مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۶/ دوره ۷/ شماره ۱/ صفحه ۵۱-۶۴

محله علمي بژومشي مكانيك سازه باو شاره ب



DOI: 10.22044/jsfm.2017.946



بررسی عددی جذب انرژی در سازههای ساندویچی کامپوزیتی تحت ضربه کم سرعت

سامان جعفری⁽ و سعید رهنما^{۲.*} ^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، بیرجند ۲ استادیار، دانشگاه بیرجند، بیرجند مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۹/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۳

چکیدہ

هدف از این تحقیق، مدل سازی چند نمونه ی آزمایشگاهی از سایر مراجع، جهت بررسی قابلیت جذب انرژی در سازههای ساندویچی کامپوزیتی توسط نرمافزار اجزا محدود آباکوس و اعتبارسنجی نتایج مدل سازی، با نتایج آزمایشگاهی میباشد. سازههای مورد بررسی در این تحقیق، بلوکهای فومی تقویت شده با لایههای کامپوزیتی حاوی الیاف آرامید است. در نمونههای بررسی شده، خواص مواد استفاده شده در لایههای کامپوزیتی بهعنوان تقویت کننده و همچنین در هستههای فومی یکسان بوده اما، در شکل هستههای فومی و تعداد لایههای کامپوزیتی تفاوت وجود دارد. در این تحقیق، مدل سازی نمونههای آزمایشگاهی، روند تخریب نمونهها، نمودار نیرو-تغییرمکان و انرژی-تغییرمکان حاصل از بارگذاری ضربه ای، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله برای هر نمونه، مشخصههای تخریب ازجمله؛ میزان جذب انرژی، بار بیشینه، تغییرشکل کلی نمونه، نیروی مؤثر، طول تخریب نشده و میانگین بار بررسی شده است که نتایج مشخصه-های حاصل از تحلیل عددی با نتایج روش آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده که دارای تطابق خوبی می باشد.

کلمات کلیدی: بلوک فومی تقویتشده؛ جذب انرژی؛ سازههای ساندویچی کامپوزیتی؛ روش اجزا محدود.

Numerical study of Energy Absorption in Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact

S. Jafari¹, S. Rahnama^{2,*} ¹ M.S. Student, Mech. Eng., University of Birjand., Birjand, Iran ² Assist. Prof., Mech. Eng., University of Birjand., Birjand, Iran

Abstract

The aims of this research are simulating and modeling laboratory samples from other references to investigate the absorption ability of sandwich composite structures by the finite element method and validating the modeling results with laboratory ones. Structures investigated in this study are foam blocks reinforced by braided composite structures containing aramid fibers. In all samples examined, the properties of woven fabric as well as the core are the same, but there is the difference in the form of core and the number of woven composite fabric layers. In modeling laboratory samples, the destruction process of samples, force-displacement and energy-displacement curve under load impact, have been studied. As a result of this study, for each sample, including the features of degradation; energy absorption, maximum load, deformation structure, effective force, length of the sample that is almost undamaged after the test and average load experimented have been investigated and the results have been validated with the laboratory results.

Keywords: Reinforced Foam Blocks; Energy Absorption; Composite Sandwich Structures; Finite Element Method.

آدرس يست الكترونيك: <u>srahnama@birjand.ac.ir</u>

^{*} نويسنده مسئول؛ تلفن: ٩١٦٥٦٢٩۶١٣؛ فكس: ٥٥۶٣٢٢٠٢٢٥٩

۱– مقدمه

تقویتشده با لایههای کامپوزیتی توسط روش تجربی و عددی، پرداختند. در روش عددی از المانهای پوستهای برای تعریف لایههای کامپوزیتی و از تحلیلگر دینامیک صریح استفاده شده است[۴]. همچنین خیا فان⁶ و همکارانش به بررسی تأثیر اندازه ترک، زاویه تخریب و عمق نفوذ ضربهزننده بر قابلیت جذب انرژی در سازه ساندویچی با هسته فومی و رویههای کامپوزیتی با الیاف شیشهای توسط آزمون ضربه سقوطی، پرداختند[۵]. کارلا و همکارانش تخریب در سازههای مربعی کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربهای با سرعت ۷/۱ متربرثانیه و جرم ضربهزننده ۱۴۰ کیلوگرم را توسط آزمون تجربي وتحليل عددي، بررسي كردند[8]. بوريا^۷ و همكارانش رفتار نمونهى ذوزنقهاى شكل داراى كامپوزيت الیاف کربن را تحت بارگذاری ضربهای توسط روش تجربی و عددی، بررسی کردند[۷]. سامر[^] و همکارانش به بررسی عددی تخریب در مقاطع جدار نازک با ضخامتهای مختلف، پرداختند. با استفاده از نرمافزار اجزا محدود آباکوس برای هر كدام از نمونه ها بار بیشینه، نیروی مؤثر تخریب و جذب انرژی را بررسی کردند[۸]. پیتارسی[°] و همکارانش به بررسی تخریب در شش نمونهی ساندویچی کامپوزیتی، پرداختند. درنهایت، مقدار بار بیشینه و جذب انرژی ویژه در نمونههای مختلف، بررسی گردید[۹]. اوال محمد ۲۰ و همکارانش به بررسی قابلیت جذب انرژی ضربه در لولههای تقویتشده با لايههای کامپوزيتی کربن⊣پوکسی و شيشه⊣پوکسی در بارگذاری فشاری توسط روش تجربی و عددی، پرداختند[۱۰]. فیضل مصطفی^{۱۱} و همکارانش به بررسی مقاومت در محل اتصال دو بدنه تقویت شده با لایه های کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری پرداختند. آنها از روش حل دینامیک صریح در نرمافزار اجزا محدود آباکوس جهت پیشبینی رفتار تخریب و بررسی مقاومت اولیه تا شکست نهایی سازه استفاده کردند[۱۱]. گروه تحقیقاتی شرکت

امروزه، استفاده از مواد كامپوزيتي بهعنوان ماده انتخابي به جای مواد فلزی در بسیاری از کاربردهای فناوری مشاهده می شود. مزایای خاص کامپوزیت ها در مقایسه با فلزات، نظیر نسبت استحکام و سفتی به وزن زیاد، عایق بودن نسبی در برابر گرما و صدا، مقاومت خستگی و مقاومت خوردگی آنها را برای استفاده در بسیاری از اجزای خودروها، هواپیماها و کشتیها مورد توجه قرار داده است. در صنعت هوایی، سازه های اصلی هواپیما، همچون بالها و پرههای توربین، بهواسطه برخورد پرندگان یا اشیای خارجی دیگر در معرض ضربه با سرعت زیاد قرار دارند. همچنین، سازههای دریایی، خودرو و ساختمان نیز در معرض ضربه بهواسطه اجسام خارجی هستند در نتیجه یکی از مسائل مرتبط با سازههای کامپوزیتی، تأثیر ضربات اجسام خارجی بر روی آنهاست. همچنین ممکن است خرابیهای قابل توجهی در داخل آن رخ دهد، بدون این که خرابی توسط چشم غیر مسلح قابل دیدن باشد. چنین خرابیهایی میتواند، در گستره وسیعی از سرعتهای اجسام ضربهزننده رخ دهد. از جمله این موارد می توان به ضربه در سرعتهای پایین (مانند سقوط یک آبزار بر روی یک قطعه) که بسیار متداول است و یا برخورد در سرعتهای بسیار بالا به سبب برخورد اجرام آسمانی بر روی یک سفینه فضایی اشاره کرد. بنابراین، در سازههای کامپوزیتی دستیابی به یک طراحی با شکل مناسب و میزان جذب انرژی بهینه در اثر ضربه از اهمیت ویژهای برخوردار است[۱]. درگذشته، محققین زیادی به بررسی جذب انرژی در سازههای کامپوزیتی پرداختهاند. راماکریشنا و همکارانش از آزمون شبه-استاتیکی و دینامیکی استفاده کرده و مشخصههای جذب انرژی را در مواد کامپوزیتی پایه پلیمری بررسی کردند[۲]. ژانگ^۲ و همکارانش قابلیت جذب انرژی و مقاومت ضربهای را در سرعتهای پایین برای صفحات ساندویچی با هسته فومی از جنس پلیاورتان، مورد بررسی قرار دادند[۳]. پالانیولو^۳ و همکارانش به بررسی قابلیت جذب انرژی در دو نمونه با سطح مقطع مربعی و دایرهای

⁴ Dynamic, Explicit

⁵ Xia fan

⁶ Carla ⁷ Boria

⁸ Samer

⁹ Pitarresi

¹⁰ Auwal Muhammad

¹¹ Faizal Mustapha et al

¹ Ramakrisna

² Zhang ³ Palanivelu

ایرباس^۱ فرانسه به همراه محققین دانشگاه تولوس، مقدار جذب انرژی ضربه را در سازههای ساندویچی کامپوزیتی، توسط آزمون تجربی بررسی کردند. نمونههای بررسی شده، بلوکهای فومی پلیمتاکریلیمید^۲ بوده که توسط لایههای کامپوزیتی دارای الیاف آرامید^۲ XTI تقویت شده بودند. در همهی این نمونهها خواص مواد در لایههای کامپوزیتی و فوم یکسان بوده، ولی در شکل فوم و تعداد لایههای کامپوزیتی و فوم چند نمونهی آزمایشگاهی از مرجع [11]، جهت بررسی قابلیت جذب انرژی در سازههای ساندویچی کامپوزیتی توسط نرمافزار اجزا محدود آباکوس و اعتبارسنجی نتایج مدلسازی، با نتایج آزمایشگاهی میباشد.

۲- مدلسازی

در این بخش مشخصات هندسی و خواص مکانیکی مواد، شرایط مرزی، شرایط بارگذاری و نحوه شبکهبندی نمونههای مورد بررسی که در شکل ۱ آمده، در نرمافزار اجزا محدود ارائه شده است[۱۲].

هسته مرکزی بهصورت جسم جامد، سهبعدی ^۲ و تغییر شکل پذیر^۵ مدلسازی شده است. در شکل ۲ اندازه خارجی نمونههایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته، مشاهده می شود.

المانهای پوستهای ، سهبعدی و تغییرشکل پذیر برای مدلسازی لایههای کامپوزیتی بکار رفته است. ضخامت هر لایه مطابق نمونههای آزمایشگاهی مرجع[۱۲]، ۱/۱۶ میلی-متر میباشد. چیدمان لایهها در شکل ۳ آمده است. همچنین یک جسم صلب دوبعدی با المانهای پوستهای برای مدلسازی ضربهزننده در نظر گرفته میشود و با توجه به مرجع [۱۲] سرعت ضربهزننده ۵/۸ متربرثانیه و جرم آن ۴ کیلوگرم میباشد.



شکل ۱- شش نمونه مورد مطالعه[۱۲]







شکل ۳- چیدمان لایهها بهصورت نمایش سهبعدی

۲-۱- خواص مواد

در این بخش خواص مکانیکی مواد استفاده شده در نمونهها، ارائه می گردد. هسته مرکزی در همه مدلها از جنس فوم پلی متاکریلیمید بوده و در جدول ۱ خواص مکانیکی فوم ارائه شده است.

از المانهای چسبنده برای مدلسازی چسب بهعنوان اتصال بین هستهی مرکزی و لایههای کامپوزیتی استفاده میشود. خواص مکانیکی چسب استفاده شده در نمونهها در جدول ۲ آورده شده است[17].

الیاف لایههای کامپوزیتی از نوع آرامید ۱۲K میباشد که خواص مکانیکی آن در جدول ۳ آمده است[۱۲].

در نمونههای آزمایشگاهی، نمونهی چهارم D3R و ششم D4R دارای سوراخهایی میباشند که با کربن 6K پرشدهاند. در جدول ۴ خواص مکانیکی کربن 6K ارائه شده است[۱۴و۱۴].

¹ Airbus Group

² Polymethacrylimide foam

³ Aramid ⁴ 3D

⁵ Deformable

⁶ Shell

مقادير		ویژگیها	
۷۵	(kg/m^3)	چگالی	
۱۰۵	(MPa)	مدول الاستيك	
47	(MPa)	مدول برشى	
۰/٣		ضريب پواسون	
١/٧	(MPa)	استحكام فشارى	
۲/۲	(MPa)	استحكام كششى	
۱/۴	(MPa)	استحكام برشى	

جدول ۱- خواص مكانيكي فوم [۱۲]

[١٢]	~		خما	-۲	La.	١.
	چسب	ص	حو	- 1	وں	بند

مقادير			ويژگىھا	
۲/۸۹	(GPa)		مدول کششے	
۷۵	(MPa)	ىشى	استحكام كش	
٣/٣	(GPa)	ى	مدول پیچشے	
1110	(kg/m^3)		چگالی	
۱۳۲	(MPa)	ىشى	استحكام پيچ	

جدول ٣- مشخصات الياف أراميد[١٢]								
	مقادير		ویژگیها					
	148	(g/m^2)	وزن سطحي					
	۲/۹۲	(Gpa)	استحكام كششى					
	۱۰۵	(Gpa)	مدول کششی					

جدول ۴- خصوصیات مکانیکی کربن [۱۳ و ۱۴]

مقادير	ویژگیها
178	(kg/m³) چگالی
۲۲۳	مدول الاستيك (GPa)
• /٣	ضريب پواسون
10	استحکام فشاری (MPa)
۲۵۰۰	استحکام کششی (MPa)
۵۹	استحکام برشی (MPa)

۲-۲- مراحل حل

با توجه به اینکه نمونههای آزمایشگاهی مرجع[۱۲]، تحت بارگذاری ضربهای میباشند، جهت شبیهسازی بارگذاری ضربهای، از تحلیل گر دینامیکی صریح در نرمافزار اجزا محدود آباکوس استفاده شده است.

۲-۳-سطوح مشترک، شرایط مرزی و شرایط بارگذاری اتصال لایههای کامپوزیتی به فوم، تماس جسم صلب ضربهزننده به لایههای کامپوزیتی و همچنین اتصال لایههای

کامپوزیتی با تکیهگاه بهصورت سطح به سطح در نرمافزار مدل شده است. با توجه به اینکه در نمونههای آزمایشگاهی فوم توسط چسب با لایههای کامپوزیتی تقویت شده است، در نرمافزار اجزا محدود نیز، تماس در همه نمونهها در محلهای اتصال اجزا به همدیگر با استفاده از قید Tir تعریف شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، ضربهزننده در راستای y دارای سرعت می باشد و تکیه گاه سازه نیز، در تمام جهات مقید می باشد.

برای مدلسازی فوم از المانهای سهبعدی، هشت گرهی و انتگرال کاهشی (D3D8R)، لایههای کامپوزیتی از المان-های پوستهای، هشت گرهی و انتگرال کاهشی (S8R) و برای چسب از المان چسبنده سهبعدی، هشت گرهی (COH3D8) استفاده شده است. در جدول ۵ اندازه، تعداد المانها و تعداد گرهها در نمونههای مختلف آمده است.



جدول ۵- اندازه، تعداد المانها و تعداد گرهها

در مدلهای مختلف

D4R	D4	D3R	D3	D2	D1	مدل
۴	۴	۴	۴	۴	۴	اندازه المان
۷۷۱۸	0107	V907	6989	6916	4474	تعداد گرەھا
4787	3847	4820	4.19	441.	۳۱۹۰	تعداد المانها

۳- روابط حاکم

تئوری شکست تیسای-وو^۱ بر پایه تئوری شکست انرژی کرنشی کلِ بلترامی^۲ استوار است. تیسای-وو از این تئوری برای یک تکلایه در حالت تنش صفحهای استفاده کردند.

¹Tsai-Wu Failure Theory

²Beltrami

یک تکلایه در صورتی به شکست خواهد رسید که نامساوی رابطه ۱ صادق باشد[۱۵].

$$\begin{split} H_{1}\sigma_{1}+H_{2}\sigma_{2}+H_{6}\tau_{12}+H_{11}\sigma_{1}^{2}+H_{22}\sigma_{2}^{2}\\ +H_{66}\tau_{12}^{2}+2H_{12}\sigma_{1}\sigma_{2}>1 \end{split} \tag{1}$$

عاملهای H از پنج ویژگی استحکام تکلایهی تکجهته

به دست میآیند[۱۵].

$$H_{1} = \frac{1}{(\sigma_{1}^{T})_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_{1}^{C})_{ult}}$$
(7)

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}}$$
(7)

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}}$$
(f)

$$H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}}$$
(b)
$$H_{\epsilon} = 0$$
(c)

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{e0})^2}$$
 (Y)

$$H_{12} = \frac{2}{\sigma^2} - \frac{(H_1 + H_2)}{\sigma}$$

$$\frac{1}{2}(H_{11} + H_{22} + H_{66}) \qquad (\lambda)$$

در روابط فوق، $\{\sigma_1^T\}_{ult}$ استحکام کششی طولی نهایی در راستای الیاف، $\{\sigma_1^C\}_{ult}$ استحکام فشاری طولی نهایی در راستای الیاف، $\{\sigma_2^T\}_{ult}$ استحکام کششی عرضی نهایی در راستای عمود بر الیاف، $\{\sigma_2^C\}_{ult}$ استحکام فشاری عرضی نهایی در راستای عمود بر الیاف و $\{\tau_{12}\}_{ult}$ استحکام برشی نهایی درون صفحهای در صفحهی ۱-۲ میباشد.

۴- نتايج

در این بخش نتایج حاصل از آزمایشات مرجع [۱۲] با نتایج حاصل از مدلسازی در این تحقیق مقایسه و برای هر کدام از نمونهها نمودار نیرو-تغییرمکان، انرژی-تغییرمکان و نحوه تخریب به عنوان خروجی از نرمافزار استخراج شده است.

۴-۱- شبیهسازی تخریب در مدل اول (D1)

با توجه به شکل ۶ این مدل از ترکیب هسته از جنس فوم یکتکه تقویتشده با لایههای کامپوزیتی میباشد. لایههای کامپوزیتی با استفاده از المانهای چسبنده به هسته مرکزی متصل شدهاند. در این مدل، شش لایه کامپوزیتی با زاویه الیاف ۴۵± فوم را تقویت میکند.

شکل ۷ و شکل ۸ فرآیند ضربه را بهترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیهسازی شده در نرمافزار نشان می-دهد. در شکل (۸–ب)، ترکهایی در امتداد ارتفاع فوم ایجاد شده که این ترکها مطابق شکل (۸–ج) در طول ضربه رشد کرده و موجب تخریب نمونه می گردند. پس از رشد ترک اولیه در سمت چپ، ترک ریزتری در سمت راست نمونه ایجاد شده و این ترک با ادامه فرآیند ضربه رشد می کند. در شکل (۸–د) همزمان با رشد ترک در حین تخریب، چسب قادر به مقاومت نبوده و لایههای کامپوزیتی از فوم جدا می شوند. در شکل (۸–هـ) پس از متوقف شدن جدایش لایه-ها از فوم، نمونه تا حد نهایی خود در برابر ضربه مقاومت کرده ما از فوم، نمونه تا حد نهایی خود در برابر ضربه مقاومت کرده نمی باشد و تغییرمکان سازه متوقف می گردد.



شکل ۸- روند تخریب عددی مدل اول

در شکل ۹ نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه اول نشان داده شده است. بعد از شروع ترک در تحلیل عددی با حذف المانهای تخریب شده نیرو افت کرده ولی با برخورد

ضربهزننده به المانهای بعدی باز هم نیرو افزایش پیدا می-کند و این امر موجب ایجاد تغییرات نامنظم نمودار نیرو-تغییرمکان در طی تخریب می گردد.

در شکل ۱۰ نمودار انرژی-تغییرمکان مدل اول نشان داده شده است. با توجه به اینکه تغییرمکان این مدل در نتایج عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی میباشد در نتیجه، جذب انرژی در نتایج عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی به-دست آمده است.



عددی مدل اول

۲-۴- شبیهسازی تخریب در مدل دوم (D2)

خواص مواد استفاده شده در این مدل مانند مدل اول میباشد. در این مدل تأثیر دو تکه شدن سازه بر قابلیت جذب انرژی بررسی می گردد. بلوک داخلی توسط دولایهی

کامپوزیتی تقویتشده و بلوک خارجی نیز با چهار لایهی کامپوزیتی تقویت شده است. شکل ۱۱ مدل دوم را نشان میدهد.

شکل ۱۲ و شکل ۱۳ فرآیند ضربه را بهترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیهسازی شده در نرمافزار نشان می-دهد. مطابق شکل (۱۳–ب) در لحظات اول برخورد ضربهزننده به نمونه، در سمت چپ بخش فوقانی فوم خارجی یک ترک ایجاد شده است. در شکل (۱۳–ج) ترکهای فوم فوقانی رشد کرده و موجب تخریب فوم فوقانی میشود. در طی تخریب همانطور که در شکل (۱۳–د) نشان داده شده، در ناحیهای که لایههای کامپوزیتی روی فوم مرکزی بهوسیله چسب متصل شدهاند، نیروی تخریب بر مقاومت چسب غلبه کرده و حین تخریب این لایهها از هسته مرکزی جدا شدهاند. درنهایت، مقاومت ماده مانع افزایش تغییرشکل در نمونه شده و مطابق شکل (۱۳–هـ) تغییرمکان سازه متوقف می گردد.





شکل ۱۴ نمودار نیرو-تغییرمکان مدل دوم را نشان میدهد. در این مدل بار بیشینه، در نتایج آزمایشگاهی و



شکل ۱۵– نمودار انرژی–تغییرمکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول و دوم



شکل ۱۷ و شکل ۱۸ فرآیند ضربه را بهترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیهسازی شده در نرمافزار نشان می-دهد. پس از برخورد ضربهزننده مطابق شکل (۱۸–ب)، ترک در فوم بالایی ایجاد شده که حین فرآیند تخریب رشد کرده است. در شکل (۱۸–ج) اندازهی این ترک در طول تخریب بزرگتر شده تا به لبههای بیرونی لایههای کامپوزیتی می-رسد. درنهایت، در شکل (۱۸–هـ) تغییرشکل در سازه متوقف می گردد.



شکل ۱۷- روند تخریب آزمایشگاهی مدل سوم[۱۲]

عددی از نمونه اول بیشتر میباشد. در روش آزمایشگاهی، چسب بین فوم مرکزی و لایههای کامپوزیتی داخلی بهصورت کامل در یک منطقه جدا شده است. همچنین، اتصال مابین لایههای بیرونی کامپوزیتی و فوم بیرونی از بین رفته که در تحلیل عددی این لایهها از فوم بیرونی جدا نشده است. در محلیل عددی اتصال بین هسته مرکزی و لایههای داخلی از هم جدا نشده و در طول تخریب چسب در مقابل جدا شدن مقاومت میکند که این پدیده میتواند دلیلی بر اختلاف این مقدار نیرو در نتایج آزمایشگاهی و عددی باشد.

در شکل ۱۵ نمودار انرژی-تغییرمکان مدل دوم نشان داده شده است. با وجود اینکه بار بیشینه در این مدل از مدل اول بیشتر است اما چون مقدار تغییرمکان این نمونه در هر دو روش آزمایشگاهی و عددی کمتر از مدل اول میباشد. میزان جذب انرژی این نمونه کمتر از نمونه اول میباشد. در این مدل مشخص میشود با ایجاد دو بلوک در سازه قبلی، سازه میزان جذب انرژی پایینتری داشته است.

(D3) شبیه سازی تخریب در مدل سوم (D3)

در این نمونه همان طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده ابتدا سطح جانبی دو هسته فومی توسط دولایه کامپوزیت پوشانده شده، سپس بعد از قرار دادن فومها روی یکدیگر توسط چسب دور تا دور سطح خارجی فوم توسط چهار لایه کامپوزیت تقویت می شود.



شکل ۱۴– نمودار نیرو-تغییرمکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول و دوم



در شکل ۱۹ نتایج نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه سوم آمده است. بار بیشینه در نتایج آزمایشگاهی و عددی در مقایسه با مدل اول ۸۰ درصد بیشتر میباشد. در نتایج آزمایشگاهی نیرو پس از رشد ترک، افزایش پیدا میکند تا در ۲/۴۸ الی ۲/۶۳ تغییرمکان ثابت باقی میماند، سپس نیرو تا جایی که تغییرشکل متوقف میشود، افزایش مییابد اما در نتایج عددی نیرو پس از رشد ترک اول، تا زمانی که تغییرمکان متوقف میشود، زیاد میشود. این اختلاف میتواند به این دلیل باشد که در نتایج آزمایشگاهی، چسب بین لایه-های کامپوزیتی و فوم در بلوک بالایی از همدیگر جدا شده ولی در مدلسازی، تخریب بدون جدا شدن لایهها از فوم صورت گرفته است.

شکل ۲۰ نمودار انرژی-تغییرمکان مدل سوم را نشان میدهد. این مدل، در نتایج آزمایشگاهی و عددی تغییرمکان کمتری نسبت به مدل اول، داشته است. با وجود تغییرمکان کمتر به دلیل نیروی بیشتر در نتایج عددی، میزان جذب انرژی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی میباشد.



ص ۲۱ - تمودار نیرو-تعییرمکان تایج ارمایسکاهی عددی مدل اول و سوم



+-۴- شبیهسازی تخریب در مدل چهارم (D3R)

این مدل مانند مدل سوم طراحی شده است با این تفاوت که در فوم بالایی سوراخهایی ایجاد شده و این سوراخها با کربن ۶K پرشدهاند. فوم بالایی، نقش یک سپر دفاعی در برابر ضربه را ایفا می کند، لذا میزان مقاومت این نمونه نسبت به نمونه سوم بررسی می گردد. فاصله بین سوراخها ۶ میلی متر و قطر سوراخها ۱/۵ میلی متر است. شکل ۲۱ مدل چهارم را نشان می دهد.

شکل ۲۲ و شکل ۲۳ فرآیند ضربه بهترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیهسازی شده در نرمافزار را نشان میدهد. در شکل (۲۳–ب) پس از برخورد ضربهزننده با سازه در فوم بالایی در امتداد سوراخها ترک ایجاد شده و در شکل (۲۳–ج) مشاهده میشود که این ترکها در حین ضربه رشد کرده تا جایی که در فصل مشترک فوم بالایی و پایینی رشد ترک متوقف می گردد. پس از توقف ترکها مطابق شکل (۲۳–د) تخریب در نمونه ادامه پیدا می کند. در شکل (۲۳– هی) تغییرمکان سازه متوقف شده است.



شکل ۲۱- مدل چهارم (D3R)





(D4) شبیهسازی تخریب در مدل پنجم (D4)

همانطور که در شکل ۲۶ نشان داده شده در این مدل از سه بلوک فومی تشکیل شده است. فوم سمت چپ و راست پائینی و فوم بالایی توسط دو لایهی کامپوزیتی با زاویه الیاف ۴۵± تقویت شده است. سپس، دور تا دور کل سازه با چهار لایهی کامپوزیتی دیگر، پوشانده شده است. هدف از طراحی این مدل، بررسی تأثیر بلوکهای طولی در قابلیت جذب انرژی می باشد.

شکل ۲۷ و شکل ۲۸ فرآیند ضربه را بهترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیهسازی شده در نرمافزار نشان می-دهد. اولین ترک در این مدل در فوم سمت چپ اتفاق افتاده است (شکل ۲۸–ب). سپس، این ترک مطابق شکل (۲۸–ج) رشد کرده و فوم سمت چپ را تخریب می کند. با توجه به شکل (۲۸–د) در فوم سمت راست نیز ترکی ایجاد شده که این ترک نیز، در طول فرآیند ضربه رشد کرده و موجب تخریب فوم سمت راست شده و درنهایت، تخریب در سازه مطابق شکل (۲۸–هـ) متوقف می شود.





شکل ۲۲- روند تخریب آزمایشگاهی مدل چهارم[۱۲]



مقدار تغییرمکان نمونه (D3R) هم در نتایج آزمایشگاهی و هم عددی مقدار کمتری را نسبت به نمونه اول (D1) نشان میدهد. در این مدل، مقدار تغییرمکان در نتایج آزمایشگاهی و عددی از مدل سوم، کمتر بهدست آمده است. مقدار بار بیشینه در نتایج عددی ۷۰ درصد و در نتایج آزمایشگاهی ۸۰ درصد بیشتر از مدل اول میباشد. در شکل ۲۴ نمودار نیرو-تغییرمکان مدل چهارم نشان داده شده است.

این مدل، در مقایسه با مدل سوم جذب انرژی بیشتری داشته است. مطابق شکل ۲۵ جذب انرژی در این نمونه در نتایج آزمایشگاهی از نتایج عددی کمتر میباشد. همچنین، مقدار جذب انرژی در نتایج عددی از مدل اول و مدل سوم بیشتر و در نتیجهی آزمایشگاهی با مدل اول تقریباً یکسان میباشد.



لیکل ۲۲- نمودار نیرو-تغییرمکان نتایج ازمایشگاهی ا عددی مدل اول، سوم و چهارم



شکل ۲۷- روند تخریب آزمایشگاهی مدل پنجم[۱۲]



تغییر مکان در مدل پنجم در نتایج آزمایشگاهی و عددی کمتر از مدل اول میباشد. در نتایج عددی بار بیشینه ۴۱ درصد و در نتایج آزمایشگاهی ۳۷ درصد (این مقدار مربوط به اختلاف بار بیشینه در نمونه پنجم نسبت به نمونه اول در نتایج تجربی میباشد) بیشتر از مدل اول میباشد. در نتایج عددی نمونه پس از ۱/۱۶ تغییرمکان و ۱/۵۷ نیرو دچار اولین ترک شده سپس، تغییرمکان افزایش پیدا میکند. پس از اینکه باز هم ترک جدید موجب افت نیرو میگردد. این ترک نیز، متوقف شده تا جایی که تغییرمکان در جسم متوقف می-گردد. شکل ۲۹ نمودار نیرو - تغییرمکان مدل پنجم را نشان میدهد.



شکل ۲۹– نمودار نیرو-تغییرمکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول و چهارم

در این مدل تغییرمکان در هر دو روش از نمونه اول کمتر میباشد. همچنین تغییرمکان در نتایج عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی بهدست آمده است. مقدار جذب انرژی در این مدل در هر دو روش آزمایشگاهی و عددی، کمتر از مدل اول میباشد. شکل ۳۰ نمودار انرژی-تغییرمکان مدل پنجم را نشان میدهد.

۴–۴– شبیهسازی تخریب در مدل ششم (D4R)

این مدل مانند مدل پنجم میباشد، با این تفاوت که در این مدل سوراخهایی با قطر ۱/۵ میلیمتر با زوایای ۶۰ درجه و فاصله ۶ میلیمتری از هم در بلوکهای فومی پائینی ایجاد شده که با کربن ۶K پرشدهاند. در این مدل تأثیر پر کردن سوراخها با کربن ۶K در بلوکهای فومی در سازه، مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل ۳۱ مدل ششم نشان داده شده است.



شکل ۳۱- مدل ششم (D4R)

در شکل ۳۲ و شکل ۳۳، تخریب آزمایشگاهی و عددی مدل ششم نشان داده شده است. شکل (۳۳-الف) برخورد ضربهزننده با سازه را نشان میدهد. همانطور که در شکل (۳۳-ب) نشان داده شده است، زمانی که سازه تحت ضربه

در شکل ۳۵ نمودار انرژی-تغییرمکان مدل ششم نشان داده شده است. مقدار تغییرمکان در این مدل از همه مدلها كمتر بوده ولى مقدار بار بيشينه از همه مدلها بيشتر مى-باشد. جذب انرژی در نتایج عددی بیشتر از مدل اول بوده اما در نتایج آزمایشگاهی مقدار جذب انرژی کمتر بهدست آمده است.

۵– بحث

در این بخش، مشخصههای تخریب حاصل از نتایج آزمایشگاهی با مشخصههای تخریب حاصل از تحلیل عددی نمونهها مقایسه می گردد. در نتایج آزمایشگاهی و عددی حاصل از نمونهی اول، مقدار نیرو، تغییرمکان و انرژی بر حسب بیشترین مقدار حاصل، بی بعد شدهاند. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل مدل های دیگر، بر حسب بیشترین مقادیر حاصل از تحلیل نمونه اول بی بعد شده اند. مشخصه های تخریب مورد بررسی در نتایج تجربی و عددی عبارتند از: بار بیشینه، میانگین بار، تغییرمکان، طول تخریب نشده، جذب انرژی و نیروی مؤثر. بار بیشینه، بیشترین نیرو در نمودار نيرو-تغييرمكان است. ميانگين بار، متوسط نيروى نمودار نيرو-تغييرمكان، تغييرمكان بيشينه، مقدار حداكثر تغییر شکل سازه و طول تخریب نشده، بخشی از نمونه که دچار تخریب نشده است. مقدار انرژی جذب شده مساحت زیر نمودار نیرو-تغییرمکان بوده و نیروی مؤثر، نسبت بار



شکل ۳۵– نمودار انرژی–تغییرمکان تحلیل آزمایشگاهی و عددی مدل اول، پنجم و ششم

قرار می گیرد لایه های بالایی از فوم جدا می شود. در شکل (۳۳-ج و د) حین ضربه سازه دچار تغییر شکل بیشتری شده است و درنهایت، در شکل(۳۳-هـ) نیروی ضربهزننده به حداقل رسیده و تخریب در نمونه متوقف می گردد.

در شکل ۳۴ نمودار نیرو-تغییرمکان مدل ششم نشان داده شده است. در نتایج آزمایشگاهی و عددی مقاومت سازه در مقابل تخریب از دیگر سازهها بیشتر است. به دلیل استفاده از کربن فوم پائینی دچار تخریب نشده و سازه مقاومت بیشتری از خود نشان میدهد. در این مدل بار بیشینه در نتایج آزمایشگاهی و عددی تقریباً سه برابر مدل اول مىباشد.







شکل ۳۴- نمودار نیرو-تغییرمکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول، چهارم و ینجم

میانگین به بار بیشینه است. در جدول ۶ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای همه نمونهها ارائه شده است. در جدول ۶، شکل ۳۶ و شکل ۳۷، E نمایان گر نتایج آزمایشگاهی و ۸، نتایج عددی را نشان میدهد.

با توجه به جدول ۶ مدل D1 دارای کمترین بار بیشینه و میانگین بار در نتایج آزمایشگاهی و عددی و بیشترین آنها مربوط به نمونهی D4R میباشد. بیشترین تغییرمکان نیز، در هر دو نوع بررسی، مربوط به سازه D1 میباشد. مقدار نیروی مؤثر مدل D1، در هر دو روش بیشتر از دیگر مدلها می باشد که در نتایج عددی از نتایج آزمایشگاهی بیشتر مشاهده می گردد. با توجه به شکل ۳۶، مقدار تغییرمکان در تحلیل عددی کمتر از روش آزمایشگاهی میباشد همچنین، مقدار جذب انرژی در نتایج عددی کمتر از مقدار آزمایشگاهی مشاهده می گردد، یکی از دلایل عمده جذب انرژی کمتر در مدلسازی عددی مقدار تغییرمکان کمتر سازه نسبت به نمونه تجربی میباشد به این دلیل که در مدلسازی عددی ساختار ماده بهصورت ایدهال در نظر گرفته می شود اما در نمونه تجربى وجود عيوب ساختارى موجب تغييرمكان بيشتر و به تبع آن افزایش مساحت زیر نمودار نیرو-تغییرمکان می-گردد.

در مدل D2 نتایج عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارای بار بیشینه بیشتر و تغییرمکان کمتری نسبت به مدل D1 میباشد. طول تخریب نشده این مدل به نسبت مدل اول بیشتر میباشد که در تحلیل عددی این مقدار کمتر از نتایج آزمایشگاهی مشاهده می گردد. نیروی مؤثر در D2 غیر از مدل D1 از دیگر مدلها بیشتر میباشد. مقدار جذب انرژی در مدلD2 به مقدار ناچیزی از مدل D1 کمتر است. این اختلاف کم ناشی از افزایش بار بیشینه و کاهش تغییرمکان نهایی در مدل D2 است که باعث میشود، سطح زیر نمودار با سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان مدل D1 تفاوت چندانی نکند.

در هر دو روش عددی و آزمایشگاهی، مدل D3 دارای مقدار بار بیشینه و میانگین بار بیشتری از مدل D1 و D2 میباشد. در این مدل بهدلیل اینکه تکه فوم پائینی دچار تخریب نشده است، سازه نسبت به مدلهای قبلی مقاومت بیشتری را از خود نشان داده است. مقدار جذب انرژی D3 از مدل D1 و D2 بیشتر میباشد که با توجه به شکل ۳۶ مقدار

جذب انرژی این نمونه در نتایج عددی، بیشتر از نتایج آزمایشگاهی میباشد. وجود دیوارههای داخلی فومی سبب افزایش مقاومت در برابر تخریب سازه و همچنین، طول تخریب نشده بیشتری می شود.

با توجه به جدول ۶ و شکل ۳۷ مدل D3R ، نسبت به مدلهای قبلی دارای بار بیشینه و میانگین بار بیشتری می-باشد که در نتایج عددی بار بیشینه D3R کمتر از نتایج آزمایشگاهی بهدست آمده است. در نتایج عددی، مقدار تغییرشکل D3R از نتایج آزمایشگاهی کمتر به دست آمده است. مقدار تغییرمکان حاصل از تحلیل عددی M3R از مدلهای قبلی نیز کمتر میباشد. با توجه به شکل ۳۶ مقدار جذب انرژی مدل D3R در تحلیل عددی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی بهدست آمده است که این مقدار در تحلیل عددی از نمونههای دیگر نیز بیشتر میباشد.

در نتایج آزمایشگاهی و عددی، مدل D4 نسبت به مدلهای دیگر، دچار تخریب بیشتری شده است. با توجه به شکل ۳۷، بار بیشینه در این مدل از مدل اول بیشتر بوده که بار بیشینه حاصل از نتایج عددی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی میباشد. با توجه به شکل ۳۶ جذب انرژی در این مدل کمتر از مدل اول بوده که نسبت به تحلیل تجربی D4 جذب انرژی بیشتری دارد.

با توجه به جدول ۶ تقویت کنندههای موجود در مدل D4R موجب افزایش بار بیشینه و افزایش میانگین بار به -نسبت مدلهای دیگر شده است. همچنین، تغییرمکان در این مدل، در هر دو نوع روش عددی و آزمایشگاهی از همه مدل-ها پایین تر میباشد که با توجه به جدول ۶ و شکل ۳۶ مقدار تغییرمکان حاصل نتایج عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی است. طبق جدول ۶ مقدار طول سالم مدل D4R در هر دو روش بررسی، از دیگر مدل ها بیشتر که در نتایج عددی طول روش بررسی، از دیگر مدل ها بیشتر که در نتایج عددی طول است. طبق مدول ۶ مقدار طول سالم مدل D4R در هر دو روش بررسی، از دیگر مدل ها بیشتر که در نتایج عددی طول روش بررسی، از دیگر مدل ها بیشتر که در نتایج آزمایشگاهی میباشد. مدل انرژی در این مدل در تحلیل عددی غیر از مدل D3R، از مدم مدل ها بیشتر بوده که در نتایج آزمایشگاهی از مدل D4 انرژی در این مدل در تعایم آزمایشگاهی از مدل IC و این مقدار در نتایج آزمایشگاهی ،کمتر از نتایج عددی به- جعفري و رهنما | ۶۳

								, .	2 C.							
D4R		D4			D3R			D3			D2			D	1	مدل
(/) خطا() N	Е	N خطا (٪) N	Е	خطا(٪)	Ν	Е	خطا(٪)	Ν	Е	خطا(٪)	N	Е	نطا (٪)	N	Е	0
۳/۲۶	۳/۰۶	۵ ۱/۴۲	١/٣۵	۶/۷	١/٧٩	١/٩٢	۱/۸۰		۱/۲۸	۶	١/٣٩	۱ ۳ ۱	١	٠/٩٩	١	بار بیشینه (٪)
	۶/۵	•/97	۰/٩٠	۷/۴	۱/۳۰	١/٢١			1/1	٣/١	٠/٩٨	۰/۹۵	•/ .	۰/٩۶		میانگین بار(٪)
۱/۹٠	۱/۲۰		۲/۲	۷۳		87	۱/۱۰		1/11	۲/۷	۷١	۷٣				18/8
	11/Y	۶۳	۶٩			۱۷/۰			٠/٩	۵/ ۲۰	١/٢٩	1/88	٨٠	۷۹		نیروی مؤثر(٪)
۵۹	۵۵		٨/۶	Λ/Δ	١/٧٩	۱/۹۵	۶٣/٣		۶۳	١٠	۰/۷۶	•/٨				١/٢
	٧/٢	•/٢٩	• 99	• /87		•/88			۰/۵	۱/۰	۰/۹۴	۰/۹۳	۲۰/۸	٠/٧٩	١	طول تخريب نشده(٪)
۲/۳۷	۲/۸۵		۵۶/۰			۱۲/۰	۱/۷۵		٢				٨/۴	٠/٩	١	تغييرشكل(٪)
	٨/٠	۱۳/۰ ۰/۷۹	۰/ <i>۸۶</i>	۱۱/۰	۱/۱۰	٠/٩٩			۱۲/۵				۵/۴	•/94	٠/٩٩	جذب انرژی(٪)
٠/۴٨	۰/۵۲	٠/٩۵	٠/٩٧				٧/٣	۰/۵	• /Y							
	۱۲/۵		۱/•				١/٧	۰/۹۵	۰/۹۳							
۱/۰۲	۰/۹۶															
	۶/۳															

1.2

1

0.8

0.6

0.4

0.2

تغييرمكان ⊿

انرژی 🔳

ordin ordin ordin ordin order order order

شکل ۳۶- مقدار جذب انرژی و بیشترین تغییرمکان در

تحليل عددي و نتايج آزمايشگاهي

جدول ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در همه نمونهها



تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی

۶- نتیجهگیری

در این تحقیق، مدلسازی سازه ساندویچی کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از مدلسازی عددی توسط نرمافزار اجزا محدود آباکوس با نتایج آزمایشگاهی، مقایسه شد. اختلافاتی در نتیجهی تحلیل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد که این اختلافات ممکن است به دلایل مختلفی ازجمله: با توجه به توضیحات فوق در مورد مشخصههای حاصل از آزمون ضربه دینامیکی، نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان میدهد که مدل D4R و مدل 11 نسبت به مدلهای دیگر دارای نتایج بهتری میباشد. با توجه به نتایج تخریب و شکل تخریب مدل پنجم در تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی، مدل خوبی جهت طراحی نیست.

شرایط محیطی آزمایشگاه آزمون ضربه و اعمال نکردن آن در تحلیل عددی، فرض ایدهال در تعریف خواص مواد در تحلیل عددی و وجود عیوب ساختاری در مواد آزمایشگاهی، خطاهای عددی در تعریف تماس بین المانها دوبعدی با المانهای سهبعدی، اعمال سرعت بارگذاری دقیق در حل اجزا محدود که در آزمون آزمایشگاهی ممکن است با چند درصد خطا اعمال گردد. با توجه به نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی بخش فومی تأثیر بیشتری در جذب انرژی در اینگونه سازهها نسبت به لایههای کامپوزیتی دارد. افزایش اینگونه سازهها نسبت به لایههای کامپوزیتی دارد. افزایش شکل فوم تأثیر قابل توجهی در جذب انرژی داشته و نمونه-شکل فوم تأثیر قابل توجهی در جذب انرژی داشته و نمونه-

J

سرعت، m/s

- [3] Zhang G, Wang B, Ma L, Wu L, Pan S, Yang J (2014) Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels. Compos Struct 108: 304-310.
- [4] Palanivelu S, Van Paepegem W, Degrieck J, Kakogiannis D, Van Ackeren J, Wastiels J (2009) Numerical energy absorption study of composite tubes for axial impact loadings. In 17th International Conference on Composite Materials (ICCM-17).
- [5] Xia F, Wu X (2010) Study on impact properties of through-thickness stitched foam sandwich composites. Compos Struct 92: 412-421.
- [6] McGregor C, Vaziri R, Poursartip A, Xiao X, Johnson N (2006) Simulation of progressive damage development in braided composite tubes undergoing dynamic axial rushing. in 9th International LS-DYNA Users Conference: 4-6.
- [7] Boria S, Obradovic J, Belingardi G (2015) Experimental and numerical investigations of the impact behaviour of composite frontal crash structures. Compos Part B-Eng 79: 20-27.
- [8] Samer F, Abdullah A, Sameer JO (2015) Enhancement of energy absorption for crashworthiness application: Octagonal-shape longitudinal members. IJAENT 2(2): 1-9.
- [9] Pitarresi G, Carruthers J, Robinson A, Torre G, Kenny JM, Ingleton S (2007) A comparative evaluation of crashworthy composite sandwich structures. Compos Struct 78: 34-44.
- [10] Muhammad A (2014) Energy absorption behaviour of filament wound glass and carbon epoxies composite tubes. IOSR-JAP 6(4): 30-37.
- [11] Mustapha F, Shahrjerdi A, Sim N (2012) Finite element validation on adhesive joint for composite fuselage model. J Braz Soc Mech Sci & Eng 34: 69-74
- [12] Dorival O, Navarro P, Marguet S, Petiot C, Bermudez M, Mesnagé D (2015) Experimental study of impact energy absorption by reinforced braided composite structures: dynamic crushing tests. Compos Part B-Eng 78: 244-255.
- [13] Mayer R, Hancox N (2012) Design data for reinforced plastics: a guide for engineers and designers. Springer Science & Business Media.
- [14] Giovedi C, Machado LDB, Augusto M, Pino ES, Radino P (2005) Evaluation of the mechanical properties of carbon fiber after electron beam irradiation. Nucl Instrum Meth B 236(1): 526-530.
- [15] Kaw AK (2005) Mechanics of composite materials. CRC Press.

تخریب و قابلیت جذب انرژی بهتری نسبت به دیوارههای طولی از خود نشان دادهاند. همچنین، چند بخش کردن هسته موجب افزایش استحکام هسته می شود.

۷- علائم و نشانهها

انرژی جذب شده، J	E _{abs}
N ،بار بیشینه،	F _{peal}
نیروی میانگین، N	Faver
نيرو، N	F
m . ضخامت چندلایه	h
پارامتر شکست کشش طولی ¹ MPa	H1
پارامتر شکست فشاری طولی، MPa ⁻²	H11
پارامتر شکست کشش عرضی، MPa ⁻¹	H2
پارامتر شکست فشاری عرضی، MPa ⁻²	H22
پارامتر شکست برشی در جهت منفی، MPa ⁻²	H66
پارامتر شکست کششی در مختصات کلی. ²⁻ MPa	H12
پارامتر شکست برشی در جهت مثبت، بیبعد	H6
s زمان، s	t
m ،تغييرمكان	U

علائم يوناني

V

تنش در راستای الیاف، MPa	σ_1
تنش در راستای عمود بر الیاف، MPa	σ_2
استحکام کششی طولی در راستای ۸۰ MPa	$(\sigma_1^T)_{ult}$
استحکام فشاری طولی در راستای ۸، MPa	$(\sigma_1^C)_{ult}$
استحکام کششی عرضی در راستای ۲، MPa	$(\sigma_2^T)_{ult}$
استحکام فشاری طولی در راستای ۲، MPa	$(\sigma_2^C)_{ult}$
تنش برشی درون صفحهای، MPa	$ au_{12}$
استحکام برشی نهایی درون صفحهای ، MPa	$(\tau_{12})_{ult}$

۸- مراجع

- [1] Abrate S (2005) Impact on composite structures. Cambridge University Press.
- [2] Ramakrishna S, Hamada H (1998) Energy absorption characteristics of crash worthy structural composite materials. in Key Engineering Materials: Vols. 141-143. 585-622.