرد که در تمامی شرایط مطالعه شده، اثر پارامترهای برشی بر Ra در مدل‌سازی آماری، غیر حساس و نامحسوس بوده و امکان مدل‌سازی عددی بین مؤلفه‌های کیفیت سطح و پارامترهای برشی وجود ندارد. اضافه نمودن ماده Sn در ماده منجر به ارتقاء سطح کیفی نسبت به حالت قبلی ماده شده است.

2-4- سایش ابزار

1-2-4- بررسی سایش ابزار $Al\ 520 + 10\% SiC$

بر اساس شکل 6، غیر از سرعت برشی، سایر پارامترهای برشی اثری خطی بر روی سایش ابزار دارند. تحلیل‌های آماری گواه این مطلب است که سایش پهلویی ابزار تابعی از عوامل و پارامترهای برشی بوده و اگرچه حضور ذرات SiC باعث افزایش سایش می‌شود، لیکن سایش کم‌کان به صورت تابعی خطی از پارامترهای برشی قابل بیان است.

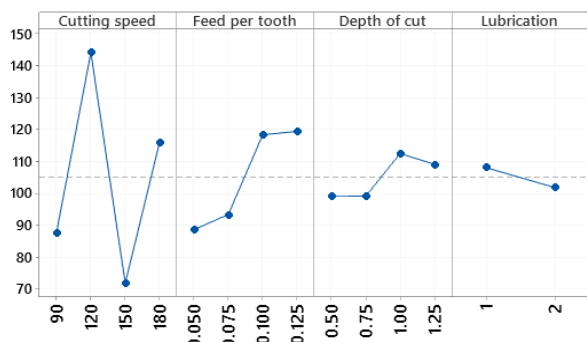


Fig. 6 The main effects plot of tool flank wear ($R^2=98.52\%$)

شکل 6 تأثیر پارامترهای برشی بر سایش ابزار $R^2 = 98.52\%$

با توجه به شکل 6 نمودار سرعت برشی یک روند غیرخطی دارد که برحسب حضور ذرات ساینده SiC می‌باشد و در بخش سرعت پیشروی هر چه میزان این سرعت بالاتر رود، میزان سایش پهلویی ابزار بیشتر شده است. همچنین وجود ماده روانکار در زمان ماشین‌کاری موجب کاهش سایش ابزار شده است. همچنین افزایش عمق برشی نیز می‌تواند موجب افزایش سایش ابزار و

به صورت جدول 4 نشان داده شده است. در این جدول کلیه پارامترها از یک تا چهار امتیازبندی شده است و عدد یک نشان‌دهنده بیشترین اهمیت و عدد چهار نشان‌دهنده کمترین اهمیت می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیرات پارامترهای ماشینکاری بر روی کیفیت سطح در قطعات کامپوزیتی با پایه آلومینیوم 520 و سایش پهلویی در ابزار برشی که تأثیر هر کدام از این عوامل به صورت زیر نتیجه‌گیری شده است: اثرگذاری پارامترهای برشی بر Rz, Ra از لحاظ آماری کمتر از 60٪ بود. از این رو می‌توان عنوان کرد که پارامترهای تعریف شده بر کیفیت سطح تأثیرپذیری ممتاز و محسوسی نداشتند.

فارغ از نوع روانکاری استفاده شده، با افزایش سرعت برشی در حین ماشین‌کاری، مقدار سایش همواره افزایش می‌یابد. در برخی موارد بدلیل وجود SiC و توزیع ناهمگن آن در ماده پایه، برخورد تصادفی آن با نوک ابزار برشی اجتناب‌ناپذیر بوده و در این صورت میزان سایش ابزار بیشتر از حد معمول می‌شود. همچنین با تغییر حالت ماشینکاری از حالت خشک به حالت مرطوب میزان سایش ابزار کاهش یافت.

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، در مواردی که برخورد تصادفی ذرات ساینده SiC با ابزار برشی مشاهده شد، میزان Ra افزایش یافت. در بقیه موارد میزان Ra در حالت ماشینکاری مرطوب بسیار کمتر از حالت ماشینکاری با روش خشک بود. البته ممکن است در اثر برخورد بین ابزار و قطعه کار در نقطه ورودی شوک حرارتی و مکانیکی حادث شده و خراش‌های کوچک روی سطح قطعه ایجاد شود و موجب افزایش Ra گردد که در نتیجه این امر به کاهش کیفیت سطح منجر می‌گردد.

بر اساس بررسی‌های آماری می‌توان اذعان کرد که پارامترهای برشی تعریف شده اثر ممتاز و خوبی بر سایش ابزار داشتند. دراندازه‌گیری میزان سایش ابزارها حین ماشین‌کاری کامپوزیت ساخته شده به همراه ذرات تقویت‌کننده SiC, Sn همواره سرعت برشی بیشترین اثر و سرعت پیشروی و روش روانکاری و همچنین میزان عمق برشی کمترین اهمیت و تأثیرگذاری را بر سایش ابزار دارند.

در سرعت‌های برشی بالاتر میزان اصطکاک بیشتر شده و آسیب‌های حرارتی و مکانیکی بیشتری به ابزارهای برشی وارد می‌شود. در نتیجه میزان سایش افزایش یافته و در ادامه کیفیت سطح قطعه کاهش یافته و همچنین در نهایت عمر ابزار کاهش می‌یابد. البته وجود ذرات ساینده بسیار سخت SiC و توزیع ناهمگن این مواد تقویت‌کننده در ماده زمینه موجب افزایش سایش در ابزارها می‌گردد که در این حالت با اضافه کردن عنصر Sn تا حد زیادی موجب بهتر شدن شرایط برشی گردید و در نتیجه می‌توان عنوان کرد اضافه کردن عنصر Sn موجب بهبود شرایط ماشینکاری و کاهش سایش ابزار در حین ماشین‌کاری کامپوزیت ساخته شده می‌گردد.

جدول 4 تأثیر اهمیت آماری پارامترهای برشی بر مقدار سایش در مواد کامپوزیتی

Table 4 Order of importance of cutting parameters and conditions on tool flank wear when machining the tested materials

مواد	سرعت برشی mm/min	پیشروی mm/z	مدل روانکاری	عمق برش mm	R ²
Al520 + 10% SiC	1	2	3	4	94.77 %
Al520 + 10% SiC + 1% Sn	1	2	3	4	96.04 %

همچنین کاهش عمر ابزار شود. بدلیل برخورد تصادفی نوک ابزار برشی با SiC، حرارت و اصطکاک افزایش و در نتیجه میزان سایش ابزار افزایش یافته و عمر مفید ابزار نیز کاهش پیدا می‌کند.

4-2-2- بررسی سایش ابزار Al520 + 10% SiC + 1% Sn

بر اساس شکل 7، تأثیر آماری محسوس پارامترهای برشی بر روند تغییرات سایش ابزار قابل مشاهده است. نرخ پیشروی اثری خطی و سرعت برشی و عمق برشی اثر غیرخطی بر روند تغییرات سایش ابزار دارند و می‌توان نتیجه گرفت که اضافه نمودن Sn به ساختار ماده منجر به کاهش سایش پهلویی و میزان لبه انباشته در ابزار می‌شود. در نتیجه این عنصر می‌تواند سبب کاهش سایش و افزایش کیفیت سطح در این نوع کامپوزیت پایه آلومینیوم با ذرات تقویت‌کننده SiC گردد. بر این اساس، هر زمان ماشینکاری از حالت خشک به حالت ماشینکاری مرطوب تغییر وضعیت داده است، میزان سایش ابزار کاهش و در نتیجه عمر ابزار افزایش یافته است. نرخ پیشروی اثری خطی و سرعت برشی و عمق برشی اثر غیرخطی بر روند تغییرات سایش ابزار دارند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که میزان سایش و لبه انباشته تشکیل شده بعد از عملیات فرزکاری کاهش پیدا کرده و نقش عنصر Sn در ساختار این ماده کامپوزیتی آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده SiC را می‌توان سبب کاهش اثرات و آسیب‌های مکانیکی بعد از عملیات ماشین‌کاری دانست. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن عنصر Sn به این ماده کامپوزیتی می‌توان میزان آسیب‌های مکانیکی ابزار را کاهش و در نتیجه عمر ابزار افزایش می‌یابد. میزان سایش ابزار با توجه به حضور عنصر Sn در این ماده کامپوزیتی نسبت به ماده کامپوزیتی بدون Sn کاهش یافته است.

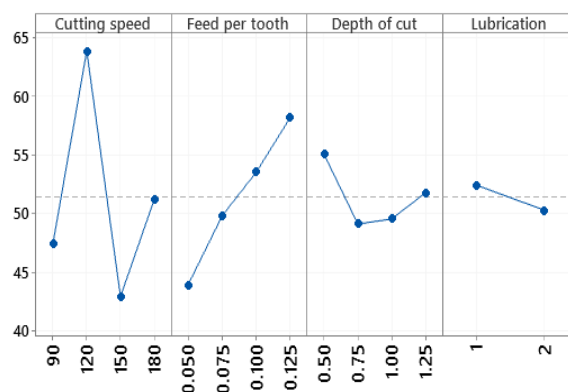


Fig. 7 The main effects plot of tool flank wear ($R^2 = 96.04\%$)

شکل 7 تأثیر پارامترهای برشی بر سایش ابزار $R^2 = 96.04\%$

بدلیل توزیع ناهمگن ذرات SiC و برخورد ناگهانی ابزار برشی با مواد ساینده SiC در ماده‌های مورد آزمایش، نمی‌توان به طور قطعی اذعان کرد که هرچه سرعت برشی بیشتر گردد میزان سایش ابزار بیشتر می‌شود. فارغ از نوع ماده ماشین‌کاری شده، در حالت ماشین‌کاری خشک سایش ابزار بیشتر از حالت مرطوب است. ماشینکاری با حالت روانکاری منجر به کاهش سایش پهلویی می‌شود. با افزایش عمق برشی نیز میزان سایش ابزار افزایش یافته و همچنین با افزایش پیشروی میزان سایش بیشتری در ابزارها قابل مشاهده است. مطابق جدول 4، تأثیر اهمیت پارامترهای برشی بر مقدار سایش در مواد کامپوزیتی به تفکیک میزان F-value در نتایج آزمایش‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در نهایت با در نظر گرفتن همه شرایط و تعامل پارامترها به صورت مشترک و تأثیر کلی این موارد در نتیجه فرآیند مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه نتایج

6- مراجع

- [1] Wang, C. , Cheng, K. , Rakowski, R. , Greenwood, D. and Wale, J., "Comparative studies on the effect of pilot drillings with application to high-speed drilling of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites," The international journal of advanced manufacturing technology, Vol.89, N. 9, pp. 3243-3255, 2017.
- [2] Barnes, S. and Pashby, I. R., "Machining of aluminium based metal matrix composites," Applied composite materials, Vol. 2, N. 1, pp. 31-42, 1995.
- [3] Durante, S. , Rutelli, G. and Rabezzana, F., "Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools," Surface and coatings technology, Vol. 94, pp. 632-640, 1997.
- [4] Haq, A. , Marimuthu, P. and Jeyapaul, R., "Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method," The international journal of advanced manufacturing technology, Vol. 37, N. 3, pp. 250-255, 2008.
- [5] Ciftci, I. , Turker, M. and Seker, U., "CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs," Wear, Vol. 257, N. 9-10, pp. 1041-1046, 2004.
- [6] Asgari, A. , "Cutting Conditions Optimisation of Titanium Metal Matrix Composites in Turning and Face Milling," PhD Thesis , École Polytechnique de Montréal, 2015.
- [7] Zou, B. , Chen, M. , Huang, C. and An, Q., "Study on surface damages caused by turning NiCr20TiAl nickel-based alloy," Journal of materials processing technology, Vol. 209, N. 17, pp. 5802-5809, 2009.
- [8] Muthukrishnan, N. and Davim, J. P., "Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis," Journal of materials processing technology, Vol. 209, N. 1, pp. 225-232, 2009.
- [9] Cheung, C.F. , Chan, K. C. , To, S. and Lee, W. B., "Effect of reinforcement in ultra-precision machining of Al6061/SiC metal matrix composites," Scripta materialia, Vol. 47, N. 2, pp. 77-82, 2002.
- [10] Said, M. S. , Yusoff, M. S. and Hassan, C. H., "Tool wear in machining AlSi/AlN metal matrix composite 10 wt% reinforcement using uncoated cutting tool," In applied mechanics and materials, Vol. 465, pp. 973-977, 2014.
- [11] Sougavabar, M. A. , Niknam, S. A. , Davoodi, B. and Songmene, V., "Milling Al520-MMC reinforced with SiC particles and additive elements Bi and Sn," Materials, Vol. 15, N. 4, pp. 1533, 2022.
- [12] Cronjäger, L. and Meister, D., "Machining of fibre and particle-reinforced aluminium," CIRP annals, Vol. 41, N. 1, pp. 63-66, 1992.
- [13] Miracle, D. B., "Metal matrix composites—from science to technological significance," Composites science and technology, Vol. 65, N. 15-16, pp. 2526-2540, 2005.
- [14] Hung, N. P. , Yeo, S. H. and Oon, B., "Effect of cutting fluid on the machinability of metal matrix composites," Journal of materials processing technology, Vol. 67, N. 1-3, pp. 157-161, 1997.
- [15] Srinivasan, A. , Arunachalam, R. M. and Ramesh, S., "Machining performance study on metal matrix composites-a response surface methodology approach," American journal of applied sciences, Vol. 9, N. 4, pp. 478-483, 2012.



بررسی تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی ساختار مشبک دو ماده‌ای

حسین قره‌باغی¹، امین فرخ‌آبادی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

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

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/08/16

پذیرش: 1401/10/11

کلیدواژگان

الاستو-پلاستو-آسیب،

ساخت افزایشی،

اجزای محدود غیرخطی

چکیده

مقاله حاضر عملکرد مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی ساختار مشبک سه‌بعدی دو ماده را از طریق رویکرد تجربی و عددی بررسی می‌کند. در ابتدا، با استفاده از ساخت افزایشی بخش بیرونی ساختار مشبک سه‌بعدی پیشنهادی با ماده ترموپلاستیک پلی‌اورتان ساخته شده است. با استفاده از یک سرنگ، رزین اپوکسی به قسمت داخلی ساختار مشبک تولید شده تزریق می‌شود. سپس، آزمایش‌های فشرده‌سازی برای تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی ساختار مشبک سه‌بعدی دو ماده انجام شده است. مطالعه عددی غیرخطی، رفتار الاستو-پلاستو-آسیب در آنالیزهای المان محدود که پاسخ غیرخطی ساختارهای در نظر گرفته شده را دنبال می‌کند، اجرا شده است. این مدل قادر است تفاوت خواص کششی و فشاری مواد را نیز بررسی کند. منحنی نیرو-جابجایی ساختار مشبک تحت بارگذاری فشاری مقایسه شده است. مدل عددی پیش‌بینی قابل قبولی در مورد پاسخ‌های خطی و غیرخطی ساختار مشبک سه‌بعدی پیشنهادی نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که نه تنها استفاده از ساختارهای مشبک دو ماده‌ای باعث جذب انرژی بیشتر و بهبود خواص مکانیکی می‌شود، بلکه ترکیب منطقی دو ماده باعث می‌شود ساختار مشبک سه‌بعدی دو ماده با جذب انرژی و سفتی بهینه در مقایسه با ساختارهای مشبک معمولی با یک ماده واحد داشته باشد.

Experimental and numerical investigation of the energy absorption capability of the bi-material lattice structure

Hussain Gharehbaghi¹, Amin Farrokhbabadi^{2*}

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

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

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

Keywords

Additive manufacturing,
Elasto-plasto-damage,
Nonlinear FEM

Abstract

This paper investigates the mechanical performance and energy absorption capacity of bi-material three-dimensional lattice structures via experimental and numerical approaches. At first, fused deposition modeling was used to manufacture the outer part of the proposed three-dimensional lattice structure with TPU material. Using a syringe, epoxy resin is injected into the inner part of the manufactured lattice structure. Then, quasi-static compression tests were conducted to analyze the mechanical properties and energy absorption capacity of the bi-material three-dimensional lattice structure. As the nonlinear numerical study, the elasto-plasto-damage behavior was implemented in finite element analyses which track the nonlinear response of considered structures. This model is capable to investigate the differences in tensile and compressive properties of the materials as well. The comparison of the load-displacement curve of structures under compressive loading has been compared. The numerical models exhibit an acceptable prediction about the linear and nonlinear responses of the proposed three-dimensional lattice structure. The results reveal that not only does the use of hybrid structures provide more energy absorption and improve mechanical properties, but also the rational combination of two materials makes the bi-material three-dimensional lattice structure with the optimum energy absorption and stiffness, in comparison to those usual lattice structures with a single material.

1- مقدمه

این تا حدودی به دلیل در دسترس بودن ساخت افزایشی است که ساخت ساختارهای مشبک با ریزمعماری‌های پیچیده را ممکن می‌سازد. بر این اساس، بررسی ساختارهای مشبک ساخته‌شده با روش ساخت افزایشی و خواص ماکروسکوپی آن‌ها بسیار مهم است [4], [5].

ساختارهای مشبک سه‌بعدی به دلیل خواص مفیدی که دارند معمولاً در زمینه‌های مختلفی مانند هوافضا، حمل و نقل و کاربردهای زیست پزشکی استفاده می‌شوند [3]-[1]. ترکیب منطقی مواد و طراحی امکان توسعه ساختارهای مشبک سه‌بعدی با ظرفیت جذب انرژی بالا را فراهم کرده است.

Please cite this article using:

Gharehbaghi, H., Farrokhbabadi, A., "Experimental and numerical investigation of the energy absorption capability of the bi-material lattice structure," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1976-1982, 2023.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.1971958.1806

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

ماده ای مبتنی بر یک سلول واحد دو هرمی چهارضلعی (شکل 1) تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است.

هدف مطالعه حاضر ارائه رویکردهای عددی غیرخطی و تجربی است که در آن ظرفیت جذب انرژی ساختار مشبک بر اساس سلول واحد دو هرمی چهارضلعی بررسی خواهد شد. با در نظر گرفتن رفتار تغییر شکل بزرگ با مدل الاستو-پلاستو-آسیب، تحلیل عددی انجام شده است. شبیه سازی اجزای محدود از طریق نرم افزار آباکوس نسخه 6.14.3 با حل کننده صریح انجام شده است. با استفاده از زیربرنامه فرترن و با توجه به تفاوت خواص فشاری و کششی پلیمرها، در المان هایی که تحت تنش های فشاری و کششی قرار می گیرند، خواص فشاری و کششی پلیمر اختصاص داده می شود. نمونه های ساختار مشبک با استفاده از پرینت سه بعدی ساخته شده اند. یکی از مهم ترین نوآوری های این تحقیق ساخت ساختار مشبک دو ماده ای با ترکیبی از مواد نرم و سخت می باشد.

1-1- معرفی ساختار مشبک دو ماده ای

در این تحقیق خواص و ظرفیت جذب انرژی یک ساختار مشبک دو ماده ای بررسی شده است. این ساختار مشبک بر اساس سلول واحد دو هرمی چهارضلعی است. شکل 1 مدل این سلول واحد را در نمای سه بعدی نشان می دهد.

این سلول واحد دارای هشت پایه مورب یکسان و چهار پایه افقی در صفحه است. لازم به ذکر است که طول چهار پایه افقی یکسان است و به زاویه رأس بستگی دارد. شکل 2 ساختار مشبک را نشان می دهد که با تکرار سلول واحد دو هرمی چهارضلعی دو ماده ای معرفی شده در شکل 1 ساخته شده است. طول و شعاع پایه های سلول های واحد در همه جهات یکسان است. سطح مقطع پایه ها دایره ای است که در شکل 3 نشان داده شده است.

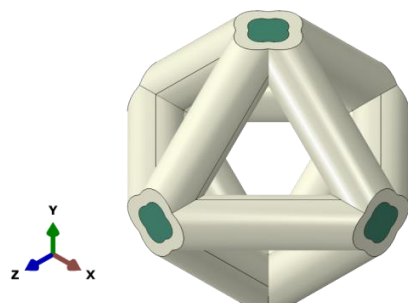


Fig. 1 Perspective view of the unit cell

شکل 1 نمای سه بعدی سلول واحد

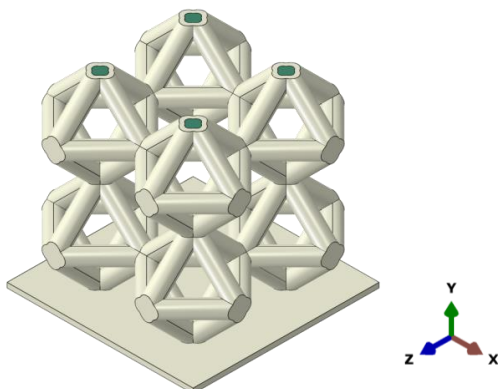


Fig. 2. Perspective view of the lattice structure

شکل 2 نمای سه بعدی ساختار مشبک

در دسترس بودن مدل های محاسباتی امکان طراحی منطقی ساختارهای مشبک را فراهم می کند، جایی که انتخاب انواع سلول های واحد و ابعاد بر اساس پیش بینی های دقیق خواص مکانیکی حاصل وجود دارد. به همین دلیل است که مطالعات زیادی بر روی روابط توپولوژی-ویژگی ساختارهای مشبک بر اساس انواع مختلف سلول های واحد انجام شده است [7]، [6]. محققان علاوه بر تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی ساختارهای مشبک، کارایی جذب انرژی این ساختارها را نیز مورد بررسی قرار داده اند [8]، [10]، [11]. اکثر مطالعات انجام شده در مورد جذب انرژی ساختارهای مشبک بر روی نمونه های تولید شده با یک ماده متمرکز شده است. مطالعات کمی در مورد تجزیه و تحلیل جذب انرژی ساختارهای مشبک دو ماده ای انجام شده است. به عنوان مثال، لی و همکاران [11]، به طور تجربی خواص فشاری شبه استاتیکی و رفتار جذب انرژی شبکه های موجدار دو جهته را بررسی کردند. پاسخ های فشرده سازی توسط روش اجزای محدود برای تکرار فرآیند تغییر شکل شبیه سازی شده است. دنگ و همکاران [12] بهینه سازی توپولوژی را برای طراحی میرایی ساختارهای مشبک پیشنهاد کردند. در این کار، چهار مورد طراحی ارائه شده و به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. کائو و همکاران [13] یک مطالعه تجربی بر روی پاسخ ضربه ای کم سرعت ساختارهای مشبک دو ماده ای ارائه کردند که دارای ساختار ترکیبی متشکل از یک ساختار مشبک چاپ شده سه بعدی پر شده از مواد تقویت کننده بود.

تقی پور و ملک زاده [14] در پژوهشی تأثیر روش پر کردن هسته های موجدار دوزنقه ای شکل دو لایه، با فوم های پلی اورتان از نوع سخت با وزن سبک، مورد مطالعه قرار دادند. آن ها پنج نوع هسته موجدار از جنس آلومینیوم به صورت خالی و پر شده از فوم، تحت بارگذاری شبه استاتیکی به صورت فشاری تک محوره قرار داده اند. در ادامه با استفاده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس به بررسی جذب انرژی ویژه پرداخته اند. مقایسه ای نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی، نشان از همپوشانی بالا و تطابق خوب دو روش دارد. نتایج نشان داد که به کارگیری فوم در هسته، می تواند ظرفیت جذب انرژی را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش دهد. پرورش و همکارانش [15] در پژوهشی به دسته جدیدی از ساختارهای مشبک تحت عنوان ساختارهای آگزتیک پرداخته اند که به دلیل وزن پایین، سفتی و مقاومت برشی بالا کاربردهای مختلفی در انواع سازه ها از جمله سازه های جاذب انرژی دارند. آن ها به بررسی تجربی رفتار سه سازه آگزتیک الاستومری از جنس تی بی-یو با هندسه های آنتی تتراکیرال، آرهد (سرنیزه ای)، ری اینترنت در بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه ای و مقایسه آن ها با یک سازه غیر آگزتیک لانه زنبوری پرداخته اند. همچنین نمونه هایی با استفاده از روش ساخت افزایشی (پرینت سه بعدی) تهیه نموده و پارامترهایی مانند میزان جذب انرژی و میزان جذب انرژی بر واحد طول فشرده گی را ارزیابی نموده اند. در این مطالعه، ساختارهای مشبک دو ماده ای از ساختار مشبک پلی لاکتیک اسید و فوم پلی اورتان برای افزایش مقاومت در برابر ضربه ساخته شده است. آزمایش های ضربه برای مقایسه تضعیف ضربه، سفتی، چقرمگی و استحکام به ترتیب با استفاده از نرخ اندازه گیری شده تغییر شتاب، جابجایی و جذب انرژی انجام شده است. نتایج نشان داد که فوم های انعطاف پذیر اثرات مثبت بیشتری نسبت به فوم صلب بر خواص ضربه دارند. در نتیجه، انتخاب مناسب پرکننده فوم می تواند به طور قابل توجهی خواص ضربه را بهبود دهد.

مطالعه حاضر به بررسی عددی و تجربی یک ساختار مشبک دو ماده ای بر اساس یک سلول واحد دو هرمی چهارضلعی می پردازد. ساختار مشبک دو

3- روش تجربی

1-3- ساخت ساختار مشبک

برای اعتبارسنجی مدل عددی، تعداد 3 نمونه از ساختار مشبک با سلول واحد دو هرمی چهارضلعی با پایه های توخالی دایره ای با استفاده از مدل سازی رسوب ذوب شده ساخته شد (شکل 4). برای اعمال بار یکنواخت در حین آزمایش، صفحات با ضخامت 1 میلی متر در بالا و زیر ساختار مشبک قرار داده شدند. طول پایه های شیب دار تشکیل دهنده سلول واحد برابر با 20 میلی متر است. قطر بیرونی برابر با 5 میلی متر در نظر گرفته شده است. همچنین قطر داخلی 3 میلی متر است. زاویه رأس 45 درجه است. سرعت چاپ برابر با 300 میلی متر در دقیقه و ارتفاع لایه های چاپ شده و قطر نازل به ترتیب برابر با 0.16 و 0.4 میلی متر است. علاوه بر این، دمای نازل و بستر به ترتیب برابر با 250 و 60 درجه سانتی گراد است. نمونه ها در 32 ساعت چاپ شدند. با توجه به نرمی فیلامنت ترموپلاستیک پلی اورتان، در ساخت این ساختار مشبک از هیچ گونه عقب نشینی استفاده نشده است. همچنین برای افزایش کیفیت ساخت از حمایت کننده با پرکردن 15 درصد استفاده شده است (شکل 4).

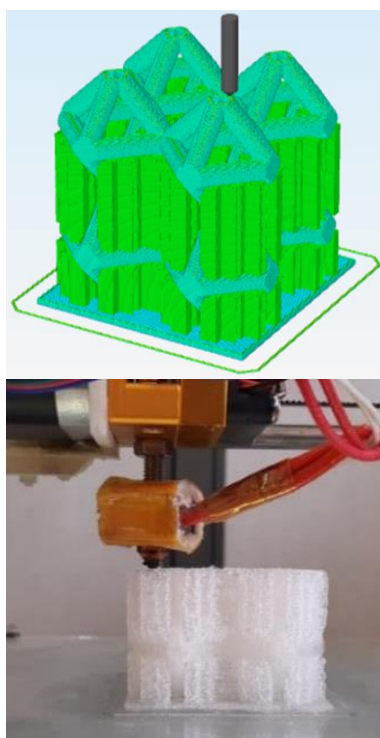


Fig. 4 A lattice structure made of the quadrilateral bipyramid unit cell with circular hollow struts by additive manufacturing

شکل 4 یک ساختار مشبک ساخته شده از سلول واحد دو هرمی چهارضلعی با پایه های توخالی دایره ای با ساخت افزایشی

پس از ساخت نمونه با چاپگر سه بعدی و جداسازی حمایت کننده ها از آن، رزین به کمک سرنگ به فضاهای خالی تزریق می شود. شکل 5 تزریق رزین اپوکسی را نشان می دهد. ساختار مشبک به گونه ای طراحی شده است که فضای داخلی پایه ها به هم راه دارند، 4 سلول واحد بالایی از قسمت بالا باز هستند و بعد از تزریق رزین برای اعمال یکنواخت نیرو به کمک صفحه تخت بسته می شوند. صفحه تخت بالایی با استفاده از چسب به ساختار مشبک متصل می شود. برای اطمینان از پر شدن اپوکسی در فضاهای خالی، حجم فضای خالی محاسبه شده است و به همان مقدار رزین تزریق می شود. برای

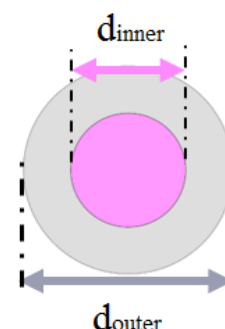


Fig 3. Cross-section of the strut, soft material, gray color (TPU) and hard material, lilac color (epoxy)

شکل 3 سطح مقطع پایه، ماده نرم، رنگ خاکستری (ترموپلاستیک پلی اورتان) و ماده سخت، رنگ یاسی (اپوکسی)

2- خواص مواد

یکی از چالش های اصلی در قابلیت جذب انرژی ساختارهای مشبک ساخته شده با پلیمرهای سخت مانند ای بی اس، پلی لاکتیک اسید و غیره، شکست ناگهانی سازه و فرو ریختن ساختار مشبک است. از سوی دیگر، در ساختارهای مشبک ساخته شده با پلیمرهای نرم مانند ترموپلاستیک پلی اورتان، به دلیل سفتی کم این مواد، جذب انرژی کاهش می یابد. استفاده همزمان از مواد نرم و سخت ایده اصلی این تحقیق برای افزایش قابلیت جذب انرژی ساختارهای مشبک پلیمری است. در نتیجه، در ساختار مشبک دو ماده ای پیشنهادی، از ترموپلاستیک پلی اورتان به عنوان یک ماده نرم و رزین اپوکسی به عنوان یک ماده سخت استفاده می شود. در این ساختار مشبک به دلیل کشیدگی زیاد، از ترموپلاستیک پلی اورتان در قسمت بیرونی پایه ها استفاده شده است. برای قسمت داخلی پایه ها باید از مواد سفت تر از ترموپلاستیک پلی اورتان استفاده شود. در نتیجه از رزین اپوکسی ام ال 506 برای پرکردن قسمت داخلی پایه ها استفاده می شود که می توان آن را به پایه ها تزریق کرد. نسبت ترکیبی هاردنر به رزین 13 به 100 [16] است. مدول الاستیک ترموپلاستیک پلی اورتان 60 مگاپاسکال است، دیگر خواص مکانیکی ترموپلاستیک پلی اورتان و رزین اپوکسی به ترتیب در جداول 1 و 2 ارائه شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی ترموپلاستیک پلی اورتان تحت بارهای کششی و فشاری [15]

Table 1 Mechanical properties of TPU material under tensile and compressive loads [15]

	Yield stress (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Fracture Strain
Tensile	17.4	550	1.576
Compression	3.6	188	0.652

جدول 2 خواص مکانیکی اپوکسی ام ال 506 [16]

Table 2 Mechanical properties of ML506 epoxy [16]

Property	Value	Unit
Young's modulus	2.8	GPa
Poisson's ratio	0.35	
Mass density	1.14	g/m ³
Tensile strength	76.1	MPa
Compressive strength	97.4	MPa

تحت بارگذاری فشاری ایجاد شده است. تحلیل عددی غیرخطی ساختار مشبک پیشنهادی با استفاده از نرم افزار آباکوس نسخه 6.14.3 با حل کننده صریح شبیه سازی شده است. تفاوت قابل توجهی در کشش و فشار بین رفتار پلاستیک و کرنش شکست مواد پلیمری ساخته شده توسط چاپگر سه بعدی مشاهده شده است. در نتیجه، خواص کششی و فشاری به نواحی مختلف در ساختارهای مشبک که تحت کشش و فشار در آزمون فشرده سازی قرار دارند، اختصاص داده شده است. رفتار پلاستیک و کرنش شکست ناحیه کششی و فشاری با استفاده از زیر برنامه به زبان فرترن جدا می شود. در شکل 7 روند نمای این زیر برنامه آورده شده است. ساختار مشبک دو ماده ای به صورت سه بعدی برای شبیه سازی مدل سازی شده است و از المان C3D4 استفاده شده است. تماس بین ماده داخلی و ماده بیرونی گره فرض شده است. این تماس با توجه به مشاهدات تجربی لحاظ شده است. اندازه دانه بندی 0.3 میلی متر پس از مطالعه همگرایی انتخاب شده است. مطالعه همگرایی با معیار سفتی اولیه (ناحیه الاستیک خطی) بررسی شده است. در خواص الگوریتم تماس، رفتار مماسی با ضریب اصطکاک برابر با 0.2 و تماس سخت برای رفتار نرمال (تماس عمومی) تعیین شده است [1]. شکل 8 شرایط مرزی و بارگذاری و روش المان بندی را نشان می دهد. منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از المان محدود غیرخطی برای مقایسه با آزمون های تجربی استفاده شده است.

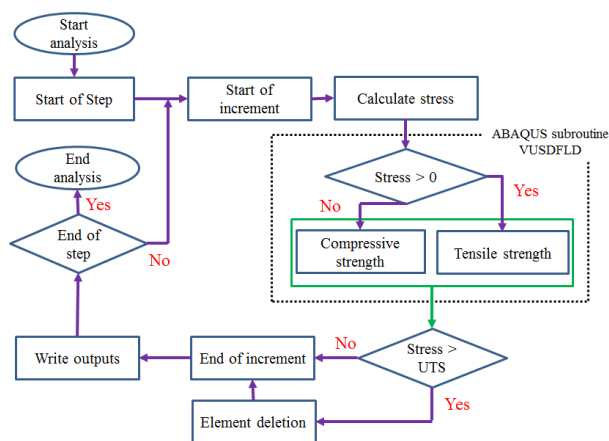


Fig. 7 Procedure for the finite element analysis of failure mechanisms
شکل 7 روند نمای مکانیزم های خرابی برای تحلیل اجزای محدود

5- بحث و نتایج

شکل 9 منحنی نیرو-جابجایی در آزمایش تجربی و تحلیل عددی را نشان می دهد. نتایج روش عددی با نتایج تجربی مطابقت بسیار خوبی دارد. منحنی نیرو-جابجایی رفتار خطی را نشان می دهد تا زمانی که به اولین نیروی بیشینه برسد. سپس، یک روند کاهشی جزئی در پاسخ مقدار نیرو اتفاق می افتد و ساختار مشبک یک وضعیت فروپاشی پیوسته را تا زمانی که حداکثر جابجایی خرد شدن را برآورده می کند، نشان می دهد. مقایسه بین رفتارهای ساختارهای مختلف جاذب انرژی معمولاً بر اساس پارامترهای جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خرد شدن انجام می شود (رابطه 1 و 2). میانگین بار خرد شدن به صورت رابطه 3 به دست می آید، یک ساختار جاذب انرژی ایده آل دارای مقدار جذب انرژی ویژه بالا و کمترین اختلاف بین مقادیر میانگین بار خرد شدن و اولین نیروی بیشینه (یعنی بازده نیرو خرد شدن برابر با 1) است.

جلوگیری از محبوس شدن هوا، تزریق رزین اپوکسی با سرعت پایین (تقریباً 0.2 سی سی در دقیقه) انجام شده است. باز بودن قسمت بالایی ساختار باعث خروج هوای اضافی از داخل ساختار می شود.



Fig. 5 Injection of resin into hollow struts

شکل 5 تزریق رزین به پایه های توخالی

2-3- آزمون فشاری

سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی مقدار انرژی جذب شده یک ساختار مشبک تحت بارگذاری فشاری را نشان می دهد. بنابراین، به منظور ارزیابی جذب انرژی، یک آزمون فشرده سازی با استفاده از دستگاه آزمون سنتام اس تی ام-20 انجام شد (شکل 6). آزمایش در دمای اتاق با سرعت نامی 2 میلی متر در دقیقه انجام شده است.



Fig. 6 Compressive tests for the bi-material lattice structure based on the quadrilateral bipyramid unit cell

شکل 6 آزمون فشاری برای ساختار مشبک دو ماده ای بر اساس سلول واحد دو هرمی چهارضلعی

4- تحلیل عددی

اگرچه روش اجزای محدود خطی ارائه شده در مطالعات قبلی [18], [17] به خوبی می تواند مدول الاستیک معادل ساختار مشبک دو ماده ای را تخمین بزند، اما قادر به پیش بینی اولین آسیب و رفتار غیرخطی این ساختارهای مشبک نیست. بنابراین یک روش اجزای محدود غیرخطی برای بررسی رفتار ساختار مشبک دو ماده ای بر اساس سلول های واحد دو هرمی چهارضلعی

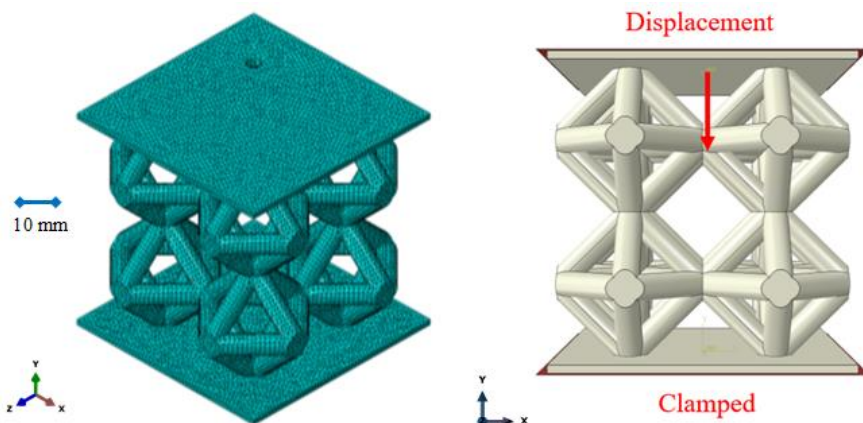


Fig. 8 Applied loading, boundary conditions, and mesh discretization in nonlinear FE

شکل 8 نحوه بارگذاری اعمال شده، شرایط مرزی و المان بندی

می‌دهد. شکل 11 تغییر شکل ساختار مشبک را با اپوکسی خالص تحت بارگذاری فشاری نشان می‌دهد.

جذب انرژی ویژه در ساختار مشبک دو ماده‌ای بیشتر از ساختار مشبک یک ماده است. در ساختار مشبک تک ماده‌ای ساخته شده از مواد نرم، به دلیل مدول الاستیک کم، میانگین بار خرد شدن و اولین نیروی بیشینه کوچک خواهد بود، در نتیجه میزان جذب انرژی ویژه قابل توجه نخواهد بود. در ساختار مشبک تک ماده‌ای ساخته شده از مواد سخت، به دلیل کرنش شکست کم، آسیب در ساختار مشبک تحت بارگذاری بسیار سریع رخ می‌دهد و گاهی اوقات ساختار مشبک به طور ناگهانی فرو می‌ریزد (شکل 11) و به دلیل نوسانات فراوان در نمودار نیروی جابجایی، میانگین بار خرد شدن کوچک خواهد بود، بنابراین ساختار مشبک برای کاربردهای جذب انرژی نامناسب خواهد بود. در شکل 12، منحنی‌های بار-جابجایی برای ساختار مشبک با ترموپلاستیک پلی‌اورتان خالص و رزین اپوکسی خالص و ترکیبی از این دو ماده آورده شده است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله ظرفیت جذب انرژی در ساختار مشبک دو ماده‌ای بر اساس سلول واحد دو هرمی چهارضلعی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار ساختار مشبک دو ماده تحت بارگذاری شبه استاتیکی فشاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. تغییر شکل بزرگ با ارائه مدل اجزای محدود غیرخطی بر اساس رفتار الاستو-پلاستو-آسیب مواد پیش‌بینی شده است. مناطق فشاری و کششی با استفاده از زیربرنامه به زبان فرترن از هم جدا شده‌اند. تفاوت در رفتار پلاستیک و کرنش شکست پلیمرها در طول کشش و فشرده‌سازی در مدل عددی ارائه شده، پیش‌بینی ظرفیت جذب انرژی در ساختار مشبک پلیمری را به طور مناسب ممکن می‌سازد. یکی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق، دستیابی به افزایش جذب انرژی ویژه در ساختار مشبک سه‌بعدی با استفاده از دو ماده، مواد نرم با کرنش شکست زیاد در خارج و مواد سخت با سفتی بالا در داخل است. استفاده از ترموپلاستیک پلی‌اورتان (مواد نرم) از افت ناگهانی بار جلوگیری می‌کند. استفاده از اپوکسی (مواد سخت) اولین نیروی بیشینه، میانگین بار خرد شدن و جذب انرژی ویژه را افزایش می‌دهد. ایده استفاده از مواد نرم و سخت در کنار هم در ساختار مشبک، جذب انرژی ویژه را بیش از 11 برابر در مقایسه با ساختار مشبک تولید شده با اپوکسی خالص و بیش از 8 برابر در مقایسه با ساختار مشبک تولید شده با ترموپلاستیک پلی‌اورتان خالص افزایش داده است.

$$SEA = \frac{\int F dx}{m} \quad (1)$$

$$CLE = \frac{MCL}{IPCF} \quad (2)$$

$$MCL = \frac{\int F dx}{d_{max}} \quad (3)$$

با توجه به آزمون‌های تجربی برای ساختار مشبک دو ماده‌ای پیشنهادی، جذب انرژی 144 ژول با انحراف معیار +8 و -4 ژول، بازده نیروی خرد شدن 0.77 با انحراف معیار +0.02 و -0.02 و اولین نیروی بیشینه 6.2 کیلونیوتن با انحراف معیار +0.37 و -0.18 شده است.

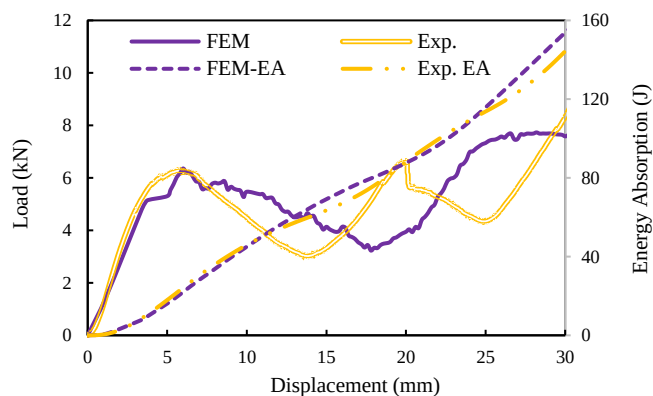


Fig. 9 Comparison of obtained load-displacement curves due to experimental and numerical tests under compressive loading

شکل 9 منحنی نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده از آزمون تجربی و مدل عددی

شکل 10 تغییر شکل ساختار مشبک دو ماده‌ای را تحت بارگذاری فشاری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ساختار مشبک تحت بارگذاری فشاری در لایه بیرونی پایه‌ها به دلیل کرنش شکستگی زیاد ترموپلاستیک پلی‌اورتان دچار شکست نمی‌شود. این ویژگی از فروریختن ناگهانی ساختار مشبک جلوگیری می‌کند. در حقیقت لایه نرم بیرونی (ترموپلاستیک پلی‌اورتان) به عنوان پوشش قسمت داخلی که از مواد شکننده سخت با سفتی بالا (نسبت به مواد لایه بیرونی) ساخته شده است، از ریزش ناگهانی جلوگیری کرده و ظرفیت بارگیری ساختار مشبک را افزایش

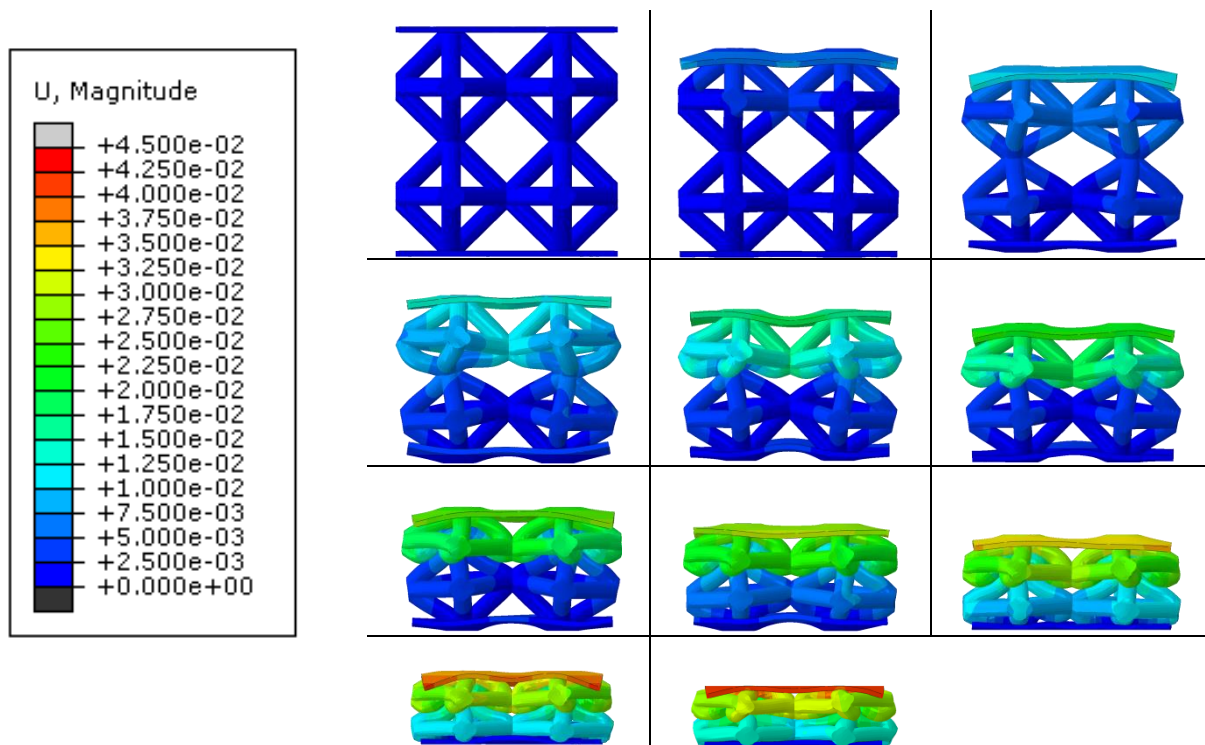


Fig. 10 Deformation bi-material lattice structures under compressive load

شکل 10 تغییر شکل ساختار مشبک دو ماده‌ای تحت بارگذاری فشاری

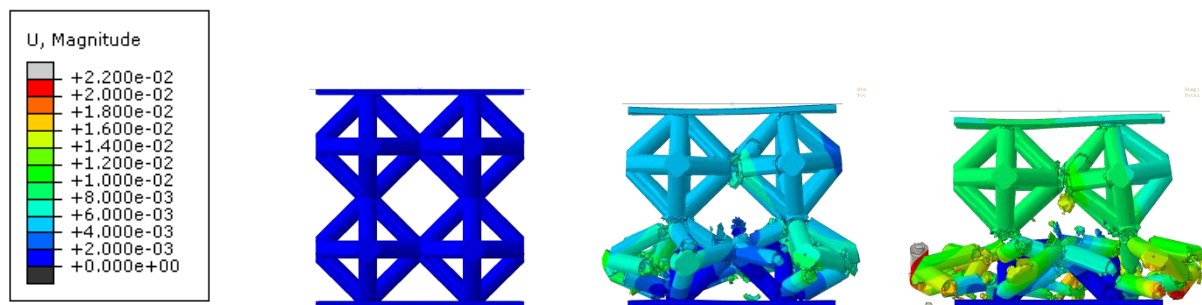


Fig. 11 Deformation lattice structures with pure epoxy under compressive load

شکل 11 تغییر شکل ساختار مشبک با اپوکسی خالص تحت بارگذاری فشاری

7- مراجع

- [1] Farrokhhabadi, A., Veisi, H., Gharehbaghi, H., Montesano, J., Behravesh, A.H. and Hedayati, S.K., "Investigation of the energy absorption capacity of foam-filled 3D-printed glass fiber reinforced thermoplastic auxetic honeycomb structures," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2022.
- [2] Mahbod, M. and Asgari, M., "Multiobjective optimization of a newly developed additively manufactured functionally graded anisotropic porous lattice structure," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 234, no. 11, pp. 2233–2255, 2020.
- [3] Mahbod, M., Asgari, M. and Mittelstedt, C., "Architected functionally graded porous lattice structures for optimized elastic-plastic behavior," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 234, no. 8, pp. 1099–1116, 2020.
- [4] Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M. and Zadpoor, A.A., "Analytical relationships for the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials based on octahedral unit cells," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 46, pp. 408–422, 2017.

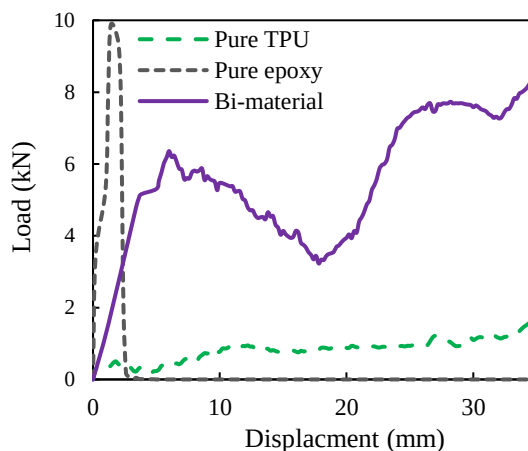


Fig. 12 Load-displacement curves related to lattice structures with pure TPU, pure epoxy, and bi-material

شکل 12 منحنی‌های نیرو-جابجایی مربوط به ساختارهای مشبک با ترموپلاستیک پلی‌اورتان خالص، اپوکسی خالص و دو ماده

- [21] Gharehbaghi, H., Sadeghzade, M. and Farrokhhabadi, A., "Introducing the new lattice structure based on the representative element double octagonal bipyramid," *Aerospace Science and Technology*, vol. 121, p. 107383, 2022.
- [5] Hedayati, S.K., Behraves, A.H., Hasannia, S., Kordi, O., Pourghaumi, M., Saed, A.B. and et al., "Additive manufacture of PCL/nHA scaffolds reinforced with biodegradable continuous Fibers: Mechanical Properties, in-vitro degradation Profile, and cell study," *European Polymer Journal*, vol. 162, p. 110876, 2022.
- [6] Veisi, H. and Farrokhhabadi, A., "Investigation of the equivalent material properties and failure stress of the re-entrant composite lattice structures using an analytical model," *Composite Structures*, vol. 257, p. 113161, 2021.
- [7] Zadpoor, A.A. and Hedayati, R., "Analytical relationships for prediction of the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials," *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, vol. 104, no. 12, pp. 3164–3174, 2016.
- [8] Mahbod, M. and Asgari, M., "Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice structure: Analytical and numerical models," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 155, pp. 248–266, 2019.
- [9] Farrokhhabadi, A., Ashrafian, M.M., Gharehbaghi, H. and Nazari, R., "Evaluation of the equivalent mechanical properties in a novel composite cruciform honeycomb using analytical and numerical methods," *Composite Structures*, vol. 275, p. 114410, 2021.
- [10] Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M. and Hosseini-Toudeshky, H., "Comparison of elastic properties of open-cell metallic biomaterials with different unit cell types," *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 106, no. 1, pp. 386–398, 2018.
- [11] Galehdari, S.A., Kadkhodayan, M. and Hadidi-Moud, S., "Low velocity impact and quasi-static in-plane loading on a graded honeycomb structure; experimental, analytical and numerical study," *Aerospace Science and Technology*, vol. 47, pp. 425–433, 2015.
- [12] Deng, D. and Murakawa, H., "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements," *Computational Materials Science*, vol. 37, no. 3, pp. 269–277, 2006.
- [13] Olszta, M.J., Cheng, X., Jee, S.S., Kumar, R., Kim, Y.Y., Kaufman, M.J. and et al., "Bone structure and formation: A new perspective," *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 58, no. 3–5, pp. 77–116, 2007.
- [14] Taghipoor, H. and Malekzade, K., "Experimental and numerical study of Energy Absorption in foam filled Trapezoidal Compound core sandwich panels subjected to quasi-static loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 5, no. 4, pp. 565–574, 2019.
- [15] Parvareh, M., Ahmadi, H. and Liaghat, G.H., "Investigation on the Energy Absorption of Elastomeric Auxetic Structures in Quasi-static and Impact Loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 8, no. 1, pp. 1431–1442, 2021.
- [16] Farrokhhabadi, A., Ashrafian, M.M. and Fotouhi, M., "Design and characterization of an orthotropic accordion cellular honeycomb as one-dimensional morphing structures with enhanced properties," *Journal of Sandwich Structures & Materials*, vol. 0, no. 0, p. 109963622110702, 2022.
- [17] Barbero, E.J., *Finite element analysis of composite materials using Abaqus™*. CRC press, 2013.
- [18] Deymier, A.C., An, Y., Boyle, J.J., Schwartz, A.G., Birman, V., Genin, G.M. and et al. "Micro-mechanical properties of the tendon-to-bone attachment," *Acta Biomaterialia*, vol. 56, no. January, pp. 25–35, 2017.
- [19] Molino, G., Montalbano, G., Pontremoli, C., Fiorilli, S. and Vitale-Brovarone, C., "Imaging techniques for the assessment of the bone osteoporosis-induced variations with particular focus on micro-ct potential," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 24, pp. 1–27, 2020.
- [20] Sadeghzade, M., Gharehbaghi, H. and Farrokhhabadi, A., "Experimental and Analytical Studies of Mechanical Properties of Additively Manufactured Lattice Structure Based on Octagonal Bipyramid Cubic Unit Cell," *Additive Manufacturing*, vol. 48, no. PB, p. 102403, 2021.



تخمین عمر کاری کامپوزیت‌های دندانی پایه پلیمری ناچدار تقویت‌شده با نانوذرات

محمد بیگ زاده¹، مجید صفرآبادی^{2*}، مرتضی عطائی اعظم¹، نبی مهری خوانساری³

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

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

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

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/09/02

پذیرش: 1401/09/24

کلیدواژگان

نانوکامپوزیت،

کامپوزیت دندانی،

سیکل کاری،

پلی متیل متاکریلات،

هیدروکسی آپاتیت.

نانوکامپوزیت‌ها کاربرد گسترده در مواد ترمیمی دندانی و تجهیزات پزشکی دارند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری اشاره نمود. از کاربردی‌ترین پلیمرهای زیست‌سازگار در این زمینه، پلی متیل متاکریلات می‌باشد. در پژوهش حاضر، به تحلیل عددی رفتار خستگی نانوکامپوزیت زمینه پلی متیل متاکریلات تقویت‌شده با نانوذرات هیدروکسی آپاتیت پرداخته شده است. بدین منظور نمونه‌های استاندارد نانوکامپوزیت بر مبنای درصدهای مختلف نانوذره ساخته شد و خواص مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی رفتار خستگی و سیکل کاری، مدل ناچ‌داری در نرم‌افزار آباکوس و نرم‌افزار تحلیل خستگی شبیه‌سازی شد و از داده‌های بدست آمده از آزمایش کشش ساده، به عنوان خواص مکانیکی ماده استفاده شد. با افزودن نانوذرات به پلیمر خالص، خواص مکانیکی شامل مدول ینگ و استحکام کششی قطعه و نیز سیکل کاری بهبود پیدا کرد؛ با این حال مشاهده شد با افزودن بیشتر نانوذره، خواص مکانیکی و نیز سیکل کاری کمی با کاهش همراه بود که علت آن تجمع نانوذرات در سطح نانوکامپوزیت بود و منجر به کاهش استحکام نمونه‌ها می‌شود.

Life cycle estimation of notched polymer base dental composites reinforced with nanoparticles

Mohammad Beygzade¹, Majid Safarabadi^{2*}, Morteza Ataei-Aazam¹, Nabi Mehri Khansari³

1- School of Mechanical Engineering, college of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- School of Mechanical Engineering, college of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

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

Keywords

Nanocomposites
Dental Composites
Polymethylmethacrylate
Hydroxyapatite
Life Cycle.

Abstract

Nanocomposites are widely used in dental restorative materials and medical equipment, among the most important of which, polymer-based nanocomposites can be mentioned. One of the most useful biocompatible polymers in this field is polymethylmethacrylate (PMMA). In the present study, the numerical analysis of the fatigue behavior of polymethyl methacrylate nanocomposite reinforced with hydroxyapatite nanoparticles has been investigated. For this purpose, standard samples of nanocomposite were made and their mechanical properties were investigated. To study the fatigue behavior and life cycle, a notched model was simulated in Abaqus and Fe-Safe software, and the data obtained from the tensile test were used as the mechanical properties of the material. By adding nanoparticles to the pure polymer, Young's modulus and tensile strength of the part, as well as the life cycle, were improved; However, it was observed that with the addition of more nanoparticles, the mechanical properties and the life cycle decreased slightly, which was caused by the accumulation of nanoparticles on the surface of the nanocomposite, which leads to a decrease in the strength of the samples.

1-مقدمه

مناسب بیولوژیکی با بدن و استحکام نسبتاً بالا، وزن پایین، قیمت مناسب و حمل و نقل آسان، در کاربردهای پزشکی و بایومکانیکی به عنوان پروتز و یا به عنوان جایگزین و ترمیم استخوان و دندان آسیب‌دیده کاربرد وسیعی پیدا کرده است [1، 2]. از مضرات و ضعف این ماده، این است که در برابر رشد ترک مقاومت پایین و چقرمگی شکست نسبتاً کم را در مقایسه با ماده دندانی دارد.

امروزه در صنعت دندان و دندان‌سازی نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری به طور گسترده‌ای در مواد ترمیمی استفاده می‌شوند. از آغاز توسعه زیست مواد، پلیمرهای غیر قابل تجزیه از جمله پلی‌متیل متاکریلات به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این نوع مواد پلیمری به سبب سازگاری

ماتریس شد. آگلومره و کلوخه شدن می‌تواند به عنوان مانعی برای حرکت زنجیره عمل کند. آنها به عنوان مراکز تمرکز تنش رفتار می‌کنند که باعث شروع شکست در شرایط تنش می‌شود [11].

در زمینه‌ی خستگی و بررسی عمر کاری نانوکامپوزیت‌های PMMA/HA مطالعات کمی صورت گرفته اما در خصوص پلیمرخالص پلی متیل متاکریلات و اثر ناچ و دما، در مطالعه‌ی لیو و همکاران [12] عمر خستگی صفحه پلی متیل متاکریلات با ناچ U شکل، در دماهای مختلف بر اساس رویکرد تنش موضعی به صورت عددی بررسی شد. ابتدا، یک رویکرد تنش محلی برای آسیب خستگی در ناچ U شکل، بر اساس اصل عمر آسیب معادل ارائه شد. دوم، معیارهای انحطاط استحکام و سفتی در طول فرآیند خستگی برای در نظر گرفتن آسیب تجمعی غیرخطی خستگی ایجاد شدند. او در مقاله‌ی دیگری [13] پیش‌بینی عمر صفحه پلی‌متیل متاکریلات با ناچ U شکل، به صورت عددی بر اساس ترکیب مکانیسم آسیب خستگی و مکانیسم انتشار ترک‌های خستگی مورد بررسی قرار گرفته و دو نمونه با ناچ U شکل به صورت‌های شعاع کوچک طول زیاد و شعاع بزرگ طول کمتر با ضخامت یکسان استفاده شده است. عمر شروع ترک خستگی و عمر انتشار تحت نسبت تنش $R = 0.4$ همگی بزرگتر از نسبت تنش $R = 0.1$ در همان سطح تنش هستند. حد خستگی مدل U شکل با شعاع بیشتر، بیشتر از شعاع کمتر است. برای سطوح تنش کم، فاز شروع ترک خستگی غالب است.

خستگی پلیمر پلی متیل متاکریلات تقویت‌شده با نانوذرات زیرکونیا با درصد‌های وزنی متفاوت در مطالعه‌ی وایلی و همکاران [14] بررسی شده است. نتیجه‌ی گزارش شده این چنین بود که استحکام فشاری با افزایش کسر وزنی افزایش می‌یابد و زمانی که کسر وزنی 7.5 درصد وزنی بود به دلیل افزایش شکندگی نمونه کاهش می‌یابد. برای پیش‌بینی عمر پروتز به صورت تجربی، دستگاه جدیدی طراحی و تولید کردیم که می‌تواند با اعمال بار جایگزین که نیروی ایجاد شده توسط جوییدن را شبیه‌سازی می‌کند، طول عمر دندان را تعیین کند. آنها در مطالعه‌ی دیگری [15]، از نانو صفحات گرافن برای اصلاح خواص دینامیکی برای مواد زیستی مورد استفاده، با کسر وزنی 0.25 تا 1.25 استفاده می‌شده و از دو تکنیک کار تجربی و شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین رفتار خستگی برای نمونه‌ها با تأثیر تغییر انواع نانومواد تقویت‌کننده و کسر حجمی آن‌ها استفاده شده است. در نهایت، فرآیند اصلاح رفتار خستگی، عمر و استحکام، منجر به حدود 28٪ با تقویت توسط مواد نانو می‌شود. در مطالعه‌ی پاز و همکاران [16]، پودرهای گرافن (G) و اکسید گرافن (GO) در اندازه نانو با بارگیری از 0.1 تا 1 درصد وزنی به عنوان عوامل تقویت شده برای سیمان استخوانی پلی متیل متاکریلات مورد بررسی قرار گرفتند. خواص مکانیکی مانند مقاومت خمشی، مدول خمشی، مقاومت فشاری، چقرمگی شکست و عملکرد خستگی و نیز خواص حرارتی نانوکامپوزیت‌های حاصل مشخص شد. تحقیق آن‌ها نشان داد که ادغام پودر G و GO عملکرد مکانیکی سیمان استخوانی PMMA را به ویژه با توجه به چقرمگی شکست و رفتار خستگی بهبود می‌بخشد. خواص مکانیکی استاتیکی و خستگی متفاوت با هدف درک تأثیر پودر G و GO بر عملکرد سیمان استخوان و همچنین تعیین سطح بارگذاری بهینه برای پودر در اندازه نانو مورد مطالعه قرار گرفته است که ممکن است یک فرمول سیمان جدید امیدوارکننده را ارائه دهد.

در این مطالعه قصد داریم به بررسی رفتار و خواص مکانیکی و نیز سیکل کاری پلیمر پلی متیل متاکریلات تقویت شده با نانوذرات سوزنی

این امر موجب بروز و رشد ترک از محل جدایی ماده‌ی مرکب و دندان و یا از داخل ماده‌ی کامپوزیت دندانی و پروتزهای جایگزین یا ترمیمی دندانی- استخوانی می‌شود [3]. به علت محدود بودن خواص مکانیکی این پلیمر و ضعیف بودن سازگاری آن با استخوان، استفاده‌های درمانی آن محدود و گاهی همراه با عوارض است. برای بهبود دادن این کمبودهای قابل ملاحظه، تحقیقات متعددی بر روی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری صورت گرفته است. اضافه کردن یک عامل معدنی زیست فعال مانند نانوذرات هیدروکسی آپاتیت (HA) توانسته باعث تقویت خواص مکانیکی و همچنین افزایش خاصیت زیست سازگاری پلیمرهای مذکور شود [4]. پرکننده‌هایی مانند HA باعث می‌شوند ترکیبات کامپوزیتی مستحکم‌تر باشند، انقباض کمتر و رنگ بهتری داشته باشند. با این وجود، افزودن میزان بیشتری از پرکننده‌ها به ترکیبات کامپوزیت باعث افزایش میزان مدول الاستیک آن‌ها و شکننده‌تر شدن آن‌ها می‌شود [5].

هیدروکسی آپاتیت دارای پایداری عالی در محلول آبی، تشابه بسیاری با جزء مینرالی و فاز معدنی استخوان داشته و این سبب برقراری پیوند با استخوان و نیز زیست سازگاری مناسب آن در داخل بدن می‌شود. به همین علت این ماده به عنوان جایگزین استخوان و دندان برگزیده شده است [6]. خاصیت بیواکتیویته¹ (توانایی برقراری پیوند مستقیم شیمیایی با سلول‌های بدن) و استئوکاندکتیویته² (قابلیت هدایت رشد استخوانی و بازسازی استخوان از دست رفته) موجب استفاده از این مواد در کاربردهای ترمیم دندان، استخوان و ارتوپدی شده است. به عبارتی دیگر هیدروکسی آپاتیت ذاتاً شکننده است اما استئوکاندکتیوی خوبی را داراست و این در حالی است که پلی متیل متاکریلات دارای مقاومت شکستگی بیشتر و فرایندپذیری آسان‌تر اما دارای استئوکاندکتیوی نسبتاً ضعیفی است. این موضوع باعث شده است که در حال حاضر PMMA/HA پرکاربردترین کامپوزیت مورد استفاده باشد [7].

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی برای بررسی اثر ادغام HA به PMMA به عنوان یک ماده جایگزین استخوان و دندان انجام شده است. زیرجد و همکاران [8] خواص مکانیکی PMMA تقویت‌شده با نانوذرات HA را با استفاده از آزمون‌های خمشی، فشاری و سه نقطه‌ای مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افزودن HA تا 10 درصد وزنی به سختی خواص خمشی ماتریس را تغییر می‌دهد. مشاهدات مشابهی توسط ون و همکاران گزارش شده است [9] که گزارش دادند که استحکام خمشی و کرنش در حضور HA کاهش می‌یابد. برعکس، در مطالعه‌ی دیگری [10] که HA را با یک عامل جفت کننده سیلان استفاده کردند، دریافتند که این نانوپرکننده خواص مکانیکی PMMA، از جمله مدول الاستیک و خمشی را به ترتیب تا 26٪ و 27.3٪ برای نانوکامپوزیت با 15 درصد وزنی، بهبود می‌بخشد. با این حال، هیچ تفاوت قابل توجهی در استحکام کششی و خمشی پس از افزودن HA یافت نشد. تنها افزایش اندک 1.6٪ و 3٪ در استحکام کششی و خمشی به ترتیب در بارگذاری 5٪ وزنی به دست آمد، در حالی که سختی سطح با 15٪ وزنی HA حدود 8٪ افزایش یافت. اثر بارگذاری HA بر چقرمگی شکست کامپوزیت‌های PMMA/HA نیز مورد بررسی قرار گرفت. PMMA خالص چقرمگی شکست ضعیفی را نشان داد که به تغییر شکل پلاستیکی کوچک پلیمرهای با وزن مولکولی بالا نسبت داده می‌شود. با افزودن HA، چقرمگی شکست افزایش یافت و در بارگذاری پرکننده 5 درصد وزنی به حداکثر رسید که به پراکندگی همگن HA که مانع از انتشار ترک می‌شود نسبت داد. با این حال، افزایش بیشتر نانوذرات HA باعث کاهش چقرمگی شکست به دلیل تجمع نانوذرات در

² Osteoconductivity¹ Bioactivity

کرنش در Fe-Safe برای ارزیابی مدل است. این معیار بر پایه ماهیت فیزیکی رشد ترک استوار شده است. شکل کلی این معیار به صورت زیر ارائه شده است:

$$\left(\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2}\right) + S\Delta\epsilon_n = A \frac{\sigma'_f - 2\sigma_{n-\text{mean}}}{E} (2N_f)^b + B\epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

$$\sigma_{n-\text{mean}} = \sigma_{n-\max} - \left(\frac{\sigma_{n-\max} - \sigma_{n-\min}}{2}\right) \quad (2)$$

این معیار بر پایه‌ی ماکسیمم تغییرات کرنش برشی $\Delta\gamma_{\max}$ ترکیب شده با $\Delta\epsilon_n$ ، تغییرات کرنش محوری، در آن صفحه‌ای می‌باشد که مقدار ماکسیمم تغییرات کرنش برشی در آن اتفاق افتاده است. S نیز ضریب وابسته به جنس ماده می‌باشد. در رابطه‌ی فوق σ'_f ضریب استحکام خستگی محوری بوده و ϵ'_f نیز ضریب شکل‌پذیری خستگی است. همچنین، b توان استحکام خستگی محوری، c توان شکل‌پذیری خستگی و N_f عمر خستگی نمونه می‌باشد. برای مدل‌سازی ابتدای امر در آباکوس مدل نمونه‌ی ناچ‌زده شده، بر اساس مطالعه‌ی لیو و همکاران [13]، رسم شده و برای خواص ماده در آباکوس از داده‌ی آزمون کشش بهره گرفته شد. داده‌های دریافتی از دستگاه آزمایش کشش سنتام، شامل نیرو و جابه‌جایی بود و با پردازش داده‌ها برای هر مقدار نانوذره شامل 0، 0.5، 1 و 1.5 درصد تنش و کرنش حقیقی مطابق معادلات 3 و 4، محاسبه و وارد شد.

جدول 1 انتخاب مواد اولیه در ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت دندانی

Table 1 Selection of materials in the manufacture of dental nanocomposite samples

تولیدکننده	مشخصات	ماده
صنایع دارویی آکروپارس مالک، آکروپارس RE	پودر: متیل متاکریلات مایع: مونومر متیل متاکریلات	پلی متیل متاکریلات
شرکت مهندسی پایدار ابتکار (آرمینا)، شناسه محصول HA1401	درجه خلوص 98 درصد، پودر سفید، نانوذرات سوزنی: قطر = 10-30 nm طول = 200 nm	هیدروکسی اپاتیت
شرکت پیشرو میتکر PMP	سیلیکون قالب‌گیری RTV2 A: مایع روان، B: عامل پخت	سیلیکون قالب‌گیری



Fig. 1 Tensile test machine (STM-20)

شکل 1 دستگاه آزمون کشش ساده

هیدروکسی اپاتیت در درصدهای پایین در شرایط بوجود آمدن ناچ بپردازیم. برای این کار یک مدل کامپوزیت دندانی پایه پلیمری PMMA/HA را شبیه‌سازی و مورد تحلیل عددی قرار می‌دهیم. ابتدا آماده سازی نمونه‌های استاندارد آزمون کشش ساده، خواص مکانیکی و استحکام کششی آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. سپس به کمک نتایج آزمون کشش، مدلی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و به کمک Fe-Safe رفتار خستگی آن بررسی می‌شود.

2- روش تحقیق

در این بخش ابتدا مواد اولیه و نحوه‌ی ساخت نمونه‌ها برای انجام آزمون کشش ساده عنوان شده و در ادامه به شبیه‌سازی رفتار خستگی می‌پردازیم.

1-2- مواد اولیه، آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمون کشش ساده

در این مطالعه، ماده‌ی اصلی مورد استفاده در بحث نانوکامپوزیت‌های دندانی، پلی متیل متاکریلات است. استفاده از این نوع ماده در کاربردهای پزشکی و بایومکانیکی به عنوان پروتز و یا به عنوان جایگزین و ترمیم استخوان و دندان آسیب‌دیده کاربرد زیادی دارد [17]. به علت محدود بودن خواص مکانیکی این پلیمر و ضعیف بودن سازگاری آن با استخوان، استفاده‌های درمانی آن محدود و گاهی همراه با عوارض است [18]. برای بهبود دادن این کمبودهای قابل ملاحظه، اضافه کردن یک عامل معدنی زیست فعال مانند نانوذرات هیدروکسی اپاتیت توانسته باعث تقویت خواص مکانیکی و همچنین افزایش خاصیت زیست سازگاری پلیمرهای مذکور شود [5]. سیمان‌های دندانی اکریلیک خودپخت معمولاً از فازهای مایع و پودری تشکیل می‌شوند [19]. نانو هیدروکسی اپاتیت به عنوان نانو پرکننده زیست سازگار، به صورت سوزنی بوده که قطر آن بین 10 تا 30 نانومتر و طول 200 نانومتر می‌باشد. این ماده به شکل پودر سفیدرنگ با خلوص 98 درصد در دسترس است. با استفاده از نسبت پودر/مونومر 2:1 طبق دستورالعمل سازنده، فاز پودر PMMA با فاز مایع مخلوط شد [20]. مقادیر وزنی HA و مخلوط آماده شده با استفاده از التراسونیک، به عنوان محیط اختلاط، برای رسیدن به کسر وزنی 0.5، 1، 1.5 درصد نانوذره در نمونه‌های کامپوزیت، مخلوط شدند. سپس خمیر سیمان را در حفره‌های قالب استاندارد کشش ریخته و در دمای 23 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در نهایت نمونه‌ها از قالب جدا شده و به مدت سه هفته در شرایط محیطی قرار گرفتند تا قبل از انجام آزمون کشش ساده به تعادل برسند [21]. قالب ساخت نیز، قالب سیلیکونی صنعتی¹ است که از دو جزء شامل مایع روان و عامل پخت ساخته می‌شود. این دو جزء با نسبت پنج درصد به کار برده می‌شوند و به هیچ ماده دیگری غیر از خودش یعنی سیلیکون نمی‌چسبد و تحمل دمایی بالای 200 درجه سانتی‌گراد را دارد. در جدول 1 لیست مواد به کار رفته برای ساخت نمونه‌های آزمون کشش ساده آورده شده است.

پس از عملیات آماده‌سازی، نمونه‌های آزمون کشش ساخته شده طبق استاندارد² با استفاده از دستگاه کشش- فشار سنتام³ آزمایش شد (شکل 1). آزمایش استاتیکی کشش یکنواخت با نرخ بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

2-2- شبیه‌سازی رفتار خستگی

برای مدل‌سازی رفتار خستگی از نرم‌افزار آباکوس و نرم‌افزار تحلیل خستگی Fe-Safe کمک گرفته شد نمود. این نرم‌افزار می‌تواند عمر خستگی را از دو حالت FEA الاستیک و الاستیک-پلاستیک محاسبه کند. برای انباشت خسارت، ناشی از تاریخچه‌های بار مختلف، Fe-Safe از قانون ماینر استفاده می‌کند. از نظر دقت، الگوریتم براون میلر پیشرفته‌ترین الگوریتم مبتنی بر

¹ RTV2 Silicone Mold

² ASTM-D638

³ Santam (STM-20)

3- نتایج

در ابتدا نتایج خالص از آزمون کشش ساده آورده شده است و در نهایت رفتار خستگی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس و Fe-Safe قابل مشاهده خواهد بود.

3-1- نتایج آزمون کشش ساده

به کمک آزمون کشش بر روی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای جرمی متفاوت از نانوذره هیدروکسی آپاتیت، قادر به تعیین نمودن خواص مکانیکی آن‌ها شدیم. برای هر درصد نانوذره 3 آزمایش کشش انجام شد. در شکل 4 ابتدا نمونه‌ها پس از آزمایش کشش مشاهده شده و نیز نمودار تنش-کرنش میانگین برای نمونه‌های پلی‌متیل متاکریلات با درصدهای مختلف نانوذره هیدروکسی آپاتیت قابل مشاهده می‌باشد.

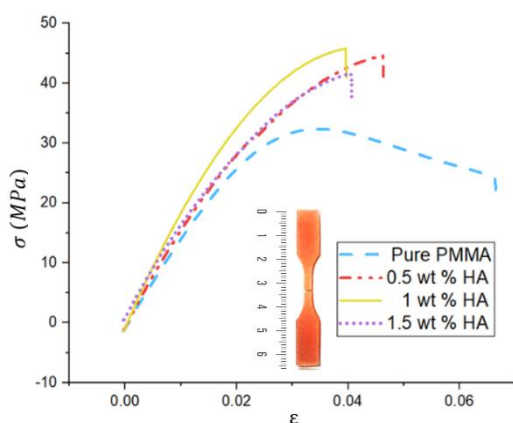


Fig. 4 The average stress-strain diagram obtained from tensile test

شکل 4 نمودار تنش-کرنش میانگین حاصل از آزمون کشش ساده

همان‌طور که در جدول 2 و شکل 5 (الف) مشاهده می‌شود، با افزودن نیم درصد وزنی نانوذره هیدروکسی آپاتیت به پلی متیل متاکریلات خالص، مدول یانگ و مطابق شکل 5 (ب) استحکام نهایی کششی قطعه مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. با افزودن یک‌درصد این بهبود خواص مکانیکی افزایش یافته ولی در افزودن نیم‌درصد بیشتر، مدول یانگ و استحکام نهایی مقداری کاهش پیدا می‌کنند.

3-1- نتایج شبیه‌سازی خستگی

پس از انجام آزمایش کشش و داشتن خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده برای مدل‌سازی آزمایش خستگی در آباکوس به کمک نرم‌افزار Fe-Safe اقدام انجام شد. در فرآیند مدل‌سازی، یک پیش‌بینی اولیه برای تعداد سیکل کاری در دو نیروی 30 درصد و 80 درصد سطح تنش نهایی شکست بدست آمد.

جدول 2 نتایج حاصل از آزمون کشش ساده

Table 2 Results of the tensile test

درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت	مدول یانگ آزمون کشش (GPa)	استحکام نهایی آزمون کشش (MPa)
0%	1.63	30.6
0.5%	1.68	41.6
1%	2.02	42.7
1.5%	1.70	39.3

$$\sigma_{True} = \sigma_{Eng}(\epsilon_{Eng} + 1) \quad (3)$$

$$\epsilon_{True} = Ln(\epsilon_{Eng} + 1) \quad (4)$$

پس از به دست آوردن تنش و کرنش حقیقی و رسم نمودار آن بایستی تنش تسلیم قطعه و کرنش در آن نقطه به دست می‌آید. شیب نمودار تنش و کرنش، برابر مدول یانگ نمونه محاسبه و با استفاده از روش تنش شاهد، یک خط موازی با بخش خطی منحنی رسم شد و نقطه‌ی برخورد ثبت شد. به صورت تقریبی σ_y از آن نقطه شروع خواهد شد (شکل 2). کرنش از آن نقطه کرنش پلاستیک خواهد بود. داده‌های کرنش پلاستیک را به همراه تنش مربوطه از زمانی که وارد منطقه‌ی پلاستیک می‌شویم گزینش شده و برای مازول خواص مکانیکی آباکوس آماده می‌شود.

در ادامه‌ی روند شبیه‌سازی، حالت استاتیکی برای هر درصد خاص از نانوذره در نظر گرفته شده و بارگذاری انجام می‌شود که شکل 3 (الف-a) شرایط بارگذاری و شکل 3 (ب-b) مش‌بندی را نشان می‌دهد. پس از شبیه‌سازی حالت استاتیک، نتایج حاصل برای بررسی عمر کاری وارد نرم‌افزار Fe-Safe شده و بارگذاری تناوبی و بارگذاری خستگی روی هر مدل، صورت می‌گیرد.

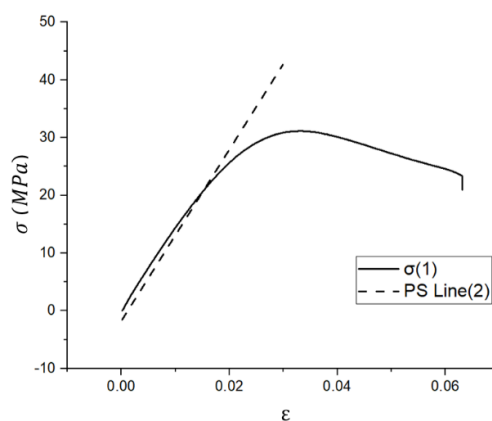


Fig. 2 True stress-strain diagram

شکل 2 نمودار تنش-کرنش حقیقی و یافتن ناحیه‌ی پلاستیک

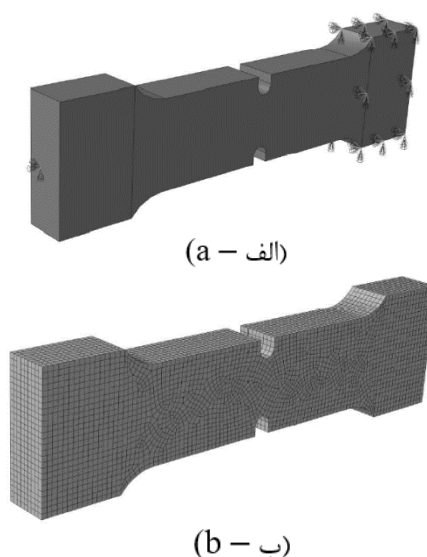


Fig. 3 (a) Simulation of static loading (b) Meshing in Abaqus

شکل 3 (الف) شبیه‌سازی بارگذاری استاتیکی (ب) مش‌بندی در آباکوس

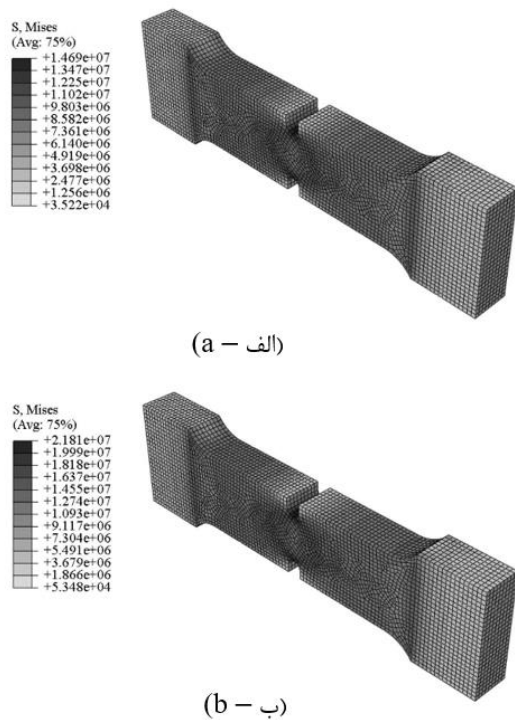


Fig. 6 Example of static loading results on a sample containing 1% of nanoparticles. (a) 30% of Max. load. (b) 80% of Max. load.

شکل 6 نمونه‌ای از نتایج بارگذاری استاتیکی بر نمونه‌ی حاوی یک‌درصد نانوذره. (الف) 30 درصد نیروی بیشینه. (ب) 80 درصد نیروی بیشینه

نیروی داده شده و تنش بیشینه بدست آمده از آباکوس به شرح شکل 7 می‌باشد. بدیهی است بدلیل داشتن ناچ در قطعه، تمرکز تنشی در محل ناچ بوجود آمده و تنش بیشتر در آن محل دیده شود. با توجه به افزایش نیرو در هر درصد از نانوذرات، تنش بیشینه بدست آمده نیز در آن نقطه بیشتر است. در ادامه مدل تولید شده وارد Fe-Safe شده و پس از قراردادن در شرایط آزمایش، تحلیل انجام شد و نتایج در آباکوس مورد قابل مشاهده خواهد بود. داده‌ی نهایی Fe-Safe برای هر نمونه‌ی آزمایش گرفته شده تعداد سیکل و عمر آن نمونه خواهد بود.

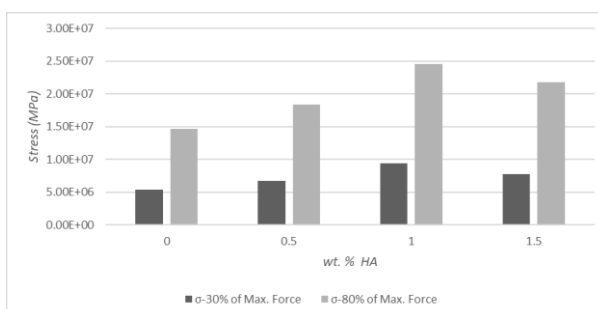


Fig. 7 The stress obtained from Abaqus by applying the force obtained from the tensile test

شکل 7 تنش بدست آمده در آباکوس از اعمال نیروی حاصل از آزمون کشش

برای هر آزمایش کشش تجربی که انجام شده بود، یعنی برای 12 عدد نمونه‌ی آزمایش شده، این شبیه‌سازی تکرار شده و برای هر درصد وزنی نانوذره 3 عدد به دست آمد که مجموعاً 12 عدد برای هر سطح تنش، در جدول 4 و 5 قابل مشاهده خواهد بود. همانطور که مشاهده می‌شود با بالا رفتن درصد

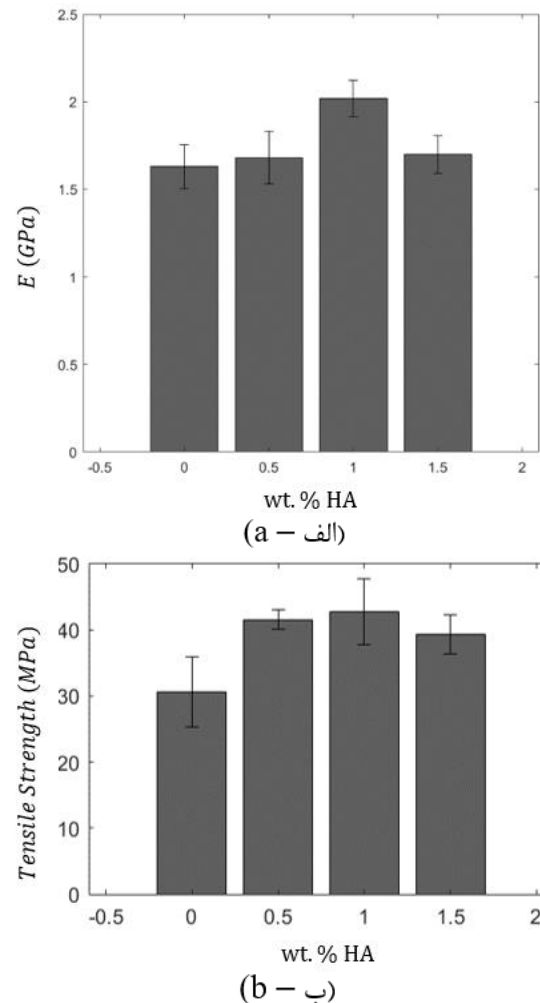


Fig. 5 (a) Young's modulus (b) ultimate strength. Result of simple tensile test

شکل 5 (الف) مدول یانگ (ب) استحکام نهایی. حاصل از آزمون کشش ساده

جدول 3 میانگینی از نیروهای حاصل از آزمون کشش و استفاده در شبیه‌سازی خستگی

Table 3 Forces obtained from the tensile test and utilized in fatigue simulation.

درصد وزنی نانوذرات	80 درصد نیروی بیشینه	30 درصد نیروی بیشینه
هیدروکسی آپاتیت	آزمون کشش (N)	آزمون کشش (N)
0%	1360	500
0.5%	1750	620
1%	2450	870
1.5%	2050	720

در شبیه‌سازی اولیه آباکوس مدل تولید شده، در شرایط بارگذاری استاتیکی قرار گرفته و نتایج اولیه برای هر نمونه در درصدهای 0، 0.5، 1، 1.5 حاصل می‌شود. نمونه کانتورهای شبیه‌سازی استاتیک بر روی نمونه‌ی حاوی یک درصد نانوذره با اعمال بار 30 درصد از سطح بیشینه در شکل 6 (الف-a) و با اعمال بار 80 درصد از سطح بیشینه در شکل 6 (ب-b) مشاهده می‌شود.

جدول 5 تعداد سیکل تا نقطه‌ی شکست با اعمال 30 درصد نیروی بیشینه

Table 5 Fonts should be used in Journal of Science and Technology of Composites

درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت	تعداد سیکل (عمر قطعه) با اعمال 30 درصد تنش در Fe-Safe		
%0	38815	37325	36307
%0.5	50257	43451	41975
%1	52480	46558	47533
%1.5	47097	38106	48865

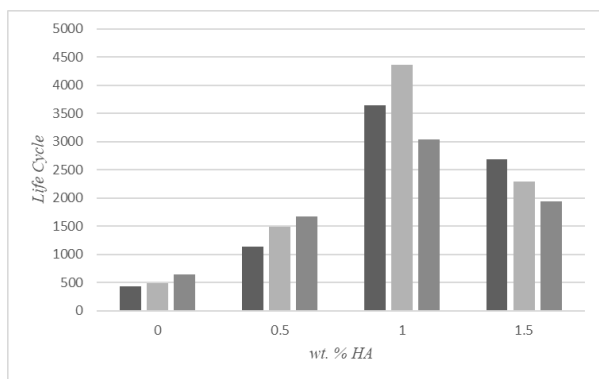


Fig. 9 Cycles to failure of PMMA/HA obtained from Fe-Safe/Abaqus in force-control fatigue (30% of the maximum force of tensile test)

شکل 9 سیکل تا شکست برای 12 نمونه PMMA/HA در 4 درصد وزنی مختلف بدست آمده از Fe-Safe/Abaqus در اثر فرآیند خستگی نیرو کنترل (80 درصد نیروی حداکثری آزمایش کشش - سیکل کم)

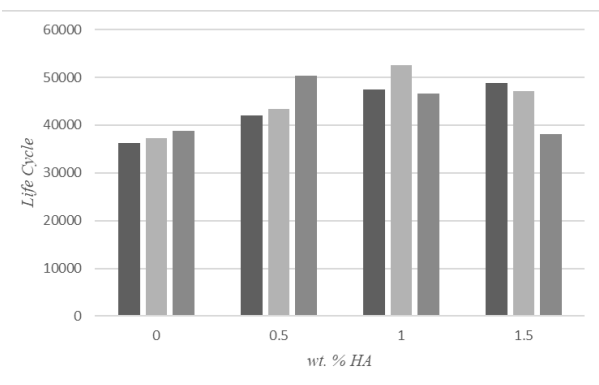


Fig. 10 Cycles to failure of PMMA/HA obtained from Fe-Safe/Abaqus in force-control fatigue (80% of the maximum force of tensile test)

شکل 10 سیکل تا شکست برای 12 نمونه PMMA/HA در 4 درصد وزنی مختلف بدست آمده از Fe-Safe/Abaqus در اثر فرآیند خستگی نیرو کنترل (30 درصد نیروی حداکثری آزمایش کشش - سیکل زیاد)

4- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق، به تحلیل عددی رفتار شکست خستگی پلی متیل متاکریلات تقویت شده با نانوذرات هیدروکسی آپاتیت پرداخته شد. برای بحث تجربی، با استفاده از قالب سیلیکونی، ساخت نمونه‌های پلیمری پلی متیل متاکریلات حاوی ذرات نانوی هیدروکسی آپاتیت سوزنی شکل، در درصد‌های 0، 0.5، 1، 1.5 درصد وزنی، انجام شد. در ابتدا برای داشتن خواص مکانیکی نمونه‌های دندانی آماده شد و استحکام کششی و مدول یانگ بررسی شد. در

نانوذرات، سیکل کاری بالاتر می‌رود. در نمونه‌های 1.5 درصد اما، داده‌هایی مشاهده می‌شود که سیکل کاری کاهش قابل توجهی پیدا کرده که یکی از علت‌های اصلی آن تجمع توده‌ای نانوذرات می‌باشد. در شکل 8 نیز نمونه کانتورهای بدست آمده از Fe-Safe در آباکوس قابل مشاهده است که تعداد سیکل به صورت لگاریتمی نشان داده شده است. اعمال بار متناوب 30 درصد از سطح بیشینه در شکل 8 (ب-ب) مشاهده می‌شود.

در نمودار شکل 9 تعداد سیکل تا نقطه‌ی شکست بدست آمده از نرم افزار Fe-Safe که نتایج آن در شکل‌های آباکوس و جدول 4 و 5 نیز نوشته شده، مشاهده می‌شود. این نمودار همانطور که اشاره شد برای فرآیند خستگی بر اساس نیرویی مطابق سی درصد تنش بیشینه برای دست‌یابی به سیکل‌های بالاتر، رسم شده است. در نمودار شکل 10 نیز همین نمودار برای نیرویی برابر با هشتاد درصد تنش بیشینه و سیکل پایین‌تر، رسم شده است.

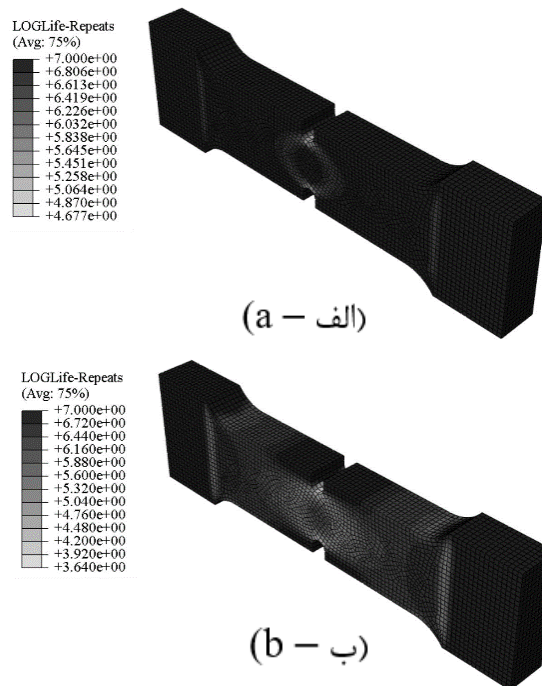


Fig. 8 Contour from fatigue loading on the sample containing 1% nanoparticles with two controlled forces. (a) 30% of Max. load. (b) 80% of Max. load.

شکل 8 نمونه کانتور حاصل از بارگذاری خستگی روی نمونه‌ی حاوی یک درصد نانوذره با دو نیروی کنترل شده. (الف) 30 درصد نیروی بیشینه. (ب) 80 درصد نیروی بیشینه

جدول 4 تعداد سیکل تا نقطه‌ی شکست با اعمال 80 درصد نیروی بیشینه

Table 4 Fonts should be used in Journal of Science and Technology of Composites

درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت	تعداد سیکل (عمر قطعه) با اعمال 80 درصد سطح تنش در Fe-Safe		
%0	495	443	638
%0.5	1485	1140	1671
%1	3639	3033	4365
%1.5	2296	1945	2710

- [11] Díez-Pascual, A. M., "Pmma-Based Nanocomposites for Odontology Applications: A State-of-the-Art" International Journal of Molecular Sciences, Vol. 23, No. 18, pp. 10288, 2022.
- [12] Liu, W., Yao, X. and Chen, X., "A Local Stress Approach to Predict the Fatigue Life of the U-Notched Pmma Plate at Different Temperatures" International Journal of Fatigue, Vol. 103, pp. 436-443, 2017.
- [13] Liu, W., Yao, X., Ma, Y., Chen, X., Guo, G. and Ma, L., "Prediction on Fatigue Life of U-Notched Pmma Plate" Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 40, No. 2, pp. 300-312, 2017.
- [14] Abbod, E. A., Al-Waily, M., Al-Hadrayi, Z. M., Resan, K. K. and Abbas, S. M., "Numerical and Experimental Analysis to Predict Life of Removable Partial Denture" in Proceeding of IOP Publishing, pp. 012149.
- [15] Al-Waily, M., Al Saffar, I. Q., Hussein, S. G. and Al-Shammari, M. A., "Life Enhancement of Partial Removable Denture Made by Biomaterials Reinforced by Graphene Nanoplates and Hydroxyapatite with the Aid of Artificial Neural Network" Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, Vol. 43, No. 6, pp. 269-285, 2020.
- [16] Paz, E., Ballesteros, Y., Abenojar, J., Del Real, J. and Dunne, N. J., "Graphene Oxide and Graphene Reinforced Pmma Bone Cements: Evaluation of Thermal Properties and Biocompatibility" Materials, Vol. 12, No. 19, pp. 3146, 2019.
- [17] Ali, U., Karim, K. J. B. A. and Buang, N. A., "A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate)(Pmma). Polymer Rev" Polymer Reviews, Vol. 55, pp. 678-705, 2015.
- [18] Kattimani, V. S., Kondaka, S. and Lingamaneni, K. P., "Hydroxyapatite—Past, Present, and Future in Bone Regeneration" Bone and Tissue Regeneration Insights, Vol. 7, pp. BTRL S36138, 2016.
- [19] Hadizadeh, E., "The Effect of the Amount of Benzoyl Peroxide on the Physical and Mechanical Properties of Two-Component Traffic Coating Based on Pmma Resin." Polymer science and technology, Vol. 30, No. 6, pp. 547-555, 1396.
- [20] Harper, E., Behiri, J. and Bonfield, W., "Flexural and Fatigue Properties of a Bone Cement Based Upon Polyethylmethacrylate and Hydroxyapatite" Journal of Materials Science: Materials in Medicine, Vol. 6, No. 12, pp. 799-803, 1995.
- [21] Ayatollahi, M. R., Mirmohammadi, S. A. and Shirazi, H. A., "The Tension-Shear Fracture Behavior of Polymeric Bone Cement Modified with Hydroxyapatite Nano-Particles" Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 50-59, 2018.

نهایت با داشتن خواص مکانیکی هر نمونه، برای شبیه‌سازی فرآیند خستگی و پیش‌بینی تعداد سیکل‌های کاری تا لحظه‌ی شکست نیز مدلی در آباکوس ساخته شد و به صورت استاتیکی در آباکوس و دینامیکی در نرم‌افزار Fe-Safe مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج مهم بدست آمده بیان خواهند شد:

- با افزودن نانوذره HA به PMMA، بهبود خواص مکانیکی را شاهد بودیم اما در برخی نمونه‌های حاوی مقداری بیشتر HA در 1.5 درصد وزنی، مدول یانگ و استحکام کششی کاهش یافت.
- عمر و تعداد سیکل کاری تا لحظه‌ی شکست در PMMA خالص با افزایش درصد نانوذره HA به صورت چشمگیری افزایش یافته و به خوبی عمر کاری را بهبود می‌بخشد. اما باز هم در درصدهای جرمی بالاتر نانوذره می‌توانیم ببینیم که در برخی نمونه‌ها کمی تعداد سیکل کاری تا نقطه‌ی شکست، به علت کلوخه شدن و تمرکز نانوذرات در یک نقطه، کاهش پیدا می‌کند.
- علت کاهش مدول یانگ، استحکام کششی و عمر کاری در درصدهای بالاتر جرمی نانوذره، به ساخت نمونه‌ها باز می‌گردد. توزیع نانوذرات در حالت ایده‌آل به صورت کاملاً تصادفی در سطح ماده است اما در شرایط آزمایشگاهی ممکن است با وجود استفاده از التراسونیک و همزن‌های مناسب، همچنان آگلومره شدن اتفاق بیافتد و در برخی قسمت‌ها توده‌ی کوچکی از نانوذرات تشکیل شوند که باعث کاهش بهبود خواص مکانیکی می‌شوند.

5- مراجع

- [1] Safarabadi, M., Khansari, N. and Rezaei, A., "An Experimental Investigation of Ha/Al₂O₃ Nanoparticles on Mechanical Properties of Restoration Materials" Engineering Solid Mechanics, Vol. 2, No. 3, pp. 173-182, 2014.
- [2] Parva Hosseini, A. C., "Experimental and Numerical Fracture Analysis of Polymethylmethacrylate under Mixed-Mode" Amirkabir Mechanical Engineering Journal, Vol. 51, No. 5, pp. 1077-1088, 2019.
- [3] Mousavi, A., Aliha, M. and Imani, D., "Effects of Biocompatible Nanofillers on Mixed-Mode I and II Fracture Toughness of Pmma Base Dentures" Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, Vol. 103, pp. 103566, 2020.
- [4] Aliha, M. R., Mousavi, A., Mehri Khansari, N. and Safarabadi, M., "Effects of Alumina and Hydroxyapatite Nanoparticles on Fracture Toughness of Pmma Based Dental Composite" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 2, pp. 9-16, 2015.
- [5] Ayatollahi, M., Aliha, M. and Hassani, M., "Mixed Mode Brittle Fracture in Pmma—an Experimental Study Using Scb Specimens" Materials Science and Engineering: A, Vol. 417, No. 1-2, pp. 348-356, 2006.
- [6] Fathi, M., "Fabrication, Characterization and Comparative Evaluation of Nanostructured Hydroxyapatite Bioactivity" Advanced materials in engineering, No. 2, pp. 1-0, 1390.
- [7] ES, B. S. P. A. T., "Bioceramics: Past, Present and for the Future J Eur Ceram Soc 281319 2008. 3. Best, Sm, Porter, Ae, Thian, Es, and Huang, J. Bioceramics: Past, Present and for the Future" J Eur Ceram Soc, Vol. 28, pp. 1319, 2008.
- [8] SM, Zebardast, S., "A Study on Mechanical Properties of Pmma/Hydroxyapatite Nanocomposite" Engineering, Vol. 2011, 2011.
- [9] Chow, W., Tay, H., Azlan, A. and Ishak, Z. M., "Mechanical and Thermal Properties of Hydroxyapatite Filled Poly (Methyl Methacrylate) Composites" in Proceeding of.
- [10] Tham, W., Chow, W. and Ishak, Z. M., "Simulated Body Fluid and Water Absorption Effects on PMMA/HA Denture Base Composites" Express polymer letters, Vol. 4, No. 9, 2010.



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

* صندوق پستی 16846-13114، پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

چکیده (سبک عنوان چکیده)

اطلاعات مقاله:

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان (استایل عنوان کلید واژگان)

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

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

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

Name 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)

1-مقدمه (سبک 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
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، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:
Paste option → match with Destination format

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

³ Style

¹ Template

² Paste

Please cite this article using:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "Feasibility of Production of an Iron-base Metal Matrix Composite by Infiltration of molten Gray Cast Iron into a 304 Stainless Steel Porous Skeleton", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1479-1493, 2021. https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.527470.1715

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

Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position

محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف می‌شوند.

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

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن^۲ با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین^۳) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

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

در کلیه محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد.

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

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

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

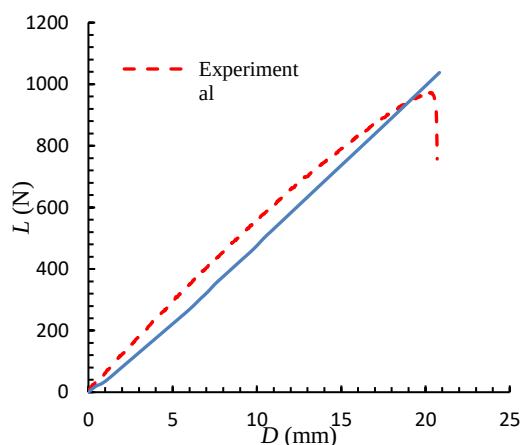


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی ۵ میلی‌متر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

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

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

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

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

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

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

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی^۱ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به‌کار 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 ۱۰۲ صحیح و ۱/۲ غلط می‌باشد.

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

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

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

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

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

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

¹ English (Style: Sub Title)

² Times New Roman

³ Gridlines

2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

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

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

جدول 1 اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

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

^(*) 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 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 سطری 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 املای زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

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

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

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

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

³ Math Type

¹ Insert -> Symbols -> Equation

² Cambria Math

تذکر: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت¹ در نرم‌افزار اندنُت² استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت 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.

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

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

5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

E مدول یانگ (Nm^{-2})

P نیرو (Nm^{-2})

T دما (K)

علایم یونانی

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 علایم 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 کروه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجدداً 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.

³ Language

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote