



شبیه‌سازی اجزا محدود دستگاه تست هایپکینسون نوع فشاری برای بررسی رفتار دینامیکی مواد کامپوزیتی

مریم محمدزاده¹، بهنام داودی^{2*}

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

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

* تهران، صندوق پستی 163-16765، bdavoodi@iust.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>کامپوزیت‌ها به دلیل استحکام بالا و وزن کم در انواع مختلفی از سازه‌ها از جمله توربین‌ها، موشک‌ها، اتومبیل‌ها و موارد دیگر کاربرد دارند و ممکن است تحت بارگذاری دینامیکی قرار گیرند. بنابراین به منظور طراحی مناسب سازه، اطلاع از رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی در بارگذاری‌های دینامیکی مهم می‌باشد. دستگاه تست هایپکینسون فشاری ابزاری بسیار مناسب برای مطالعه‌ی رفتار دینامیکی مواد در نرخ کرنش‌های بالا می‌باشد. در این مقاله اصول طراحی دستگاه هایپکینسون فشاری برای نمونه‌های کامپوزیتی بررسی و به منظور تعیین رفتار دینامیکی اینگونه مواد، این دستگاه در کد تجاری آباکوس شبیه‌سازی شده است. رفتار نمونه‌ی کامپوزیتی S-2 glass/sc15 epoxy در جهت ضخامت توسط دستگاه هایپکینسون فشاری طراحی شده شبیه‌سازی شده است. برای ایجاد شکل موج حادثه مناسب و برقراری شرط نرخ کرنش ثابت و تعادل تنش دینامیکی، پارامترهای تاثیرگذار از جمله قطر و ضخامت شکل دهنده پالس و طول میله‌ی ضربه‌زن مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با مقایسه‌ی امواج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی این نمونه کامپوزیتی، شبیه‌سازی دستگاه هایپکینسون فشاری صحت سنجی شده است. در نهایت با استفاده از شکل دهنده موج از جنس مس با ابعاد مناسب، موج حادثه مناسب برای نمونه S-2 glass/sc15 epoxy در دو نرخ کرنش 550 s^{-1} و 2250 s^{-1} ایجاد شده است که شرایط نرخ کرنش ثابت و تعادل دینامیکی در دو نرخ کرنش برقرار شده است.</p>	<p>دریافت: 1399/07/12 پذیرش: 1399/11/10 کلیدواژگان: دستگاه تست هایپکینسون فشاری، رفتار دینامیکی کامپوزیت، نرخ کرنش بالا، شکل دهنده پالس، کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy</p>

Finite element simulation of Hopkinson compression test to investigate the dynamic behavior of composite materials

Maryam Mohamadzadeh, Behnam Davoodi*

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

* P. O. Box 16765-163, Tehran, Iran, bdavoodi@iust.ac.ir

Keywords

Compression Hopkinson test,
 Dynamic behavior of composite,
 high strain rate,
 pulse shaper,
 S-2 glass/sc15 epoxy composite

Abstract

Due to their high strength and low weight, composites are used in various structures, including turbines, missiles, cars, and more, and maybe subjected to dynamic loading. Therefore, to properly design the structure, it is crucial to know the mechanical behavior of composite materials in dynamic loads. The Hopkinson compression tester is a useful tool for studying the dynamic behavior of materials at high strain rates. In this paper, the Hopkinson compression system's design principles for composite samples are mentioned, and to determine the dynamic behavior of such materials, this system by ABAQUS software. The behavior of the S-2 glass/sc15 epoxy composite sample in the thickness direction is simulated by a compression Hopkinson system. To create an appropriate incident waveform and to establish the condition of constant strain rate and dynamic stress equilibrium, effective parameters of pulse shaper included diameter, thickness, and the length of the sticker bar was investigated. By comparing the waves obtained from the simulations with the experimental results of this composite sample, the compression Hopkinson simulation has been validated. Finally, using a copper pulse shaper with appropriate dimensions, the appropriate incident wave for the S-2 glass / sc15 epoxy sample is created at two strain rates of 550 and 2250. The conditions of constant strain rate and dynamic equilibrium are established in two strain rates

1- مقدمه

مختلف است. روش‌های مختلف برای به‌دست آوردن مشخصه‌های مواد دارای مزیت‌ها و محدودیت‌های متفاوتی هستند و برای ارائه نتایج خوب و قابل استناد باید دستگاه و روش آزمایش به طور مناسب انتخاب شود [1]. روش دینامیکی مورد استفاده برای توصیف مواد کامپوزیتی در این تحقیق، آزمایش

در گذشته از کامپوزیت‌ها بیشتر در ساخت سازه‌های ثانویه (فرعی) استفاده می‌شد. طراحی قابل‌اعتماد سازه‌ها یا اجزای کامپوزیتی در برابر بارهای ضربه‌ای، مستلزم به دست آوردن خواص مواد کامپوزیتی در نرخ‌های کرنش

Please cite this article using:

Mohamadzadeh, M., Davoodi, B., "Finite element simulation of Hopkinson compression test to investigate the dynamic behavior of composite materials", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1263-1270, 2021.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

می‌شود. این موج حادثه باعث ایجاد موج کششی منعکس شده در میله‌ی حادثه و یک موج فشاری منتقل شده در میله‌ی انتقال می‌شود. با استفاده از کرنش‌سنج بر روی دو میله‌ی فشار، این سه موج ضبط می‌شوند و توسط رابطه‌های (1)، (2) و (3) به ترتیب تنش، کرنش و نرخ کرنش در نمونه محاسبه می‌شوند. زیروندهای I ، R و T ، به ترتیب نمایانگر موج‌های حادثه، منعکس‌شده و منتقل‌شده هستند. مدت بارگیری ($T_{loading}$)، مدت انتقال موج (T_{IB}) و کرنش (ϵ_I) در میله حادثه که به ترتیب توسط رابطه‌های (4)، (5) و (6) به دست می‌آیند، اغلب به عنوان کالیبراسیون برای آزمایش هایپکینسون استفاده می‌شوند [7، 8]. در این روابط A_B و A_S به ترتیب سطح مقطع میله‌ها و نمونه، E_B (Pa) مدول الاستیک میله، C (m/s) سرعت موج الاستیک در میله‌ها و v_{st} سرعت میله ضربه‌زن می‌باشد. همچنین L_{ST} و L_{IB} طول میله‌های ضربه‌زن و حادثه می‌باشند.

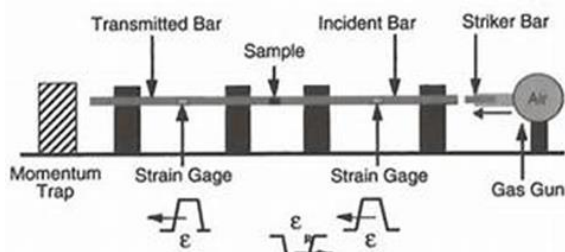


Fig 1 Schematic of the split Hopkinson pressure bar test [9]

شکل 1 شماتیک دستگاه تست هایپکینسون فشاری [9]

$$\sigma = \frac{A_B}{A_S} E_B \epsilon_T \quad (1)$$

$$\epsilon = -2 \frac{C_B}{L_S} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = -2 \frac{C_B}{L_S} \epsilon_R \quad (3)$$

$$T_{loading} = \frac{2L_{ST}}{C_{st}} \quad (4)$$

$$T_{IB} = \frac{L_{IB}}{C_{IB}} \quad (5)$$

$$\epsilon_I = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{C_B} \quad (6)$$

2- اصول طراحی دستگاه هایپکینسون

میله‌های فشار استفاده شده در دستگاه هایپکینسون هم قطر یا یکدیگر بوده و معمولاً از یک ماده الاستیکی با استحکام بالا ساخته می‌شوند. برای انتشار یک بعدی موج در طول میله‌های فشار باید حداقل نسبت طول به قطر برابر 10 باشد. همچنین برای این که موج ضربه و موج برگشتی تداخل نداشته باشند باید نسبت طول به قطر بیشتر از 20 باشد. علاوه بر این، برای کرنش‌های بالاتر از 30٪ لازم است که نسبت طول به قطر میله‌ها 100 و یا بیشتر شود [8].

در این پژوهش دستگاه هایپکینسون فشاری از جنس فولاد مارچینگ با میله‌های ضربه‌زن، حادثه و انتقال به ترتیب با طول‌های 100، 600 و 600

و میله‌های هایپکینسون فشاری¹ است. دستگاه هایپکینسون به منظور تولید نتایج دقیق و تکرار شونده، نیاز به طراحی بسیار دقیق دارد. طراحی آزمایش باید بر اساس ماده مورد آزمایش اصلاح شود. بنابراین، به طور کلی طراحی و ساخت دستگاه تست هایپکینسون برای یک بازه تحقیقاتی خاص است [2]. تعداد کمی از تست‌های تجاری در دسترس وجود دارند که معمولاً با هزینه قابل‌توجهی همراه هستند. برای کاهش هزینه، ابتدا شبیه‌سازی اجزای محدود² آزمایش انجام و در صورت صحت نتایج ساخت دستگاه انجام می‌شود.

سانگ³ و همکاران [3] در سال 2003 و تاسدمرچی⁴ و هال⁵ [4] در سال 2006 رفتار مکانیکی کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy توسط دستگاه هایپکینسون فشاری در نرخ کرنش بالا را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که حساسیت به نرخ کرنش در جهت ضخامت بیشتر از جهت درون صفحه‌ای است. همچنین دریافتند که به علت رفتار خطی این کامپوزیت، شکل پالس‌های حادثه، منعکس‌شده و انتقال مشابه با رفتار مواد شکننده است. در سال 2015 آریاوی⁶ و همکاران [5] رفتار مکانیکی کامپوزیت E-glass/vinylester را با هندسه مکعب در دو جهت بارگذاری درون صفحه‌ای و ضخامت توسط دستگاه هایپکینسون فشاری بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که قبل از آسیب مدول الاستیک ثابت بوده و با افزایش نرخ کرنش سطح تنش بالا رفته است. هو⁷ و همکاران [6] در سال 2018 تأثیر نرخ کرنش برای کامپوزیت Flax-epoxy یافته شده در دو جهت درون صفحه‌ای و ضخامت را توسط دستگاه هایپکینسون بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که با افزایش نرخ کرنش حساسیت به نرخ کرنش در جهت صفحه‌ای بیشتر است. همچنین از شکل موج‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزا محدود مشخص شد که این کامپوزیت موج‌هایی شبیه به مواد نرم دارند چرا که موج حادثه و موج منعکس‌شده شبیه به هم هستند.

در این پژوهش تست نمونه کامپوزیتی طراحی شده S-2 glass/sc15 epoxy با رفتار مشابه با مواد ترد، توسط دستگاه هایپکینسون فشاری طراحی‌شده با استفاده از کد تجاری اجزا محدود آباکوس⁸ صریح (اکسپلیسیت)⁹ شبیه‌سازی عددی شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آزمایش‌های انجام‌شده روی این کامپوزیت‌ها مقایسه شده است.

1- دستگاه هایپکینسون فشاری

دستگاه تست هایپکینسون دو میله‌ای نوع فشاری که برای اولین بار توسط کولسکی ساخته شد، ابزاری بسیار مناسب برای مطالعه‌ی رفتار دینامیکی مواد در کرنش‌های زیاد و نرخ کرنش‌های بالا (در محدوده بین $10^2 s^{-1}$ تا $10^4 s^{-1}$) می‌باشد. این دستگاه از سه میله‌ی ضربه‌زن¹⁰، حادثه¹¹ و انتقال¹² تشکیل شده است و نمونه بین میله‌های حادثه و انتقال قرار می‌گیرد. در شکل 1 نمایی از این دستگاه نشان داده شده است. پس از برخورد میله‌ی ضربه‌زن به انتهای آزاد میله‌ی حادثه، موج فشاری حادثه در میله حادثه ایجاد

¹ Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

² Finite Element Method (FEM)

³ Song

⁴ Tasdemirci

⁵ Hall

⁶ Arbaoui

⁷ Hu

⁸ ABAQUS

⁹ Explicit

¹⁰ Striker bar

¹¹ Incident bar

¹² Transmitted bar

تاریخی، نمونه‌های استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم² در آزمایش میله هاپکینسون برای فلزات و نمونه‌های منشور مربعی³ یا نمونه‌های منشور مستطیلی⁴ برای کامپوزیت‌ها نیز استفاده می‌شوند [8].

1-1-4- هندسه استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم

میله‌های سنتی هاپکینسون از میله‌های استوانه‌ای دایره‌ای بلند و راست ساخته شده‌اند. نمونه استوانه‌ای دایره‌ای راست در محور Z در سیستم مختصات استوانه‌ای متقارن است و نسبت به هر هندسه نمونه دیگر ارجحیت دارد. مواد کامپوزیت با تقارن استوانه‌ای را می‌توان با استفاده از هندسه استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم، آزمایش کرد. به عنوان مثال همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است می‌توان از کامپوزیت تک جهت⁵ در جهت فیبر (جهت مواد 1)، کامپوزیت‌های شبه ایزوتروپیک⁶ در جهت ضخامت (جهت ماده 3) و کامپوزیت‌های چند لایه متقاطع⁷ که دارای دو صفحه (صفحه‌های 1-3 یا X-Z و 2-3 یا Y-Z) متقارن هستند و از محور Z عبور می‌کنند در جهت ضخامت (جهت 3) با هندسه استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم برای آزمایش هاپکینسون استفاده کرد. هندسه استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم را نمی‌توان در تست کامپوزیت‌های تک جهت عرضی به جهت الیاف (جهت 2) و ضخامت (جهت 3) و کامپوزیت‌های چند لایه را در جهت داخل صفحه‌ای (جهت 1 و 2) استفاده کرد [8].

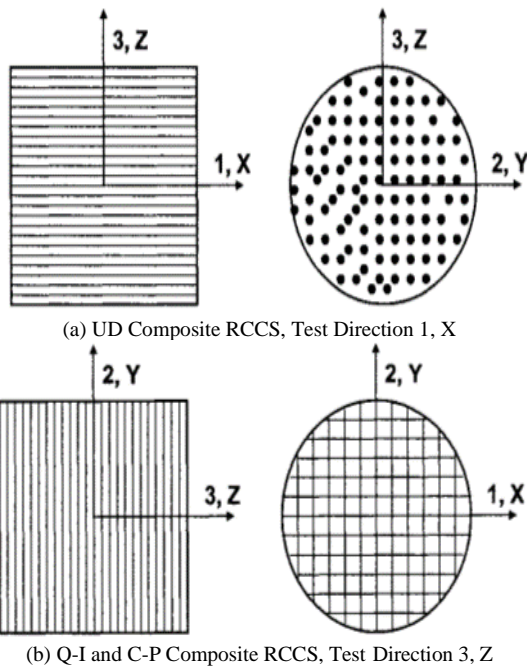


Fig 2 RCCS Geometries for Composite Testing with Compression Hopkinson system [8]

شکل 2 هندسه‌های استوانه‌ای دایره‌ای مستقیم برای تست کامپوزیت با دستگاه هاپکینسون فشاری [8]

میلی‌متر و قطر 10 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات فولاد مارچینگ در جدول 1 ذکر شده است. اگر سرعت میله ضربه‌زن را 30 m/s در نظر گرفته شود، مقدار تقریبی کرنش نمونه در حدود 30٪ می‌شود که با توجه به این که طول میله‌ها تقریباً 1/3 طول میله‌های رایج است، مقدار قابل قبولی می‌باشد. همچنین شکل‌دهنده‌ی پالس به کار برده شده با ابعاد مختلف در این شبیه‌سازی از جنس مس در نظر گرفته شده است. خواص الاستیک و ضرایب مدل جانسون کوک¹ آن به ترتیب در جدول 1 و جدول 2 ذکر شده است.

جدول 1 مشخصات فولاد مارچینگ و مس [10, 11]

Table 1 properties of maraging steel and copper [10, 11]

پارامتر	نماد	فولاد مارچینگ	مس
مدول الاستیک	E (GPa)	190	129
چگالی	ρ (kg/m ³)	7980	8960
ضریب پواسون	ν	0.3	0.3
سرعت موج الاستیک	C (m/s)	4879.5	-

جدول 2 ضرایب مدل جانسون کوک مس [12]

Table 2 Jonson cook model coefficient of copper [12]

مقدار	ضرایب جانسون کوک
90	A (MPa)
292	B (MPa)
0.31	n
1.09	m
0.025	C
1356	Melting temp (K)

3- اصول طراحی نمونه‌های کامپوزیتی

کامپوزیت‌ها مواد پیشرفته‌ای هستند که در آن‌ها از ترکیب مواد ساده به منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. اصول طراحی نمونه‌های کامپوزیتی برای آزمایش هاپکینسون بر اساس هندسه و نوع رفتار متفاوت می‌باشد.

1-4- اصول طراحی نمونه‌های کامپوزیتی بر اساس هندسه

در یک آزمایش هاپکینسون، هنگامی که یک نمونه در معرض بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد، اینرسی محوری و شعاعی نمونه و اصطکاک بین سطوح میله و نمونه مهم می‌شود. محققان هندسه نمونه را که موثر در به حداقل رساندن این تأثیرات بوده است، مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که نسبت ضخامت به قطر (L/D) تقریباً یک، اینرسی را در نمونه‌های فلزی الاستیک پلاستیک به حداقل می‌رساند [13]. از لحاظ

¹ Parameters of Johnson-Cook strength model

² Right Circular Cylindrical Specimen (RCCS)

³ Square Prism Specimen (SPS)

⁴ Rectangular Prism Specimen (RPS)

⁵ Uni-Directional (UD)

⁶ Quasi-Isotropic (Q-I)

⁷ Cross-Ply (C-P)

2-1-4- هندسه منشور مربعی و منشور مستطیلی

کامپوزیت‌های تک جهت و چند لایه متقاطع نیز دارای سه صفحه متقارن هستند، یعنی صفحه‌های 1-3 یا X-Z، 2-3 یا Y-Z و 1-2 یا X-Y. محققان دریافتند که کامپوزیت‌ها با هندسه‌ی منشور مربعی یا منشور مستطیلی در آزمایش از همه جهات مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، این هندسه‌های نمونه به طور کلی قابل قبول نیستند زیرا به دلیل این واقعیت است که تغییر شکل غیر مسطح صفحه بین میله و نمونه ممکن است باعث مود شکست غیر قابل قبول شود [7].

2-2-4- اصول طراحی نمونه‌های کامپوزیتی بر اساس رفتار

مواد کامپوزیتی که از ترکیب مواد مختلف (فلزی، سرامیکی یا پلیمری) ساخته می‌شوند رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. از این رو، بسته به این که نمونه‌ی کامپوزیتی رفتار شکننده، نرم یا منعطف دارد، طراحی متفاوتی نیاز است.

1-2-4- رفتار مانند مواد ترد

کامپوزیت‌ها با رفتار ترد گونه، تحت فشار به صورت تقریباً خطی الاستیک تغییر شکل می‌دهند و در مقادیر کرنش کوچک، شکست می‌خورند. از این رو این کامپوزیت‌ها باید در معرض بارگذاری موج مثلثی یا دوزنقه‌ای، که بخش بارگذاری آن خطی است، قرار بگیرند تا شرایط تنش متعادل دینامیکی و تغییر شکل یکنواخت با کرنش نرخ ثابت برقرار شود. براساس تحقیقات محققین، معمولاً از نمونه‌ی شکننده به حالت سیلندر معمولی دایره‌ای مستقیم استفاده می‌شود. برای تعیین ابعاد نمونه استوانه‌ای، نیاز است که مقاومت تقریبی نمونه از طریق آزمایش‌های شبه استاتیک یا با یک آزمایش مقدماتی هاپکینسون روی همان ماده یا مشابه آن تخمین زده شود. همچنین قطر تقریبی نمونه توسط رابطه‌ی (7) محاسبه می‌شود که تنش در میله انتقال باید کمتر از 7/30 استحکام تسلیم میله باشد. موج تنش حادثه بیشتر از موج انتقال خواهد بود؛ بنابراین حتی اگر فقط 30 درصد از استحکام تسلیم در میله انتقال بارگیری شود، باید مراقب بود که میله حادثه تسلیم نشود و موج حادثه باید اندکی پس از شکست نمونه خاتمه یابد. برای تصمیم‌گیری در مورد ضخامت نمونه نه تنها اثرات نهایی، بلکه باید اثرات تعادل تنش دینامیکی در سراسر نمونه و سطح کرنش، در نظر گرفته شود [14].

$$d_s = \sqrt{\frac{0.3 \times S_{YB}}{S_{CS}}} d_B \quad (7)$$

d_s ، d_B و S_{CS} به ترتیب قطر نمونه و میله و استحکام تسلیم میله و استحکام فشاری نمونه هستند.

2-2-4- رفتار مانند مواد نرم

در کامپوزیت‌هایی با رفتار نرم، موج حادثه باید در مراحل اولیه‌ی بارگیری، بارگیری نسبتاً کمی داشته باشد تا تعادل تنش در نمونه برقرار شود و اینرسی ناشی از شتاب به حداقل برسد. همچنین زمان در اوج بودن موج حادثه باید از

5- شبیه‌سازی المان محدود

در این شبیه‌سازی، محور طولی میله‌ها محور هندسی Z در نظر گرفته شده است و سطح مقطع میله‌ها و نمونه در صفحه‌ی X-Y رسم شده است و به دلیل تقارن اجزا در دو صفحه‌ی X-Z و Y-Z، یک چهارم مدل با شرایط مرزی مناسب در صفحه‌های متقارن مورد استفاده قرار گرفته است. میله‌ها طی

طریق شکل‌گیری موج به میزان قابل توجهی افزایش یابد. برای به حداقل رساندن اینرسی محوری و شعاعی، طول و قطر نمونه باید به درستی طراحی شوند. هنگام آزمایش روی مواد نرم، اینرسی به دلیل استحکام کم مواد نرم، شدیدتر می‌شود. بسیاری از مواد نرم قادر به تغییر شکل بزرگ در فشرده‌سازی محوری هستند در حالی که انبساط زیادی در امتداد شعاع رخ می‌دهد. در یک آزمایش هاپکینسون، سطح مقطع نمونه (یا قطر) نباید از میله‌ها تجاوز کند. برای اطمینان از بیرون زدن نمونه نرم در قسمت انتهایی میله حداکثر قطر مجاز آن در هنگام تغییر شکل، قطر میله است. حداکثر قطر نمونه اصلی (d_0)، برای کرنش مورد نظر نمونه (ϵ_E) و قطر میله (d_{bar})، به صورت رابطه (8) محاسبه می‌شود [15].

$$d_0 = d_{bar} \sqrt{1 - \epsilon_E} \quad (8)$$

3-2-4- رفتار مانند مواد منعطف

مواد انعطاف‌پذیر در ابتدا بصورت الاستیک تغییر شکل می‌یابند و سپس بصورت پلاستیک به کرنش‌های بزرگ تغییر می‌کنند. استحکام مواد در کشش و انعطاف‌پذیری کاملاً متفاوت است. طراحی آزمایش ممکن است در پاسخ الاستیک یا پلاستیک متمرکز باشد، اما بیشتر در حالت دوم است. پیش از تسلیم، بیشتر مواد منعطف مانند مواد شکننده و دارای سفتی بالا رفتار می‌کنند. روش هاپکینسون برای توصیف مواد شکننده در توصیف پاسخ الاستیک مواد منعطف کاربرد دارد. از آنجا که هدف ما توصیف مواد کامپوزیتی با رفتاری مشابه مواد منعطف هست و کامپوزیت‌ها رفتار پلاستیک ندارند پس برای مواد قابل انعطاف در محدوده رفتار الاستیک مانند مواد شکننده عمل می‌کنیم. در کامپوزیت‌هایی با رفتار منعطف، به منظور دستیابی به نرخ کرنش ثابت در آزمایش‌های هاپکینسون، موج حادثه باید دارای پروفایل شبیه به موج منتقل شده باشد و نرخ اولیه بارگیری آن کم باشد [7].

4- ماده

در این پژوهش، نمونه کامپوزیتی S-2 glass/sc15 epoxy که رفتاری مشابه مواد ترد دارد در نظر گرفته شده است. این کامپوزیت از 58 لایه الیاف شیشه‌ی S-2 و رزین اپوکسی SC15 در دو جهت 0 و 90 درجه به صورت استوانه‌ای به قطر 7 میلی‌متر و طول 3.5 میلی‌متر تشکیل شده است. مشخصات مکانیکی این کامپوزیت در جدول 3 ذکر شده است.

الیاف شیشه‌ای به کار رفته در این کامپوزیت باعث استحکام و شکننده شدن آن می‌شود؛ بنابراین طبق آنچه که گفته شد، باید موج‌های حاصل از آزمایش هاپکینسون فشاری مشابه با نتایج آزمایش مواد شکننده باشند. برای رسیدن به این هدف نیاز است که موج حادثه‌ی حاصل از برخورد میله‌ی ضربه‌زن به میله حادثه به صورت مثلثی یا دوزنقه‌ای، باشد تا بخش بارگذاری آن خطی شود. چرا که این مدل برای موج حادثه به تولید سریع تعادل تنش در نمونه کمک می‌کند.

5- عوامل تاثیر گذار بر شکل موج حادثه

موج حادثه در وسط میله حادثه و روی سطح خارجی آن اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای مؤثر بر شکل موج حادثه عبارتند از: ضخامت اولیه شکل‌دهنده‌ی پالس (h)، قطر اولیه شکل‌دهنده‌ی پالس (D) و طول میله ضربه‌زن (L_{st}) [11].

1-7- ضخامت شکل‌دهنده پالس

در شکل 5 نتایج شبیه‌سازی اثر ضخامت شکل‌دهنده پالس دیسکی بر شکل موج حادثه در آزمایش هاپکینسون فشاری نشان داده شده است. در این نمودار سرعت میله ضربه‌زن 20 متر بر ثانیه و طول آن 100 میلی‌متر بوده و از شکل‌دهنده‌ی پالس‌های دیسکی با قطر 4 میلی‌متر استفاده شده است. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت، زمان اوج موج حادثه و طول موج حادثه افزایش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش ضخامت، تغییر شکل در شکل‌دهنده‌ی پالس در زمان بیشتری انجام می‌شود. هرچه طول میله‌ی ضربه‌زن بیشتر باشد نیاز است که شکل‌دهنده‌ی پالسی با ضخامت بیشتر انتخاب شود. با توجه به مقایسه‌ی بین شکل‌دهنده‌ی پالس‌ها با ضخامت‌های متفاوت ضخامت 1/5 میلی‌متر، ضخامت مناسبی به نظر می‌رسد.

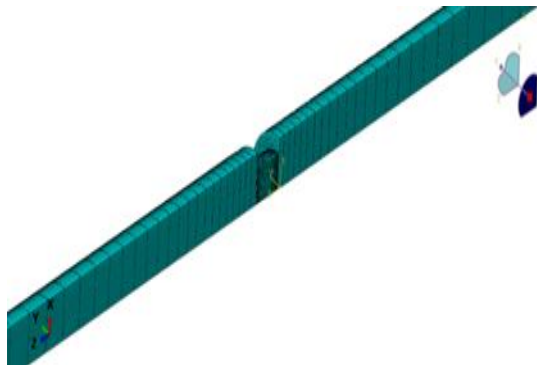


Fig 3 View of the meshes of the bars

شکل 3 نمایی از مش‌بندی میله‌ها

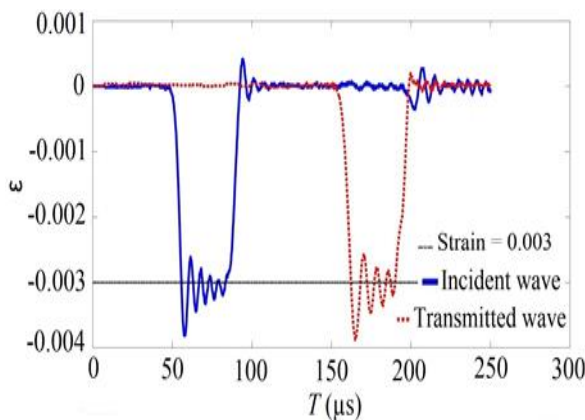


Fig 4 Strain-time curve obtained from simulation without the presence of a sample

شکل 4 منحنی کرنش-زمان حاصل از شبیه‌سازی بدون حضور نمونه

انجام آزمایش هاپکینسون فشاری الاستیک باقی می‌ماند. بنابراین، یک مدل مواد ایزوتروپیک الاستیک خطی برای میله‌ها در نظر گرفته شده است. نمونه‌ی کامپوزیتی به صورت ماده الاستیک و پلاستیک ایزوتروپیک عرضی مدل‌سازی شده است.

جدول 3 مشخصات مکانیکی S-2 glass/sc15 epoxy [16]

Table 3 mechanical properties of S-2 glass/sc15 epoxy composite [16]

پارامتر	نماد	مقدار
چگالی	ρ (kg/m ³)	1850
مدول الاستیک در جهت 1	E_1 (GPa)	27.5
مدول الاستیک در جهت 2	E_2 (GPa)	27.5
مدول الاستیک در جهت 3	E_3 (GPa)	11.8
ضریب پواسون 12	ν_{12}	0.11
ضریب پواسون 13	ν_{13}	0.18
ضریب پواسون 23	ν_{23}	0.18
مدول برشی 12	G_{12} (GPa)	2.9
مدول برشی 13	G_{13} (GPa)	2.14
مدول برشی 23	G_{23} (GPa)	2.14

پاسخ قسمت غیر الاستیک کامپوزیت که با استفاده از مدل تسلیم غیر ایزوتروپیک¹ که در آباکوس [11] ساخته شده است، مدل‌سازی شده است. مدل ساختاری سه بعدی دستگاه هاپکینسون فشاری و نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از المان‌های جامد هشت گره ایجاد شده‌اند. در این مطالعه از فرمولاسیون ادغام یک نقطه با کنترل ساعت شنی² برای میله‌ها و نمونه به منظور صرفه‌جویی در وقت محاسباتی استفاده شده است. کرنش‌سنج‌ها در وسط میله‌های حادثه و انتقال توسط پوسته‌هایی با ضخامت ناچیز با استفاده از غشای چهار ضلعی 4 گره و فرمولاسیون کاهش ادغام با کنترل ساعت شنی³ مدل شده‌اند. شرایط برخورد میله‌ها و نمونه به صورت صفحه به صفحه با فرمولاسیون برخورد پنالتی بدون در نظر گرفتن اصطکاک تعریف شده است. تعداد المان‌های میله‌های ضربه‌زن، حادثه و انتقال به ترتیب 22500، 144900 و 144900 می‌باشد. نمایی از المان‌بندی میله‌ها در شکل 3 نشان داده شده است.

برای اطمینان از طراحی انجام شده، میله‌ها بدون حضور نمونه با سرعت ضربه 30 متر بر ثانیه شبیه‌سازی شده‌اند. بر اساس روابط تئوری (4)، (5) و (6) مقادیر مدت بارگیری، مدت انتقال موج و کرنش در میله حادثه به ترتیب 40 میکرو ثانیه، 122 میکرو ثانیه و 0/003 می‌شوند. در شکل 4 موج‌های دوزنقه‌ای نشان داده شده‌اند. از آنجا که میله حادثه به طور مستقیم با میله انتقال در تماس است، پالس حادثه بدون هیچ بازتابی از میله حادثه به میله انتقال منتقل شده و تمامی مقادیر محاسبه شده به روش تئوری هماهنگی خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد.

¹ Anisotropic Yielding Model (AYM)

² C3D8R

³ M3D4R

3-7- طول میله ضربه‌زن

بر اساس تئوری انتشار موج با افزایش طول میله ضربه‌زن، طول موج حادثه به همان نسبت افزایش می‌یابد. شکل 7 موج حادثه حاصل از شبیه‌سازی را در حضور شکل‌دهنده‌ی پالس با قطر 2/5 و ضخامت 1/5 میلی‌متر با سرعت میله ضربه‌زن 30 متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با تغییر طول میله ضربه‌زن، مقدار بیشینه موج تنش تغییر می‌کند و همواره برابر با مقدار بیشینه تئوری نخواهد بود. همچنین شیب موج حادثه به طول میله ضربه‌زن وابسته نمی‌باشد. در این مقایسه مشخص می‌شود، ضربه‌زن طراحی شده با طول 100 میلی‌متر انتخاب مناسبی می‌باشد.

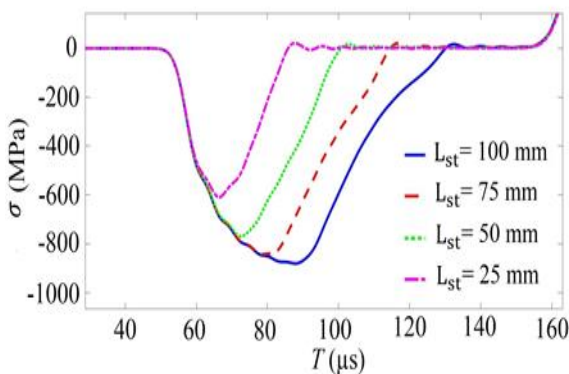


Fig 7 Incident stress wave in the presence of a 2.5 mm diameter and 1.5 mm thick pulse shaper with striker bar of different lengths in Hopkinson simulation for S-2 glass/sc15 epoxy

شکل 7 موج تنش حادثه در حضور شکل‌دهنده‌ی پالس با قطر 2/5 و ضخامت 1/5 میلی‌متر با میله‌های ضربه‌زن با طول‌های مختلف در شبیه‌سازی هاپکینسون برای نمونه S-2 glass/sc15 epoxy

6- تحلیل نتایج

هنگام تست هاپکینسون فشاری، افزایش سرعت میله ضربه‌زن منجر به افزایش کرنش‌ها و همچنین افزایش نرخ کرنش می‌شود، اما برای هر طول میله ضربه‌زن، حداقل سرعت وجود دارد که باعث آسیب به نمونه می‌شود. در شکل 8 و شکل 9 مجموعه‌ای از موج‌های حادثه، منعکس شده و منتقل شده حاصل از شبیه‌سازی تست هاپکینسون فشاری در دو نرخ کرنش 550 s^{-1} و 2250 s^{-1} نشان داده شده است. شکل موج حادثه کاملاً متفاوت از پالس دوزنقه معمولی یک تست هاپکینسون فشاری است. این نتیجه کنترل شکل‌دهنده پالس است و لازم است اطمینان حاصل شود که نمونه با نرخ کرنش تقریباً ثابت تغییر شکل یافته است. علاوه بر این، شکل موج‌های بارگذاری تقریباً بدون پراکندگی هستند. اجزای با فرکانس بالا در موج‌های حادثه توسط شکل‌دهنده پالس فیلتر شده‌اند زیرا این مؤلفه‌ها تلاش برای تعریف حالت تنش شفاف در نمونه را پیچیده می‌کنند. در شکل 8 منحنی تنش و کرنش بر حسب زمان در نرخ کرنش 550 s^{-1} نشان داده شده است که نشان دهنده پاسخ اصولاً الاستیک می‌باشد و در شکل 9 منحنی تنش و کرنش بر حسب زمان در نرخ کرنش 2250 s^{-1} نشان داده شده است که اثر تجمع خسارت را در شکل‌های موج منعکس شده و منتقل شده نشان می‌دهد. دامنه موج بازتاب شده به عنوان تابعی از زمان از صفر افزایش می‌یابد، به مدت 25 میکرو ثانیه دامنه تقریباً ثابت بوده و سپس افزایش شدید به دنبال دارد که نشان می‌دهد نمونه آسیب دیده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل 9 رفتار بسیار مشابهی با

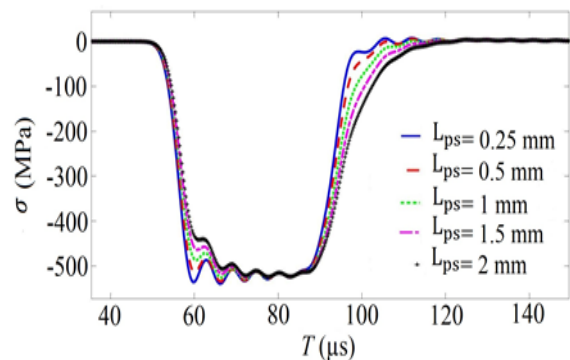


Fig 5 Effect of pulse shaper thickness with 4 mm diameter on incident waveform in Hopkinson simulation for S-2 glass/sc15 epoxy sample

شکل 5 اثر ضخامت شکل‌دهنده‌ی پالس با قطر 4 میلی‌متر بر شکل موج حادثه در شبیه‌سازی هاپکینسون برای نمونه S-2 glass/sc15 epoxy

2-7- قطر شکل‌دهنده پالس

در شکل 6 نتایج شبیه‌سازی اثر قطر شکل‌دهنده پالس دیسکی بر شکل موج حادثه در آزمایش هاپکینسون فشاری نشان داده شده است. در این نمودار سرعت میله ضربه‌زن 20 متر بر ثانیه و طول آن 100 میلی‌متر بوده و از شکل‌دهنده‌ی پالس‌های دیسکی با ضخامت 1/5 میلی‌متر استفاده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش قطر، شیب موج حادثه افزایش (زمان اوج کاهش می‌یابد) و طول موج کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر، نوسانات موج حادثه افزایش می‌یابد. در واقع هر چه تغییر شکل پلاستیک بیشتری در شکل‌دهنده‌ی پالس رخ دهد، فرکانس‌های بالا کمتر تولید می‌شوند. نکته دیگر اینکه با افزایش قطر، تغییر شکل پلاستیک در تنش بزرگتری شروع می‌گردد. با مقایسه‌ی قطرهای مختلف شکل‌دهنده‌ی پالس مشخص می‌شود که قطر 2/5 میلی‌متر انتخاب مناسبی می‌باشد، چرا که در صورت استفاده از قطر کمتر از 2/5 میلی‌متر برای شکل‌دهنده‌ی پالس، موج تنش حادثه به مقدار حداکثر خود نمی‌رسد و در صورت استفاده از قطر بیشتر از 2/5 میلی‌متر برای شکل‌دهنده‌ی پالس، موج حادثه حالت مثلثی نخواهد داشت.

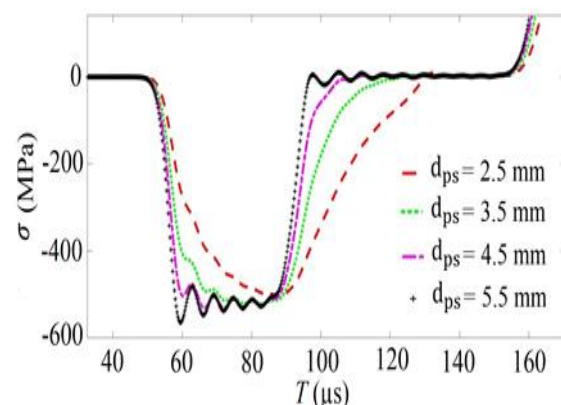


Fig 6 Effect of pulse shaper diameter with 1.5 mm thickness on incident waveform in Hopkinson simulation for S-2 glass/sc15 epoxy sample

شکل 6 اثر قطر شکل‌دهنده‌ی پالس با ضخامت 1/5 میلی‌متر بر شکل موج حادثه در شبیه‌سازی هاپکینسون برای نمونه S-2 glass/sc15 epoxy

اختلاف معنی داری بین میانگین تنش و تنش در هر دو انتهای نمونه وجود دارد. در شکل 11 تعادل دینامیکی محاسبه شده توسط معادله (11) نشان داده شده است که نمونه کامپوزیتی تقریباً در کل مدت شبیه‌سازی آزمایش هاپکینسون فشاری به دلیل استفاده از یک شکل‌دهنده‌ی پالس مناسب به جز 5 میکرو ثانیه اول در تعادل تنش دینامیکی قرار دارد. دستاورد اولیه تعادل تنش دینامیکی در نمونه تضمین می‌کند که نمونه در طول بارگذاری دینامیکی به طور یکنواخت تحت تنش قرار گرفته است.

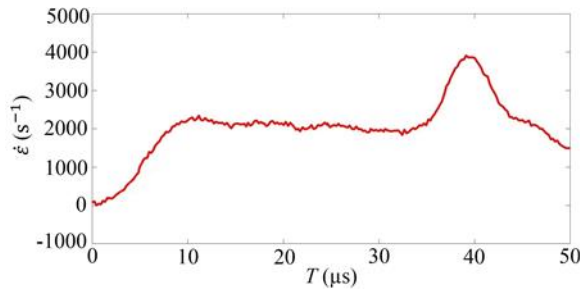


Fig 10 Strain rate history in SHPB test simulation for S-2 glass/sc15 epoxy sample

شکل 10 تاریخچه نرخ کرنش در نمونه در شبیه‌سازی آزمایش هاپکینسون فشاری برای نمونه‌ی S-2 glass/sc15 epoxy

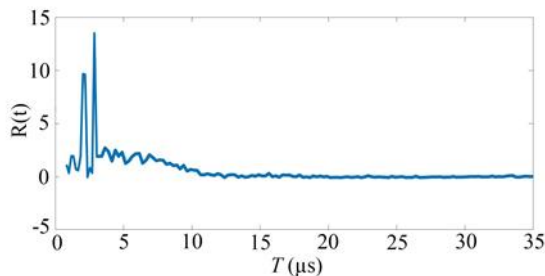


Fig 11 Dynamic equilibrium process in S-2 glass/sc15 epoxy sample

شکل 11 فرآیند تعادل دینامیکی در نمونه S-2 glass/sc15 epoxy

7- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، طراحی دستگاه تست هاپکینسون فشاری برای بررسی خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی است. لذا دستگاه هاپکینسونی با تقریباً $1/3$ ابعاد رایج طراحی شد. موج‌های حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از شکل‌دهنده پالس از جنس مس با قطر 2.5 میلی‌متر و ضخامت 1.5 میلی‌متر برای نمونه‌ی کامپوزیتی S-2 glass/sc15 epoxy با رفتار ترد گونه، اصلاح شد. برای اصلاح موج حادثه اگر هدف فقط حذف نوسانات موج حادثه باشد بایستی از شکل‌دهنده‌ی پالس با قطر بزرگ و ضخامت کم استفاده نمود، چرا که در چنین شرایطی تغییر شکل پلاستیک کمی در شکل‌دهنده‌ی پالس اتفاق می‌افتد و شکل موج تغییر محسوسی نخواهد داشت. در صورتی که نمونه مورد آزمایش رفتار خطی داشته باشد (مانند مواد ترد) بایستی از شکل‌دهنده‌ی پالسی با قطر کوچک استفاده نمود، چرا که تقریباً از ابتدای ورود موج فشاری به شکل‌دهنده‌ی پالس تغییر شکل پلاستیک آن شروع شده و شکل موج مثلی یا دوزنقه‌ای تولید می‌گردد. از طرف دیگر، هر چه مدول مماسی در مواد ترد بیشتر باشد، ضخامت شکل‌دهنده‌ی پالس مناسب افزایش می‌یابد چرا که با افزایش ضخامت، زمان اوج موج حادثه افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر طول میله ضربه‌زن در حضور شکل‌دهنده‌ی پالس، هر چند ممکن است دامنه موج حادثه تغییر کند ولی شیب موج ورودی تغییر نمی‌کند. شبیه‌سازی در دو

نتایج سانگ و چن [3]، تاسدمرکی¹ و هل [4] دارد و از این رو، اعتبار طراحی دستگاه هاپکینسون فشاری را تأیید می‌کند.

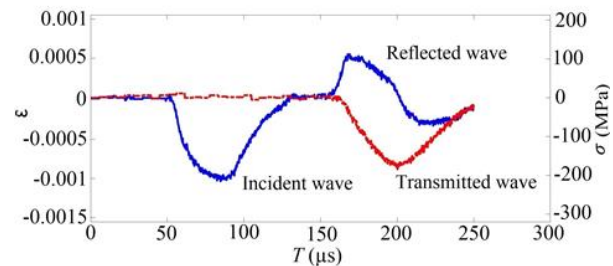


Fig 8 A set of incident waves reflected and transmitted for the S-2 glass/sc15 epoxy composite sample with a striker bar speed of 5 m/s

شکل 8 مجموعه‌ای از امواج حادثه، بازتاب‌شده و منتقل‌شده برای نمونه کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy با سرعت ضربه‌زن 5 متر بر ثانیه

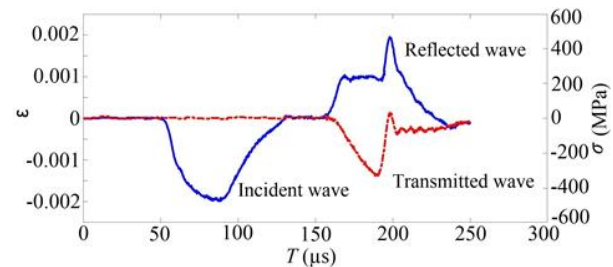


Fig 9 A set of incident waves reflected and transmitted for the S-2 glass/sc15 epoxy composite sample with a striker bar speed of 10 m/s

شکل 9 مجموعه‌ای از امواج حادثه، بازتاب‌شده و منتقل‌شده برای نمونه کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy با سرعت ضربه‌زن 10 متر بر ثانیه

در شکل 10 جزئیات موج منعکس شده متناسب با نرخ کرنش در نمونه نشان داده شده است. هنگامی که زمان کمتر از 35 میکرو ثانیه باشد، موج منعکس‌شده دارای دامنه تقریباً ثابت است که نشانگر نرخ کرنش تقریباً ثابت در نمونه است. بعد از گذشت زمان از 35 میکرو ثانیه، موج منعکس‌شده افزایش شدید می‌یابد و این نشان می‌دهد که نمونه آسیب دیده است. سطح انتهایی میله حادثه با مقاومت بسیار کمتری از نمونه آسیب‌دیده مواجه می‌شود و در نتیجه سرعت در میله حادثه سریع‌تر می‌شود، همان طور که با افزایش شدید موج منعکس‌شده، نشان داده می‌شود.

نیروی محوری که در قسمت جلویی در تماس با میله حادثه (F_1) است، از تفاوت بین موج‌های حادثه و منعکس‌شده محاسبه می‌شود و از موج منتقل‌شده، نیرو در انتهای عقب که در تماس با میله انتقال است (F_2)، محاسبه می‌شود. بر اساس تئوری موج تنش یک بعدی، F_1 و F_2 به ترتیب توسط رابطه‌های (9) و (10) محاسبه می‌شوند [17]. نزدیکی به تعادل دینامیکی در نمونه را می‌توان با در نظر گرفتن پارامتر $R(t)$ که از رابطه (11) محاسبه می‌شود، ارزیابی کرد [18].

$$F_1 = AE(\epsilon_I + \epsilon_R) \quad (9)$$

$$F_2 = AE\epsilon_t \quad (10)$$

$$R(t) = \left| \frac{\Delta\sigma(t)}{\sigma_{avg}(t)} \right| = 2 \left| \frac{F_1 - F_2}{F_1 + F_2} \right| \quad (11)$$

¹ Tasdemirci

- [16] Gama, B. A. and Gillespie Jr, J. W., "Finite Element Modeling of Impact, Damage Evolution and Penetration of Thick-Section Composites," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 4, pp. 181-197, 2011.
- [17] Kolsky, H., "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading," *Proceedings of the physical society. Section B*, Vol. 62, No. 11, pp. 676, 1949.
- [18] Ravichandran, G. and Subhash, G., "Critical Appraisal of Limiting Strain Rates for Compression Testing of Ceramics in a Split Hopkinson Pressure Bar," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 77, No. 1, pp. 263-267, 1994.

نرخ کرنش 550 s^{-1} و 2250 s^{-1} انجام شده است که در نرخ کرنش 550 s^{-1} نمونه آسیب ندیده است و پاسخی الاستیک می‌دهد در حالی که در نرخ کرنش 2250 s^{-1} نمونه بعد از تحمل 35 میکروثانیه نیروی فشاری دچار آسیب شده است که تقریباً در طی این 35 میکروثانیه شرایط نرخ کرنش ثابت و تعادل دینامیکی برقرار بوده است. این واقعیت‌ها نشان می‌دهد که منحنی تنش-کرنش فشاری دینامیکی حاصل از چنین شبیه‌سازی هاپکینسون فشاری طراحی شده، معتبر بوده و توضیحی دقیق و مطمئن از پاسخ مکانیکی دینامیکی از ماده کامپوزیت S-2 glass/sc15 epoxy ارائه می‌دهد.

8- مراجع

- [1] Shokrieh, M. M. and Omidi, M. J., "The Impact Resistance of Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, pp. 255-277, 2011.
- [2] Spaniol, J. R., "Design of a Split Hopkinson Pressure Bar Facility for Dynamic Material Characterization," MSc Thesis, Rutgers University, New Jersey, 2019.
- [3] Song, B., Chen, W. and Weerasooriya, T., "Quasi-Static and Dynamic Compressive Behaviors of a S-2 Glass/Sc15 Composite," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 19, pp. 1723-1743, 2003.
- [4] Tasdemirci, A. and Hal, I. W., "Numerical and Experimental Studies of Damage Generation in a Polymer Composite Material at High Strain Rates," *Journal of Polymer testing*, Vol. 25, No. 6, pp. 797-806, 2006.
- [5] Arbaoui, J., Tarfaoui, M. and Alaoui, A. E. M., "Mechanical Behavior and Damage Kinetics of Woven E-Glass/Vinylester Laminate Composites under High Strain Rate Dynamic Compressive Loading: Experimental and Numerical Investigation," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 87, pp. 44-54, 2016.
- [6] Hu, J., Yin, S., Yu, T. and Xu, J., "Dynamic Compressive Behavior of Woven Flax-Epoxy-Laminated Composites," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 117, pp. 63-74, 2018.
- [7] Chen, W. W. and Song, B., "Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications," Springer Science & Business Media, 2010.
- [8] Gama, B. A., "Split Hopkinson Pressure Bar Technique: Experiments, Analyses and Applications," PhD Thesis, University of Delaware, USA 2004.
- [9] Gray III, G. T., "Classic Split Hopkinson Pressure Bar Testing," *ASM handbook*, Vol. 8, pp. 462-476, 2000.
- [10] Accessed; <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=adaadfefb20417db13ce8d3683dbccc>.
- [11] Naghdabadi, R., Ashrafi, M. and Sohrabpour, S., "Experimental and Numerical Study of Parameters Shaping the Incident Pulse in Split Hopkinson Pressure Bar Test," In Persian, *Scientific Journal of Aerospace Mechanics*, Vol. 6, No. 4, PP. 71-80, 2010.
- [12] Bertarelli, A., "Beam-Induced Damage Mechanisms and Their Calculation," arXiv preprint arXiv:1608.03056, 2016.
- [13] Committee, A. I. H., "Asm Handbook: Mechanical Testing and Evaluation," ASM International, 2000.
- [14] Chen, W., Subhash, G. and Ravichandran, G., "Evaluation of Ceramic Specimen Geometries Used in a Split Hopkinson Pressure Bar," *Dymat Journal*, Vol. 1, No. 3, pp. 193-210, 1994.
- [15] Song, B., Chen, W. and Frew, D. J., "Dynamic Compressive Response and Failure Behavior of an Epoxy Syntactic Foam," *Journal of composite materials*, Vol. 38, No. 11, pp. 915-936, 2004.