Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iran. J. Polym. Sci. Technol.
(Persian),
Vol. 29, No. 1, 55-72
April-May 2016
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

Numerical and Experimental Low-Velocity Impact Behaivor of Sandwich Plates with Viscoelastic Core

Soroush Sadeghnejad[1*], Yousef Taraz Jamshidi[2], Mojtaba Sadighi[1], and Abdolreza Ohadi Hamedani[1]

1. Thermoelasticity Center of Excellence, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 159163-4311, Tehran, Iran
2. Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University, P.O. Box: 16785-136, Tehran, Iran

Received: 30 March 2015, accepted: 11 November 2015

ABSTRACT

A numerical and experimental low-velocity impact behavior of sandwich plates have been presently studied with regard to the compressibility and viscoelasticity features of their cores. Face sheets were assumed to be anisotropic composites or isotropic aluminum materials and a viscoelastic behavior has been considered for core. The boundary conditions are assumed to be simply supported or rigid. Abaqus, as FEM software, and its python script programming feature, have been used to model the specimens. To model hyper-viscoelastic non-linear behavior of the core, Ogden hyper-foam elasticity and Prony series approach are manipulated. To solve the numerical problem, dynamic explicit solver option with sufficient solving amplitude has been used. Prony series have been used to model the core time-dependent behavior. In conjunction with a simple indentation experiment, FEM used to formulate a novel method for finding the Prony series coefficients. By performing some low-velocity impact experiments, the impact force and displacement of the composite sandwich plates have been investigated. The results indicate that increasing the structural damping increases the contact time and missing energy and decreases the stored energy of the system. The structures with composite face sheets have a minimum ratio of upper face sheet displacement to lower face sheet displacement in comparison to those with the isotropic face sheets. Impact behavior of isotropic face sheet specimens are more flattened than that of the composite face sheets. In addition, the specific energy stored in the sandwich plates with composite face sheets, on different supports, is greater than that stored in the aluminum face sheets.

Keywords:
viscoelastic core,
low velocity impact,
numerical modelling,
Prony serie,
experimental tests

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: s.sadeghnejad@aut.ac.ir

قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و نهم، شماره ۱،
صفحه ۷۲-۵۵، ۱۳۹۵
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

بررسی عددی و تجربی رفتار صفحه‌های ساندویچی با هسته گرانروکشسان در برابر ضربه سرعت‌کم

سروش صادق‌نژاد[1*]، یوسف طراز جمشیدی[2]، مجتبی صدیقی[1]، عبدالرضا اوحدی همدانی[1]

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، قطب علمی ترموالاستیسیته، صندوق پستی ۴۳۱۱-۱۵۹۱۶۳
۲- تهران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۳۶-۱۶۷۸۵

دریافت: ۱۳۹۴/۱/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۲۰

چکیده

در پژوهش حاضر، رفتار عددی و تجربی صفحه‌های ساندویچی در برابر ضربه سرعت‌کم با درنظرگرفتن تراکم‌پذیری هسته و رفتار گرانروکشسان آن بررسی می‌شود. رویه‌ها ناهمسانگرد از جنس کامپوزیت یا همسانگرد از جنس آلومینیم فرض شده‌اند. شرایط مرزی در این بخش به شکل تکیه‌گاه‌های ساده و صلب است. از نرم‌افزار Abaqus و قابلیت‌های برنامه‌نویسی آن، شامل ایجاد مستقیم فایل ورودی و اسکریپت‌نویسی python برای مدل‌سازی به روش عددی استفاده شده است. هسته سازه، رفتاری غیرخطی از نوع ابرگرانروکشسان دارد که برای مدل‌سازی ابرکشسانی آن از مدل ابراسفنج Ogden و برای مدل‌سازی رفتارگرانروکشسان آن از روش سری Prony استفاده شد. نوع تحلیل استفاده شده نیز دینامیکی صریح با دامنه حل مناسب درنظر گرفته شده و رفتار تابع زمان هسته به‌کمک مدل سری Prony، با استفاده از روش ابداعی جدیدی مبتنی بر روش اجزای محدود و آزمون ساده نفوذ شبه‌ایستا توسعه یافته است. با انجام آزمون‌های تجربی ضربه سرعت‌کم، نیروی حاصل از ضربه و تغییر مکان‌های ناشی از آن‌ها اندازه‌گیری شد. از نتایج حاصل مشخص شد، با افزایش ضخامت هسته با خاصیت گرانروکشسان در سازه‌های ساندویچی، زمان برخورد افزایش و مقدار انرژی ذخیره شده در سامانه کاهش می‌یابد. از طرفی مقدار انرژی میرا شده در سامانه افزایش پیدا می‌کند. سازه‌ها با رویه‌های کامپوزیتی دارای کمترین نسبت تغییرمکان رویه بالایی به تغییرمکان رویه پایینی نسبت به سازه‌ها با رویه‌های همسانگرد هستند. رفتار ضربه‌ای سازه‌ها با رویه‌های همسانگرد هموارتر از رویه‌های کامپوزیتی بوده و انرژی ویژه ذخیره شده در سازه‌ها با رویه‌های کامپوزیتی، روی تکیه‌گاه‌های مختلف، بیشتر از رویه‌های آلومینیمی است.

واژه‌های کلیدی

هسته گرانروکشسان،
ضربه سرعت‌کم،
مدل‌سازی عددی،
سری Prony،
آزمون‌های تجربی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
s.sadeghnejad@aut.ac.ir

مقدمه

سازه ساندویچی از دو رویه نازک و در عین حال مستحکم که به هسته‌ای ضخیم، سبک و با استحکام کم متصل است، تشکیل می‌شود. این دو جزء به‌طور عمده با اتصال چسبی به یکدیگر متصل شده‌اند تا بدین ترتیب سازه‌های کم وزن و بهینه را پدید آورند [۳-۱]. مزیت اصلی سازه‌های ساندویچی در نسبت بسیار زیاد سفتی خمشی به وزن آن‌ها در مقایسه با سایر سازه‌هاست. بنابراین، با استفاده از سازه ساندویچی تغییرشکل‌های جانبی به حداقل می‌رسد و مقاومت در برابر کمانش و بسامدهای طبیعی افزایش می‌یابد [۱]. بدین ترتیب، به ازای مجموعه‌ای از شرایط مکانیکی و محیطی ثابت، سازه ساندویچی اغلب وزن کمتری در مقایسه با سایرسازه‌ها دارد. نتایج نظری و آزمون‌های عملی ابتدایی درباره ساندویچ‌ها در اواخر دهه ۱۹۴۰ منتشر شد. Williams و همکاران [۴] و March [۵] از آن زمان به بعد، استفاده از سازه‌های ساندویچی را به‌سرعت افزایش دادند. از آنجا که ورق ساندویچی از هسته‌ای ضعیف با رویه‌های قوی و مستحکم تشکیل شده است که به سطوح بالایی و پایینی هسته چسبانده شده‌اند. سازه‌هایی مانند لانه زنبوری، چوب، اسفنج‌ها، هسته‌های جامد (که خواص آن‌ها می‌تواند با جهت قرارگیری سلول‌های سازه آن تطبیق داده شود)، پشم‌های معدنی، هسته‌های شبکه‌ای و هسته‌های خرپایی (truss core) به‌عنوان ماده هسته استفاده می‌شوند. در مقایسه با مواد مرسوم مصرفی در ساخت سازه‌های ساندویچی، لانه زنبوری‌ها بیشترین نسبت مقاومت و استحکام نسبت به وزن را دارند. اما استفاده از آن‌ها ایجاب می‌کند که دقت زیادی روی اتصال آن‌ها به رویه انجام گیرد [۲]. همچنین، این مواد به‌شدت ناهمسانگرد و شکل‌دهی آن‌ها با منحنی‌های پیچیده بسیار مشکل است. اسفنج‌های گرمانرم سلول‌فشرده، نظیر پلی‌وینیل‌کلریدها و پلی‌یورتان‌ها، مانند لانه زنبوری‌ها استحکام ندارند. ولی مزایایی نظیر ارزانی، پیوستگی در حد ماکروسکوپی، شکل‌پذیری ساده‌تر برای چسباندن و فراهم‌آوردن عایق گرمایی و صوتی (با توجه به ضریب رسانندگی گرمایی کم هسته‌های سلولی [۶]) را به همراه خواهند داشت. هسته‌های اسفنج فلزی امتیازاتی مانند ساخت یک‌پارچه با رویه و عدم نیاز به لایه چسبنده و نیز شکل‌پذیری ساده و داشتن خواص تقریباً همسانگرد را محقق می‌سازند [۷]. سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و زمینه پلیمری و هسته‌های ساخته شده از مواد سبک، به‌ویژه اسفنج‌های کم‌چگالی، کاربرد روزافزونی در صنعت پیدا کرده‌اند. این سازه‌ها به علت قابلیت جذب انرژی زیاد و سبکی، جایگاه ویژه‌ای در صنایع حمل و نقل هوایی و دریایی دارند. در این کاربردها، به‌ویژه در سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی در معرض ضربه‌هایی، مثل ضربه قطعه‌های مجاور، برخورد پرندگان و قطعه‌های معلق در هوا هستند. این ضربه‌های موضعی اگر انرژی کافی داشته باشند، می‌توانند سبب آسیب‌ها و خرابی‌های موضعی در داخل رویه، هسته یا حد فاصل میان رویه و هسته شوند که در بسیاری از موارد تشخیص آن‌ها به شکل ظاهری امکان‌پذیر نیست. بررسی‌ها نشان داده است. آسیب‌های داخلی در این سازه‌ها سبب کاهش قابل توجه قابلیت‌ها و خواص مکانیکی آن‌ها می‌شود، از جمله اینکه این آسیب‌ها می‌توانند به مقدار زیادی استحکام‌های خمشی، فشاری و کششی سازه‌های ساندویچی را کاهش دهند. بنابراین، اهمیت بررسی پاسخ ضربه این سازه‌ها و مدل‌سازی آن‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و طراحان قرار گرفته است. رفتار ایستای تیرها و ورق‌های ساندویچی کامپوزیتی به‌طور گسترده بررسی و مطالعه شده است [۸]، در حالی‌که تحلیل و بررسی دینامیکی روی ورق‌های ساندویچی کامپوزیتی به‌طورگسترده انجام نشده است. با وجود این، رفتار دینامیکی ورق‌های لایه‌لایه شده کامپوزیتی را پژوهشگران بسیاری بررسی کرده‌اند [۹]. مطالعات جامع درباره سفتی خمشی و پایداری سازه‌های ساندویچی را Plantema [۷] و Allen [۱۰] انجام دادند. با توجه به اینکه بررسی‌های تحلیلی و تجربی گسترده روی رفتار ایستای ورق‌های ساندویچی انجام نشده است [۱۱]، اما کمتر رفتار ضربه سرعت‌کم ورق‌های ساندویچی بررسی شده است. Sun و Wu [۱۲] به بررسی جزئی روی ضربه‌های سرعت‌کم ورق‌های ساندویچی کامپوزیتی پرداختند. تحلیل‌های اجزای محدود و قانون اصلاح شده تماس هرتز برای ارتباط دادن جابه‌جایی در طول زمان ورق‌های ساندویچی انجام شده است. در پژوهشی Lee و همکاران [۱۳] مدل تحلیلی ضربه را روی صفحه‌های ساندویچی کامپوزیتی مطالعه کردند که در آن هسته به شکل ماده کشسان خطی درنظر گرفته شده و صفحه‌های کامپوزیتی ساندویچی با استفاده از نظریه Mindlin مدل شده‌اند که با به‌کارگیری روش اجزای محدود تحلیل شد. صدیقی و پوریای ولی [۱۴] نفوذ و ضربه سرعت‌کم بر تیرهای ساندویچی با هسته اسفنجی را بررسی کردند. Choi [۱۵] پاسخ زمانی نیروی اعمالی به صفحه‌های ساندویچی کامپوزیتی زیر ضربه سرعت‌کم را که در آن‌ها نفوذ و جذب انرژی در اثر ایجاد آن کوچک باشد، به شکل مدل اجزای محدود ساده بررسی کرد. وی، روش اجزا و جرم و روش اجزای فنر را که پیش‌تر برای صفحه‌های کامپوزیتی به‌کار رفته بود، با مدل‌سازی سه‌بعدی سازه ساندویچی با موفقیت به‌کار گرفت. Dear و همکاران [۱۶] برخورد سرعت‌کم با سازه ورق ساندویچی را به روش تجربی بررسی کرده و ضمن اندازه‌گیری نیرو و جابه‌جایی سازه به این روش، ناحیه خرابی برحسب انرژی را نیز رسم کردند. تعدادی از پژوهشگران در مطالعات خود بر ارائه مدلی برای رفتار ضربه سرعت‌کم سازه‌های ساندویچی الاستومری تلاش کردند که رفتار گرانروکشسان نشان

می‌دهند. Lee و همکاران [۱۷] به روش عددی و تجربی رفتار ضربه سرعت‌کم و آثار هندسه را روی تغییرشکل و انرژی ذخیره را روی اسفنج‌های پلی‌یورتان بررسی کردند. Arora و همکاران [۱۸،۱۹] نیز به روش عددی و تجربی رفتار صفحه‌های ساندویچی با هسته پلیمری را ارزیابی کردند. در پژوهشی دیگر، جمشیدی و همکاران [۲۰] به روش عددی و تجربی رفتار ضربه سرعت‌کم صفحه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری و رویه‌های کامپوزیتی را مطالعه کردند. در این پژوهش، مطالعات مختلف روی عوامل اثرگذار بر رفتار این‌گونه صفحه‌ها انجام شد. با توجه به اینکه مطالعات محدودی روی استفاده از سازه‌های ساندویچی با هسته گرانروکشسان انجام شده است، هدف از انجام این پژوهش، بررسی رفتار صفحه‌های ساندویچی با هسته‌های از جنس اسفنج سبک که رفتار گرانروکشسان نشان می‌دهد، با دو رویه از نوع همسانگرد و ناهمسانگرد بود.

بیان مسئله

به دنبال پژوهش‌های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله روی ارتعاش‌های آزاد و اجباری تیرها و صفحه‌های ساندویچی با هسته‌های گرانروکشسان و بررسی رفتار ضربه سرعت‌کم صفحه‌های ساندویچی با هسته‌های اسفنج و با درنظرگرفتن نظریه‌های مرتبه بالای صفحه‌های ساندویچی و نیز با انجام پژوهش دیگری که در آن به بارگذاری ایستا و دینامیکی رویه‌های ساندویچی با استفاده از نظریه مرتبه بالا و نظریه لایه‌گون پرداخته شده [۲۳-۲۱]، هدف بر این است تا رفتار دینامیکی (ضربه سرعت‌کم) صفحه‌های ساندویچی با هسته‌های دارای رفتار گرانروکشسان و نیز رویه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد، به روش عددی و تجربی زیر ضربه سرعت‌کم بررسی شود.

بر این اساس، در روش عددی، اسفنج استفاده شده در هسته سازه‌های ساندویچی، به شکل غیرخطی مدل شده است که بدین ترتیب رفتار غیرخطی کشسان هسته از قانون ابراسفنج Ogden پیروی می‌کند. در ادامه، نیز رفتار تابع زمان اسفنج و به‌عبارت روشن‌تر، خواص آسایش و خزشی هسته به‌کمک مدل سری Prony تخمین زده شد. برای مدل‌سازی صفحه ساندویچی از مدل یک‌پارچه جامد به‌عنوان هسته اسفنج به همراه تقویت‌کننده‌هایی از نوع رویه در دو سطح بالایی و پایینی سازه استفاده شد. خواص مکانیکی و فیزیکی مربوط به هر بخش نیز پس از تعریف بخش مناسب، به نواحی مختلف اختصاص داده شد. نوع تحلیل استفاده شده نیز دینامیکی صریح با دامنه زمانی حل مناسب درنظر گرفته شد.

با استفاده از روش جدید مبتنی بر روش اجزای محدود و آزمون ساده نفوذ شبه‌ایستای توسعه یافته [۲۴،۲۵]، ضرایب سری Prony محاسبه شد. به بیان ساده، روش مدنظر شامل آزمون ساده نفوذ شبه‌ایستا با سرعت بارگذاری کم و زمان زیاد روی اسفنج‌های موجود، با ضربه‌زن مشابه آزمون ضربه سرعت‌کم است. پس از این آزمون، تعدادی شبیه‌سازی اجزای محدود با مقادیر مختلف برای ضرایب Prony انجام شد. در حالت تجربی، ورق روی دو تکیه‌گاه صلب و ساده قرار گرفت و آزمون‌های ضربه سرعت‌کم در ارتفاع‌های مختلف روی نمونه‌های مختلف ساخته شده، انجام شد. تکیه‌گاه صلب به شکل ورق یک‌پارچه زیر نمونه قرار داده شد. تکیه‌گاه ساده نیز ورقی یک‌پارچه بود که در آن مربعی با ابعاد ۱۰×۱۰ cm خالی شده و نمونه‌ها روی آن قرار گرفتند. تکیه‌گاه‌های مسئله در تحلیل عددی و روش تجربی با نام‌های ساده و صلب معرفی شدند. به‌عبارت دیگر، تکیه‌گاه ساده حاضر از نظر ماهیت، با تکیه‌گاه ساده متداول کمی متفاوت است. به هر ترتیب، شرایط تکیه‌گاهی واقعی آزمون‌ها در شبیه‌سازی اجرا و بررسی شد. نمونه‌های ساخته شده از نظر ضخامت هسته، نوع رویه‌ها و ضخامت آن‌ها متفاوت بوده و آثار آن‌ها در نوع رفتار سازه بررسی شدند. با توجه به اینکه در حل عددی، گرانروکشسان‌بودن ماده فرض شده است، نتایج عددی و تجربی در این محدوده با هم مقایسه شدند.

تجربی

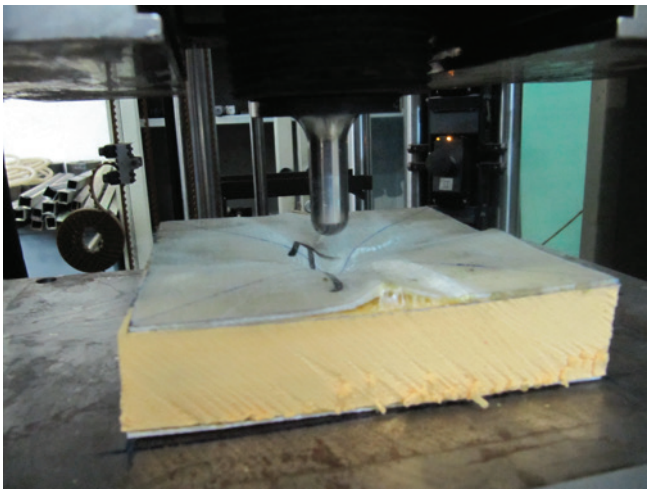
مواد

در این پژوهش، از سه هسته گرانروکشسان با ضخامت‌های ۱، ۱/۳ و ۲/۵ cm با نام صنعتی EVA 180 (اتیلن وینیل استات ۱۸۰) استفاده شد (شکل ۱) که از بازار داخلی تهیه شد. رزین به‌کار رفته برای ساخت رویه‌های کامپوزیتی که نقش ماده زمینه داشت و برای اتصال رویه‌های کامپوزیتی به هسته‌ها به عنوان چسب در ساخت صفحه‌های ساندویچی به‌کار رفت، از نوع اپوکسی همراه با سخت‌کننده HY5160 بود.

دستگاه‌ها و روش‌ها

نمونه‌سازی و انجام آزمون‌های تجربی

مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها، روش انجام آزمون‌ها و چگونگی کار با دستگاه استاندارد آزمون ضربه سرعت‌کم، سقوط وزنه (drop hammer) در ادامه شرح داده شده است. ابتدا مختصری درباره اسفنج‌های گرانروکشسان به‌کار رفته، توضیح داده شده و چگونگی اندازه‌گیری خواص مکانیکی آن‌ها بحث شده است. سپس، چگونگی ساخت نمونه‌های ساندویچی با استفاده از رویه‌های کامپوزیتی با الیاف تقویت شده و خواص مکانیکی معلوم و هسته‌های اسفنجی با



شکل ۱- نمونه‌ای از صفحه ساندویچی استفاده شده در پژوهش با استفاده از اسفنج گرانروکشسان ۲/۵ cm.

خواص گرانروکشسان توضیح داده شده است. در ادامه نیز آزمون‌های ضربه سرعت‌کم روی دو تکیه‌گاه ساده و صلب، شرح داده شده‌اند.

اسفنج‌های گرانروکشسان

امروزه اسفنج‌های گرانروکشسان به دلیل خواص ویژه‌ای که در جذب انرژی و میرایی در رفتارهای مکانیکی نشان می‌دهند، کاربردهای گوناگونی دارند. از کاربردهای آن‌ها می‌توان به ساخت صفحه‌های ساندویچی با هسته‌های اسفنجی و رفتار گرانروکشسان اشاره کرد که جزء سازه‌های ساندویچی سبک دسته‌بندی می‌شوند و در سازه‌های دریایی و هوایی، برای تقویت خواص میراکننده آن‌ها استفاده می‌شود. از مزیت‌های این سازه‌ها افزون بر سبکی آن‌ها، می‌توان به بهبود رفتار میرایی زیر بارگذاری ضربه‌ای و تغییرشکل‌های سازه با جذب انرژی بیشتر اشاره کرد.

آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی اسفنج‌ها

برای اندازه‌گیری مدول یانگ و ضرایب پواسون، اسفنج‌ها (EVA 180)، با استفاده از دستگاه کشش و فشار Zwick مدل Z250-Z001 ساخت آلمان مطابق استانداردهای موجود، زیر فشار یکنواخت قرار گرفتند. گفتنی است، خواص مکانیکی کشسان موادی مثل اسفنج‌های گرانروکشسان در کشش و فشار می‌تواند به مقدار شایان توجهی با هم متفاوت باشند. بنابراین، با توجه به ماهیت بارگذاری دینامیکی، که به شکل ضربه قائم ضربه‌زن صلب بر سطح ساندویچ‌های با هسته اسفنجی با ماهیت گرانروکشسان است، برای دقت بیشتر، از آزمون فشار برای تعیین مدول یانگ این مواد ناهمسانگرد استفاده شد. مقادیر ضرایب کشسان مادی در جهت‌های مختلف، تنها یک

جدول ۱- خواص مکانیکی اسفنج‌های گرانروکشسان (EVA 180).

E_z (GPa)	G_{CX} (GPa)	G_{cy} (GPa)	υ_{12}	υ_{23}	ρ (kg/m^3)
۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۳۲	۰/۳۲	۱۷۱/۴

تخمین اولیه رفتار کشسان در مقادیر کرنش کوچک به‌دست می‌دهد. در ادامه، برای شبیه‌سازی دقیق رفتار ابرکشسان، داده‌های آزمون برای استخراج ضرایب مدل‌های ابرکشسان اسفنج Ogden به‌کار رفت.

آزمون‌های فشار و برش روی اسفنج‌های گرانروکشسان طبق استاندارد ASTMD 5308 و ASTMM 2718 [۲۶] با دستگاه Zwick با دو سطح کاملاً موازی در دما و رطوبت نرمال آزمایشگاه انجام شد. سرعت انتخاب شده با توجه به دامنه دستگاه برابر ۵ mm/min بود. ابتدا، آزمون‌های برش براساس استاندارد AASHTO M251 روی نمونه‌های هسته استفاده شده در ساندویچ‌ها و در ادامه نیز آزمون فشار روی این هسته‌ها انجام شد. در جدول ۱ خواص مکانیکی این هسته‌ها آمده است.

رویه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، رزینی که برای ساخت رویه‌های کامپوزیتی استفاده شد، از نوع اپوکسی همراه با سخت‌کننده HY5160 بود. نوع الیاف تقویتی به‌کار رفته در ساخت رویه‌های کامپوزیتی و چگالی مربوط به آن، در جدول ۲ آمده است. مدول‌های یانگ برای رویه‌های کامپوزیتی با الیاف شیشه تک‌جهتی و زمینه اپوکسی استفاده شده در این پژوهش نیز با استفاده از آزمون‌های براساس استاندارد ASTM D638M معین شده است. با توجه به تشابه مدول‌های یانگ به‌دست آمده از آزمون با مراجع [۲۷،۲۸]، ضرایب پواسون و مدول برشی مربوط از همین مراجع استخراج شده‌اند. خواص مکانیکی رویه‌های کامپوزیتی به‌کار رفته در ساندویچ‌های استفاده شده در پژوهش، در جدول ۳ آمده است.

رویه‌های آلومینیمی استفاده شده در ساندویچ‌ها

در کنار رویه‌های کامپوزیتی استفاده شده در ساخت صفحه‌های ساندویچی، از رویه‌های آلومینیمی نیز برای بررسی اثر رویه‌های مختلف روی این نوع سازه‌ها، استفاده شده است. شکل ۲ نمودار

جدول ۲- الیاف به‌کار رفته در ساخت رویه‌های کامپوزیتی.

الیاف	بافت	چگالی سطحی (g/m^2)
شیشه	پارچه با الیاف تک‌جهتی	۲۲۵

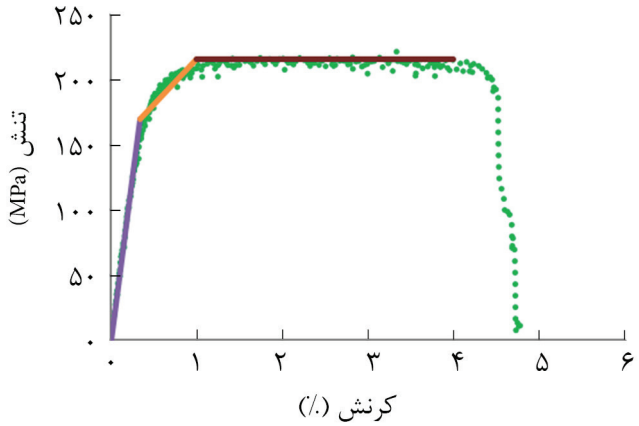
مهندسی آزمون کشش نمونه‌های آلومینیمی و جدول ۴ خواص مکانیکی رویه‌های آلومینیمی به‌کار رفته در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای ساخت نمونه‌های ساندویچی با ورق‌های آلومینیم، از ضخامت ۱/۲ mm برای مشابهت با رویه‌های کامپوزیتی استفاده شد.

روش انجام آزمون‌ها

از روش لایه‌چینی دستی برای الیاف تک‌جهتی، به منظور ساخت رویه‌های کامپوزیتی مدنظر استفاده شده است. با توجه به تنوع موجود در هسته‌ها و رویه‌های استفاده شده در آزمون‌ها، نمونه‌های مختلفی به‌دست می‌آید (جدول ۵). در جدول ۶، سایر مشخصات صفحه‌های ساندویچی ساخته شده برای انجام آزمون‌های ضربه سرعت‌کم، آمده است. آزمون‌های بار ضربه سرعت‌کم روی تمام نمونه‌های ساندویچی مربع‌شکل ساخته شده با ابعاد ۱۵ cm، با دستگاه استاندارد سقوط آزاد موجود در آزمایشگاه قطب ترموالاستیسیته دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شد. این دستگاه ساخت ایران بوده و حداکثر ارتفاع این دستگاه حدود ۵ m متر و حداکثر جرم ضربه‌زن ۱۵ kg است. در شکل ۳، نمایی از دستگاه استاندارد سقوط آزاد وزنه نشان داده شده است. یک حسگر پیزوالکتریک شتاب‌سنج مدل 352C67 ساخت شرکت PCB Piezotronics کانادا، به بخش بالایی ضربه‌زن متصل شده است و با کابلی لاکی به دستگاه کنترل‌کننده متصل شده است. این دستگاه کنترل‌کننده رقمی برای دریافت ورودی‌های مربوط به آزمون از قبیل مشخصات نمونه، ارتفاع و جرم ضربه‌زن است. داده‌های انتقالی به رایانه مقادیر شتاب برحسب متر بر مجذور ثانیه و زمان برخورد هستند. شتاب‌های اندازه‌گیری شده با حسگر به کنترل‌کننده منتقل می‌شوند. خروجی‌های دستگاه با نرم‌افزار به شیوه اکسل و متن در رایانه ذخیره می‌شوند. داده‌های شتاب–زمان ثبت شده، ناشی از شتاب نیروی عکس‌العمل وارد شده از طرف نمونه تحت آزمون به ضربه‌زن است. پیش از قراردادن هر نمونه تحت بارگذاری ضربه‌ای، ابتدا نمونه در محل مناسب خود با تکیه‌گاهی که شرایط مرزی ساده و صلب را برآورد کند، قرار داده می‌شود. مشخصات ضربه‌زن و نمونه، شامل

جدول ۳– خواص مکانیکی برای رویه کامپوزیتی شیشه–اپوکسی [۲۷،۲۸].

خواص	مقدار	خواص	مقدار
G_{23} (GPa)	۰/۰۱۷	E_1 (GPa)	۲۵
υ_{12}	۰/۲۵	E_2 (GPa)	۰/۰۱۳
υ_{23}	۰/۲۵	G_{13} (GPa)	۰/۰۱
ρ (kg/m³)	۱۴۷۵	G_{12} (GPa)	۰/۰۱



شکل ۲– نمودار تنش–کرنش رویه آلومینیمی در اثر بارگذاری کششی.

ارتفاع ضربه‌زن و ضخامت نمونه به کنترل‌کننده داده می‌شود و با زدن کلید تنظیم ارتفاع، ضربه‌زن در ارتفاع مشخصی که برای دستگاه معین شده است، قرار می‌گیرد. در نهایت با زدن کلید شروع، ضربه‌زن از ارتفاع قرار گرفته، رها شده و سقوط آزاد می‌کند. با برخورد ضربه‌زن به نمونه، داده‌های شتاب–زمان از طریق کنترل‌کننده به رایانه متصل به دستگاه، منتقل می‌شود. با توجه به تکرارپذیری زیاد دستگاه، که به تجربه ثابت شده، برای هر نوع آزمون، حداقل سه نمونه آزمون شد. از میانگین نتایج سه نمونه، و در حالت نبود تفاوت محسوس بین پاسخ‌های سه نمونه یکسان استفاده شد. سنبه استفاده شده برای ضربه‌زن از یک نوع و اندازه، به شکل نیم‌کره و با شعاع ۱۶ mm و با نوک آبکاری و سخت شده، بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمون‌ها، سیگنال‌های مزاحمی در خروجی مشاهده شده که با استفاده از روش متوسط‌گیری، یک منحنی برای کم‌کردن اثر سیگنال‌های مزاحم، از خروجی‌های پاسخ گذرانده شد. افزون بر این، برای حذف سیگنال مزاحم بسامد زیاد، از فیلترهای مناسب پایین‌گذر استفاده شد. در دو حالت تکیه‌گاه‌های ساده و صلب آزمون‌های تجربی بررسی می‌شود. در حالت اول، رویه پایینی ورق در تماس با سطح صاف و یک‌پارچه قرار می‌گیرد. در حالت دوم، رویه پایینی روی صفحه‌هایی که در آن مربعی با ابعاد ۱۰×۱۰ cm خالی شده باشد، قرار داده شده و با همان سنبه به آن ورق‌ها نیرو وارد می‌شود (شکل ۴). در حالت تکیه‌گاه ساده، یک ورق توخالی نیز بدون اعمال نیرو روی صفحه ساندویچی قرار می‌گیرد. این ورق برای جلوگیری از لغزش و پرش

جدول ۴– خواص مکانیکی برای رویه آلومینیمی.

E (GPa)	G (GPa)	ν	ρ (kg/m³)
۵۰	۱۹/۰۸	۰/۳۱	۲۷۰۰

جدول ۵- مشخصات رویه‌های کامپوزیتی و آلومینیمی استفاده شده در نمونه‌ها.

شماره نمونه	آرایش چیدمان	تعداد لایه‌ها	ضخامت (mm)	جنس
C1	$[۰/۹۰]_s$	۴	۱/۲	شیشه- اپوکسی
C2	[۰]	۱	۱/۲	آلومینیم

صفحه بوده و نقشی در رفتار و شرایط مرزی مسئله ندارد.

مدل‌سازی عددی

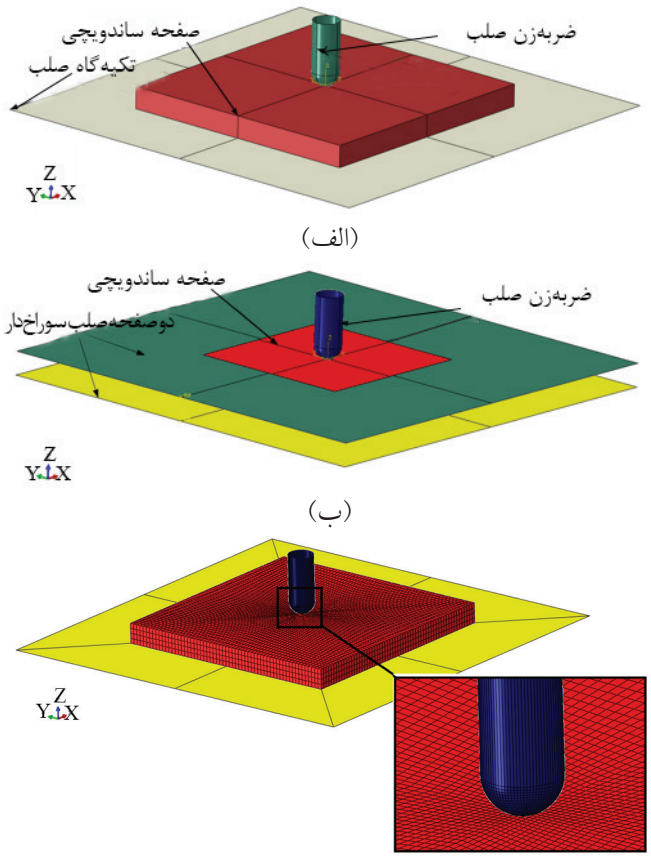
نرم‌افزار استفاده شده در این پژوهش، Abaqus بوده و در برخی موارد از قابلیت‌های برنامه‌نویسی، شامل ایجاد مستقیم فایل ورودی و اسکریپت‌نویسی python بهره‌برداری شده است. به‌طور ویژه، برنامه‌نویسی فایل ورودی برای اصلاح و بازتعریف سطوح تماس داخلی اجزا پس از تخریب رویه‌های سازه ساندویچی و اسکریپت‌نویسی به منظور اجرای مطالعه پارامتری، به‌کار رفته است. با وجود ماهیت ویژه و رفتار غیرخطی کشسان اسفنج استفاده شده در هسته سازه‌های ساندویچی، این بخش به شکل غیرخطی و به‌کمک مدل ابراسفنج Ogden و براساس استفاده از تابع پتانسیل انرژی کرنشی تعریف شده است. حال آنکه رفتار تابع زمان اسفنج و به‌عبارت روشن‌تر، خواص آسایش و خزشی هسته به‌کمک مدل سری Prony تخمین زده شده است. بدیهی است، برای افزایش دقت در مدل‌سازی می‌توان با استفاده از داده‌های آزمون، مثلاً فشار تک‌محوری، از روابط غیرخطی کشسانی اسفنج مانند مدل Ogden، استفاده کرد. برای مدل‌سازی صفحه ساندویچی از یک مدل یک‌پارچه جامد به‌عنوان هسته اسفنج به همراه تقویت‌کننده‌هایی از نوع رویه در دو سطح

جدول ۶- ورق‌های ساندویچی گرانروکشسان با رویه‌های کامپوزیتی و آلومینیمی.

شماره نمونه	ضخامت هسته (mm)	رویه‌های بالایی و پایینی
SP1	۱۰	C1
SP2	۱۰	C2
SP4	۱۳	C1
SP5	۱۳	C2
SP7	۲۵	C1
SP8	۲۵	C2

شکل ۳- نمایی از دستگاه سقوط آزاد ضربه.

بالایی و پایینی سازه استفاده شده است. خواص مکانیکی و فیزیکی مربوط به هر بخش نیز پس از تعریف بخش مناسب، به نواحی مختلف اختصاص داده می‌شود. جرم ضربه‌زن نیز به شکل یک جزء



شکل ۴- مجموعه سرهم‌شده در مدل نمونه تکیه‌گاه: (الف) صلب و (ب) ساده و (ج) مش نظیر در مدل نمونه.

جرم متمرکز ۲/۹ kg به نقطه مرجع سطح صلب مدنظر متصل می‌شود. تماس ضربه‌زن و صفحه نیز بدون اصطکاک فرض می‌شود. به جز صفحه ساندویچی، تمام قطعه‌ها اعم از فک‌های صلب و ضربه‌زن به شکل سطوح صلب گسسته با اجزای R3D4 مدل می‌شوند. نوع تحلیل استفاده شده نیز دینامیکی صریح با دامنه حل مناسب درنظر گرفته می‌شود. علت انتخاب این روش را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

ماهیت دینامیکی مسئله و لزوم استفاده از تحلیل دینامیکی (صریح یا ضمنی)، افزایش چشم‌گیر در سرعت و کارایی تحلیل، به‌ویژه در مسائل پیچیده، مانند ضربه و نفوذ که نیازمند تحلیل‌های متعدد برای کالیبره‌کردن مدل عددی است، دقت مناسب و بیشتر در مدل‌سازی شرایط برهم‌کنش تماسی مانند اصطکاک، قابلیت پیش‌بینی بهتر زمان حل با تغییر اندازه اجزای و تراکم مش در مقایسه با روش ضمنی و عدم وجود مشکل واگرایی حل در روش صریح به دلیل ماهیت غیرتکراری این روش در مقایسه با روش ضمنی.

در روش ضمنی در بسیاری از موارد به‌ویژه در مسائل با شرایط تماسی پیچیده، درجه آزادی نامقید مانند سنبه ضربه‌زن، همگراکردن حل بسیار پیچیده و گاهی ناممکن است. همچنین کارایی مناسب روش صریح به دلیل نرمی نسبی هسته ورق ساندویچی و بالابودن گام زمانی پایدار است. بر این اساس و با توجه به زمان لازم آسایش در اسفنج‌های EVA و نیز هزینه محاسبات و دقت آن، بازه زمانی ۲ s انتخاب شده است. این زمان در واقع با درنظرگرفتن هم‌زمان دقت و زمان محاسبات انتخاب شده است. برای اثبات این موضوع، یک بار بازه زمانی ۴ s نیز درنظر گرفته شده که نتایج حاصل تغییر چندانی نسبت به بازه ۲ s نداشته است. بدیهی است که دامنه زمانی مزبور برای تحلیل شبه‌ایستای نفوذ درنظر گرفته شده و برای شبیه‌سازی ضربه، دامنه زمانی کمی بیش از مدت زمان یک ضربه کامل است.

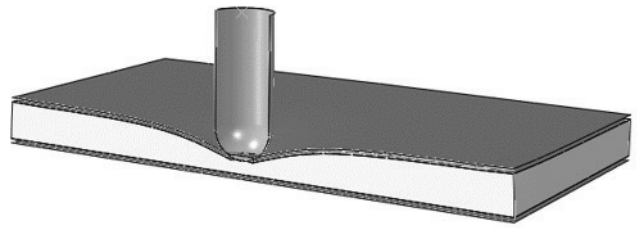
در مش‌بندی تمام قطعه‌ها اعم از بخش‌های انعطاف‌پذیر و صلب، دقت بسیار زیادی به‌عمل آمده است. نتیجه مدل‌سازی اجزای محدود سازه به گونه‌ای است که شاخص‌های کیفی اجزایی، مانند زوایای داخلی و نسبت منظری، در محدوده مناسبی قرار دارند. نکته تأمل‌برانگیز آن است که مش‌بندی قطعه با وجود برآورده کردن بحث استقلال نتایج از مش‌بندی، مصالحه‌ای میان دقت تحلیل و هزینه‌های محاسباتی است. به بیان واضح‌تر، با توجه به ماهیت ذاتی تحلیل‌های دینامیکی صریح، کاهش اندازه اجزا به‌شدت بر زمان تحلیل و گام پایدار زمانی اثر منفی دارد. در شکل ۴ مجموعه سرهم‌شده و مش نظیر در یک مدل نمونه نشان داده شده است. درباره محاسبه ضرایب سری Prony، روش‌های متفاوتی وجود دارد. روش اصلی تعیین این ضرایب، آزمون‌های تابع زمان مختلف مانند خزش و آسایش است. به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی این نوع آزمون‌ها، دردسترس نبودن امکانات لازم، روش جدیدی مبتنی بر روش اجزای محدود و آزمون ساده نفوذ شبه‌ایستا توسعه یافته است [۲۶]. به بیان ساده روش مدنظر شامل یک آزمون ساده نفوذ شبه‌ایستا با سرعت بارگذاری کم و آهسته روی اسفنج‌های موجود با نفوذکننده‌ای مشابه آزمون ضربه سرعت‌کم است. در این آزمون، نمودار نیرو برحسب تغییر مکان به‌دست می‌آید. با توجه به ماهیت شبه‌ایستا و زمان طولانی بارگذاری، وارد شدن آثار خزش و آسایش بدیهی خواهد بود. در نتیجه مقادیر نیروی نفوذی در این آزمون به ازای جابه‌جایی مدنظر، نسبت به نیروی بدون اثر گرانروکشسان، کمتر خواهد بود. پس از این آزمون، تعدادی شبیه‌سازی اجزای محدود با مقادیر مختلف برای ضرایب Prony انجام می‌شود.

در این بخش برای سهولت، از اسکریپت‌نویسی به منظور مطالعه پارامتری بهره‌برداری شده است. در انتها با کمینه‌کردن خطا میان نیروی شبیه‌سازی و آزمون، ضرایب Prony واقعی به‌دست می‌آید. مقادیر ضریب جمله اول سری Prony و زمان نظیر آن به ترتیب ۰/۱۹۵ و ۰/۹۱ s بوده که در جدول ۷ آمده است. با توجه به وضعیت ویژه شبیه‌سازی و لزوم تعیین مقادیر دقیق پارامترها و نیروی ضربه، عملاً کیفیت زیاد مش‌بندی، از اهمیت بسیاری برخوردار است. به عبارت دیگر کیفیت هندسه اجزایی، نوع اجزا و غیره در روند تحلیل کاملاً مؤثر است. مش‌بندی قطعه انعطاف‌پذیر صفحه ساندویچی، شامل اجزای غیرخطی C3D8R برای هسته اسفنج و اجزای خطی S4R برای رویه‌هاست. برای جلوگیری از تغییرشکل و اعوجاج شدید اجزای جامد، مش‌بندی در آغاز تحلیل با نسبت منظر بزرگ و حدود ۵ در جهت ضخامت صفحه انجام شده است. بدین ترتیب لزوم استفاده از روش‌های مش‌بندی تطبیقی مانند ALE برطرف می‌شود. در شکل ۵ نماهای مختلفی از برخورد ضربه‌زن با صفحه در حالت برش خورده قابل مشاهده است.

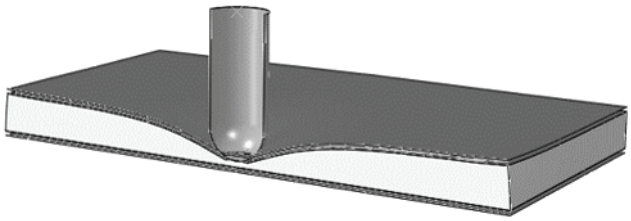
رویه‌های کامپوزیتی صفحه ساندویچی به‌کمک بخش‌بندی از نوع پوسته کامپوزیت و با روش تقویت‌کننده سطحی پوسته در چهارلایه $[0/90]_2$ به‌طور متقارن چیده شده‌اند. لایه‌های استفاده شده در ساخت لایه‌ها از جنس شیشه–اپوکسی و روش ساخت آن‌ها لایه‌چینی دستی

جدول ۷– مقادیر ضریب اول سری Prony.

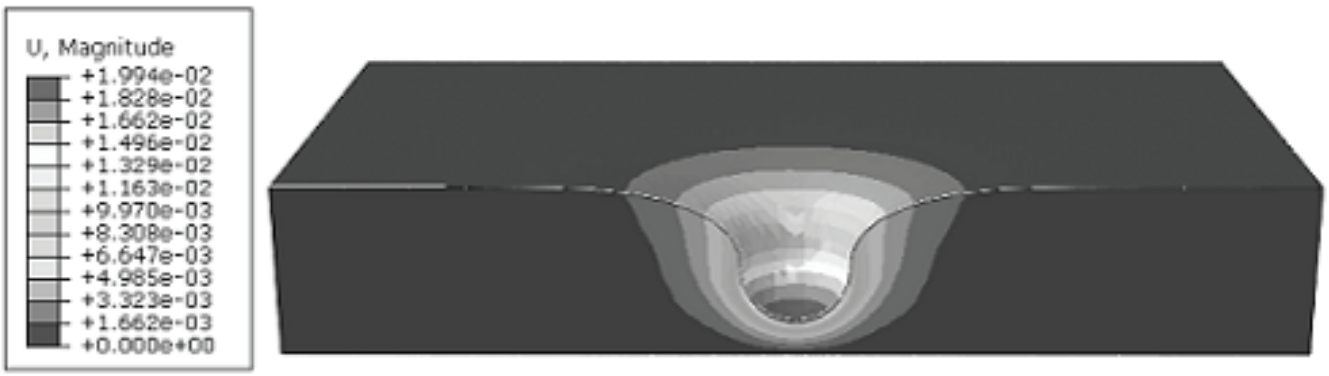
پارامترهای گرانروکشسان سری Prony	
τ (s)	K و g
۰/۹۱	۰/۱۹۵



است. بدین ترتیب مقدار حجمی تقریبی الیاف حدود ٪۵۰-۴۰ است.
(الف)



هسته نرم الاستومری تخریبی تعریف نشده و فقط رفتار ابرکشسان و
(ب)



شکل ۵- (الف) نمایی از مراحل برخورد ضربه‌زن با صفحه ساندویچی و (ب) نمایی از تحلیل اجزای محدود پس از برخورد ضربه‌زن با صفحه ساندویچی.

با توجه به ایجاد خرابی در سطح رویه‌ها به‌ناچار باید معیار مناسب تعریف شود. از بهترین معیارهای استفاده شده در شبیه‌سازی تخریب کامپوزیت‌های لایه‌ای، معیار Hashin است. ضرایب این معیار با توجه به مرجع ۹ در جدول ۸ آمده است. این ثابت‌ها عبارت از مقادیر استحکام کششی، فشاری و برشی در جهت‌های مختلف برای لایه‌های تک‌جهتی شیشه-اپوکسی بوده که مقادیر آن برحسب مگاپاسکال است.

برای تعریف معیار خرابی بخش رویه‌های آلومینیمی، از دو رویکرد مختلف استفاده شده است. اول مدل ساده تخریبی برشی و مومسانی همسانگرد با استفاده از کرنش پلاستیک معادل شکست حدود ٪۵ است (شکل ۲). دوم، با استفاده از مومسانی و مدل تخریب Johnson-Kouk زمان حل افزایش یافته بدون اینکه دقت مسئله ارتقای چشم‌گیری بیابد. به همین دلیل، در شبیه‌سازی حاضر از رویکرد اول استفاده شده است. بدیهی است در این پژوهش، ضرایب مربوط به روش دوم برای آلومینیم ارائه نشده است. در بخش گرانروکشسان آن مدل شده است. البته نتایج آزمون نیز مؤید این مطلب است. اصولاً اسفنج‌های نرم دچار تخریب و مومسانی نشده و سازوکار تخریب آن‌ها از نوع ماندگی دائم (Mullin's Effect) است.

درباره تعریف تماس نکات زیر شایان ذکر است که در سازه‌های همراه با تخریب و فرسایش اجزا، شبیه‌سازی تماس بسیار پیچیده است. علت اصلی این موضوع تغییر در سطوح تماس است. به عبارت دیگر در آغاز تحلیل، سطوح تماس شامل سطوح خارجی اجزای مدل اجزای محدود است. حال آنکه با تخریب و حذف اولین اجزا، سطوح داخلی مدل به سطوح تماس خارجی تبدیل می‌شوند. اجرای این فرض مستلزم تعریف سطوح تماس شامل تک‌تک سطوح اجزای مدل است. بدین منظور از قابلیت کدنویسی استفاده شده است. شایان ذکر است، ضربه‌زن به شکل سطح صلب گسسته تعریف و با نهایت دقت مش‌بندی شده است. در مش‌بندی بخش‌های منحنی از روش دانه‌بندی دستی برای انطباق سطح اجزای با سطح هموار هندسی و در پی آن کاهش نوفه خروجی استفاده شده است.

جدول ۸- ضرایب معیار Hashin بر حسب مگاپاسکال.

S_1^+	S_1^+	S_1^+	S_2^-	S_{12}
۱۲۸۰	۶۹۰	۴۹	۱۵۸	۶۹

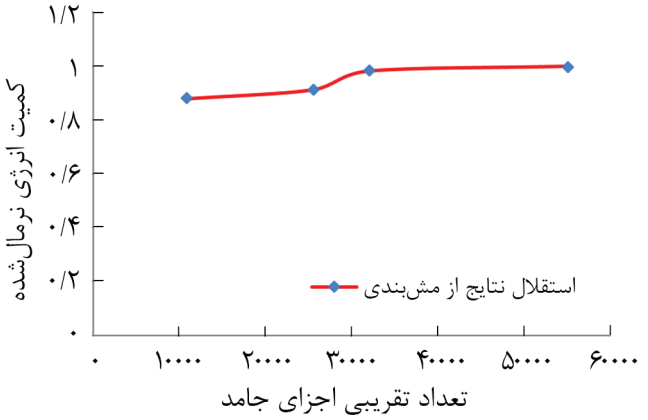
استقلال نتایج از مش‌بندی

از آنجا که تنها اجزای انعطاف‌پذیر مدل مورد بحث، شامل هسته و رویه‌های صفحه ساندویچی است، شبیه‌سازی با مدل‌های مختلفی و

جدول ۹- استقلال نتایج از مش‌بندی حاصل از روش اجزای محدود.

تراکم مش	تعداد تقریبی اجزای جامد	کمیت انرژی نرمال شده
درشت	۱۰۸۰۰	۰/۸۷۹
متوسط	۲۵۶۰۰	۰/۹۱۳
ریزشدن محلی	۳۲۰۰۰	۰/۹۸۲
ریز	۵۵۱۲۵	۱/۰

تعداد اجزای مختلف اجرا شده است که در بخش نتایج به شکل مش‌بندی ریز، متوسط، درشت و نیز مش‌بندی با ریزشدگی محلی بررسی شده است. تعداد تقریبی اجزا در هر حالت در جدول ۹ آمده است. از طرف دیگر، به دلیل استفاده از مقطع پوسته و اجزای آن در مدل‌سازی اثر رویه‌ها و تابعیت مش این ناحیه به مدل اجزای محدود هسته زیر آن، در بحث بررسی استقلال نتایج از مش‌بندی تنها تعداد اجزای مربوط به هسته مورد توجه قرار گرفته است. در این حالت، نتیجه مطالعه استقلال مش‌بندی در جدول ۹ و شکل ۶ آمده است. بدیهی است، برای بررسی استقلال نتایج از مش‌بندی باید متغیر یا متغیرهای میدان و نیز محل داده‌برداری مشخص شود. در این مطالعه با توجه به پیچیدگی مسئله و ماهیت دینامیکی آن نمی‌توان از مقادیر تنش، کرنش و جابه‌جایی در گره‌ها به‌سادگی استفاده کرد. در نتیجه، از متغیر انتگرالی انرژی کرنشی و جنبشی کل ورق به حالت نرمال شده برای بررسی استقلال استفاده شده است. این انرژی که در پژوهش حاضر از آن به‌عنوان انرژی نرمال شده یاد می‌شود، از نرمال‌کردن انرژی ذخیره شده در سازه‌ها نسبت به جرم کل سازه در مقایسه با نوع جزءبندی به‌دست می‌آید. بنابراین، با دانستن جرم هر ورق و انرژی کل ذخیره شده در آن می‌توان به کمیت انرژی نرمال سازه دست یافت که درواقعیت انرژی‌های موجود هر نوع جزءبندی نسبت به انرژی ریزترین حالت جزءبندی تقسیم شده و نسبت به آن سنجیده می‌شود. با نسبت‌گیری بین انرژی‌های ویژه موجود، در این حالت کمیتی بدون‌بعد به‌دست می‌آید. همان‌طور که از نتایج مشخص است، هرچه اجزا ریزتر باشند، استقلال نتایج از مش‌بندی بیشتر مشاهده می‌شود، به نحوی که در حالت ریز که مقدار کمیت انرژی نرمال شده، مقدار یک را نشان می‌دهد، خطای شبیه‌سازی بسیار کم و کمتر از ۱٪ است. با افزایش تعداد اجزا، تغییر زیادی در انرژی جنبشی و کرنشی بروز نمی‌کند و به عبارت روشن‌تر نتایج موازنه انرژی مستقل از مش‌بندی است.



شکل ۶- روند مطالعه استقلال نتایج از مش‌بندی.

نتایج و بحث

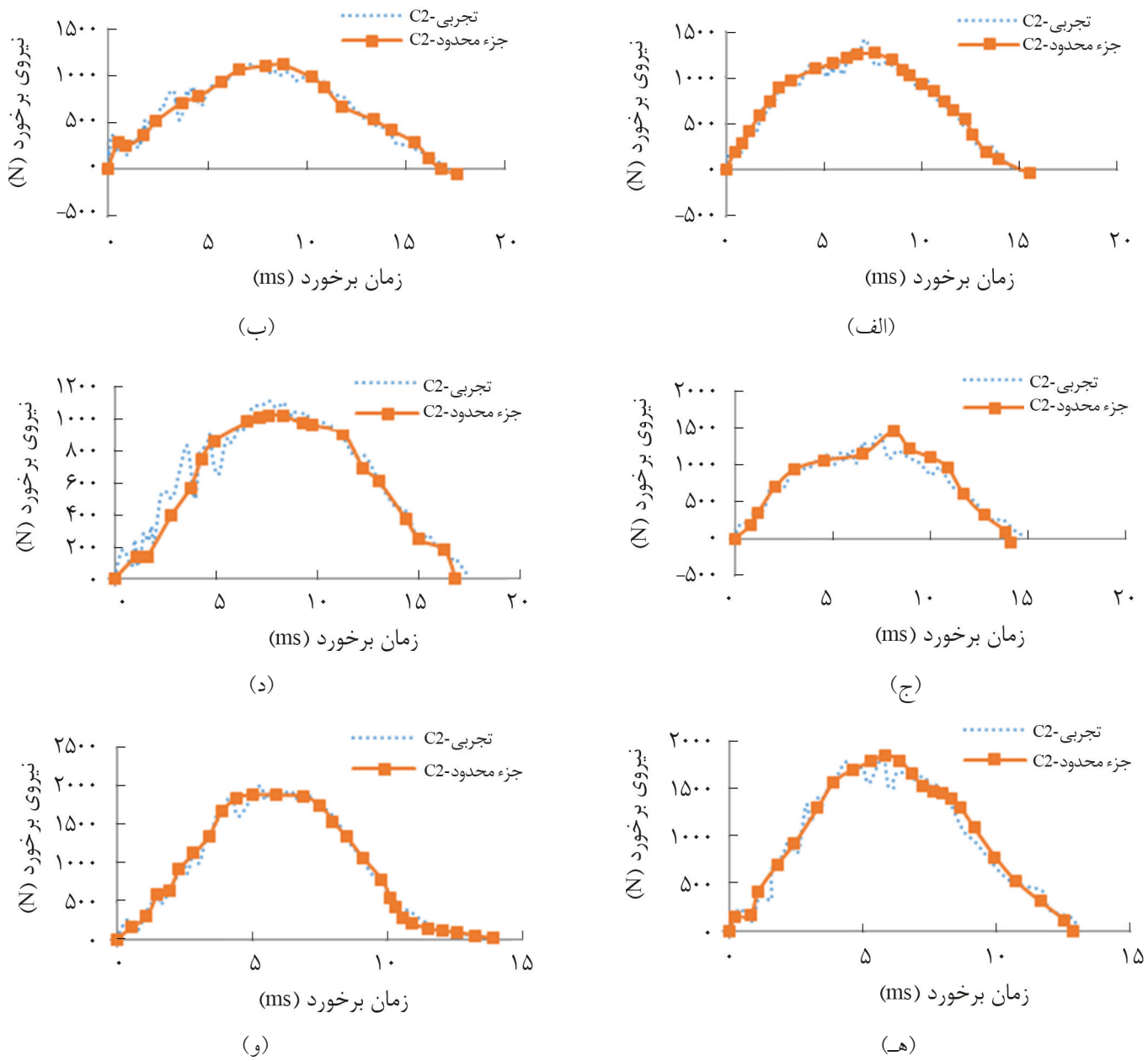
در این بخش، نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی دینامیکی انجام شده با نتایج حاصل از حل عددی مسئله، ارائه و بحث و مقایسه شده است.

اثر ضخامت هسته در پاسخ ضربه

در شکل ۷ نتایج عددی و تجربی نیروی ضربه ناشی از بار دینامیکی برحسب زمان تماس در ارتفاع ۲۵ cm و جرم ضربه‌زن ۲/۹ kg، بر نمونه‌های آلومینیمی و کامپوزیتی روی تکیه‌گاه‌های ساده مقایسه شده است. با توجه به تشابه موجود در نتایج به‌دست آمده از آزمون روی تکیه‌گاه صلب، از ارائه نتایج حاصل در این بخش خودداری شده و تحلیل‌های انجام شده تعمیم‌پذیر به این تکیه‌گاه نیز است. همان‌طور که از نمودارهای مربوط به نیروی تماسی برحسب زمان برخورد در نمونه‌های مختلف و در تکیه‌گاه ساده مشاهده می‌شود، هرچه ضخامت هسته بیشتر می‌شود، زمان مورد نیاز برخورد کاهش می‌یابد.

جدول ۱۰- درصد خطای بیشینه شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج تجربی نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی و کامپوزیتی روی تکیه‌گاه ساده.

نوع سازه	خطا (٪)
SP1	۱۱/۰۵
SP2	۸/۴۹
SP4	۲/۴۶
SP5	۲/۰۹
SP7	۱/۱۱
SP8	۱/۴۷



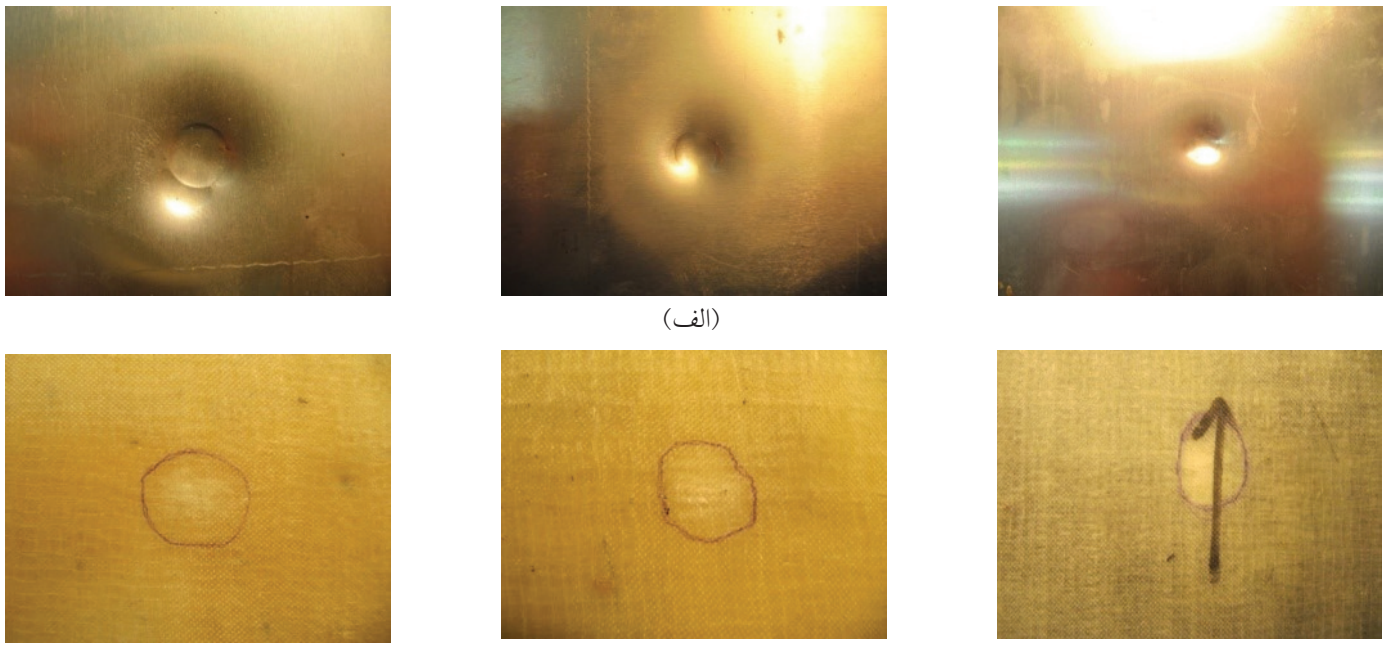
شکل ۷- مقایسه نتایج عددی و تجربی نیروی ضربه ناشی از بار دینامیکی برحسب زمان تماس در ارتفاع ۲۵ cm و جرم ضربه‌زن ۲/۹ kg روی نمونه‌های آلومینیمی (سمت چپ) و کامپوزیتی (سمت راست) روی تکیه‌گاه‌های ساده.

جدول ۱۱- بیشینه نیروی وارد شده به نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی و کامپوزیتی روی تکیه‌گاه ساده.

انواع نمونه‌ها	بیشینه نیروی رویه (N)	
	آلومینیمی	کامپوزیتی
هسته ۱ cm	۱۹۶۰	۱۹۸۴
هسته ۱/۳ cm	۱۹۲۰	۱۷۳۲
هسته ۲/۵ cm	۱۸۹۸	۱۶۸۴

جدول ۱۲- بیشینه نیروی وارد شده به نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی و کامپوزیتی روی تکیه‌گاه صلب.

انواع نمونه‌ها	نیروی بیشینه رویه (N)	
	آلومینیمی	کامپوزیتی
هسته ۱ cm	۲۰۴۰	۲۰۴۸
هسته ۱/۳ cm	۱۸۱۰	۲۰۱۰
هسته ۲/۵ cm	۱۷۳۲	۱۸۴۰

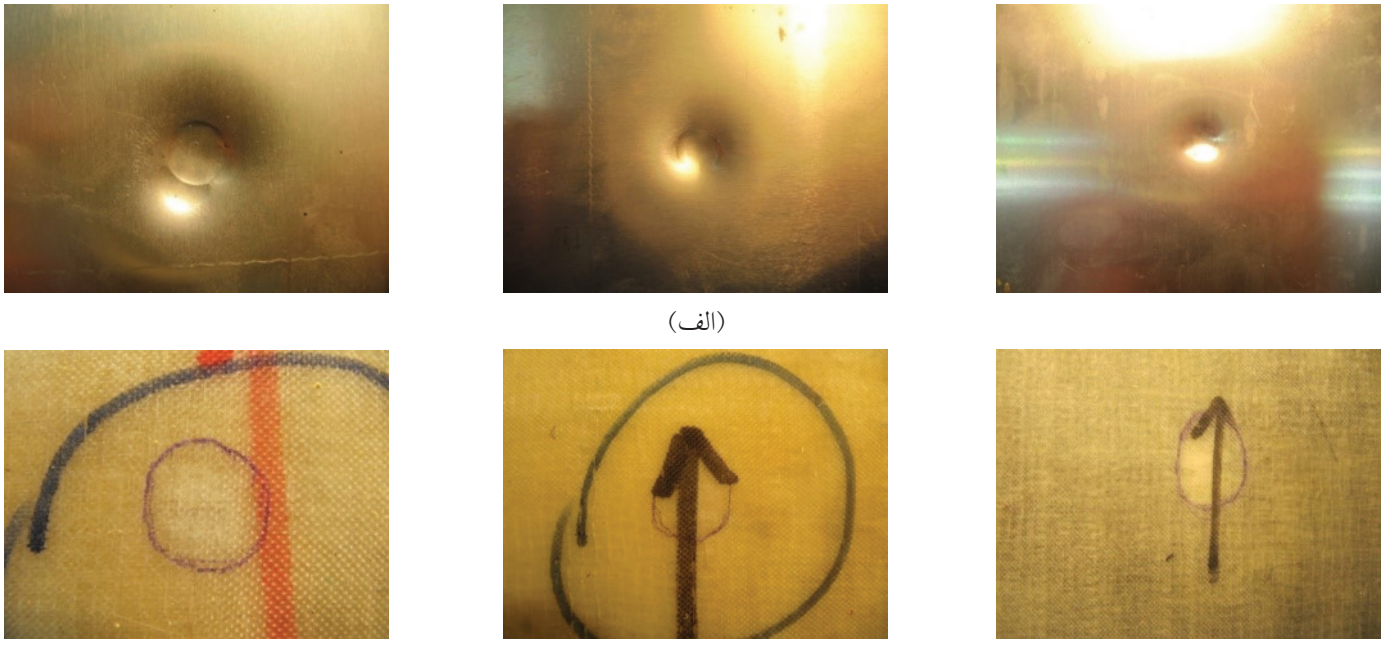


(الف)

(ب)

شکل ۸- شکل خرابی نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های: (الف) آلومینیمی و (ب) کامپوزیتی در تکیه‌گاه صلب.

دلیل آن است که هرچه ضخامت زیاد می‌شود، سفتی مربوط به سازه افزایش و در نتیجه خرابی به سمت محلی‌ترشدن پیش می‌رود. جدول ۱۰ مقدار خطای نتایج عددی نسبت به نتایج تجربی را نیز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، هرچه ضخامت هسته افزایش می‌یابد، مقدار خطای بین نتایج تجربی و عددی نیز کاهش می‌یابد. همچنین، درصد خطا در نمونه‌ها با رویه‌های کامپوزیتی بیشتر از نمونه‌های با رویه‌های آلومینیمی است. همان‌طور که از جدول‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص است، هرچه ضخامت هسته‌ها افزایش می‌یابد، مقدار



(الف)

(ب)

شکل ۹- شکل خرابی نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های: (الف) آلومینیمی و (ب) کامپوزیتی در تکیه‌گاه ساده.

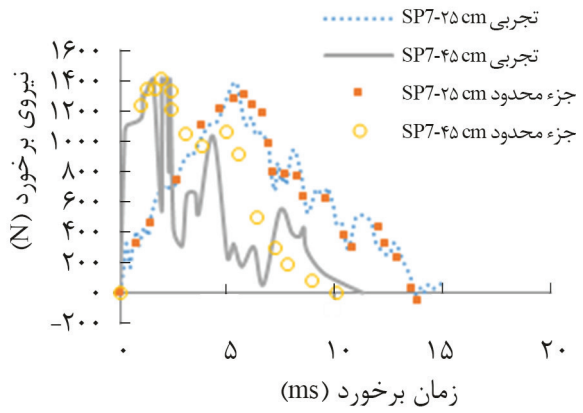
جدول ۱۳- بررسی تجربی مقدار تغییرشکل‌های دائمی در نمونه‌های ساندویچی.

نوع تکیه‌گاه	نمونه‌ها	مساحت ناحیه آسیب‌دیده (mm^2)	عمق خرابی (mm)
ساده	SP2	۳۱/۹۴	۲/۵۱
	SP1	۲۳/۲۶	۰
صلب	SP2	۳۳/۷۹	۲/۵۸
	SP1	۱۹/۷۱	۰
ساده	SP5	۲۸/۷۹	۲/۵۴
	SP4	۱۹/۲۲	۰
صلب	SP5	۳۰/۵۷	۲/۶۵
	SP4	۱۸/۵۳	۰
ساده	SP8	۲۷/۳۷	۳/۴۲
	SP7	۱۱/۸۹	۰
صلب	SP8	۲۸/۷۸	۳/۳۲
	SP7	۱۷/۶۹	۰

نیروی بیشینه سازه کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان در محلی‌شدن خرابی جست‌وجو کرد. بدین معنا که با افزایش ضخامت هسته نمونه‌ها، خرابی‌های مشاهده شده در سازه‌ها محلی‌تر شده و در واقع انرژی کمتری صرف تغییرشکل کلی سازه می‌شود. این موضوع باعث کاهش بیشینه نیروهای وارد شده به سازه می‌شود. در واقع، تحمل سازه با ازدیاد سختی آن افزایش یافته و در این راستا نیروی وارد شده به آن کاهش می‌یابد. شکل‌های ۸ و ۹ خرابی‌های به‌دست آمده در سازه‌ها در اثر اعمال بار دینامیکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، خرابی موجود در نمونه‌هایی با رویه‌های آلومینیمی محلی‌تر از خرابی موجود در نمونه‌های کامپوزیتی است، در واقع نمونه‌هایی با رویه‌های کامپوزیتی دارای خرابی‌های کلی‌تری

جدول ۱۴- بررسی تجربی پارامترهای به‌دست آمده از نمودارهای دینامیکی اسفنج‌ها.

نمونه	انرژی کل سامانه (J)	بیشینه‌جابه‌جایی در نیروی بیشینه (mm)	بیشینه نیرو (N)
اسفنج ۱ cm	۲/۸۱	۲۷	۷۱۷
اسفنج ۱/۳ cm	۲/۴۱	۲۰	۳۴۴
اسفنج ۲/۵ cm	۴/۸۵	۱۷	۳۲۸

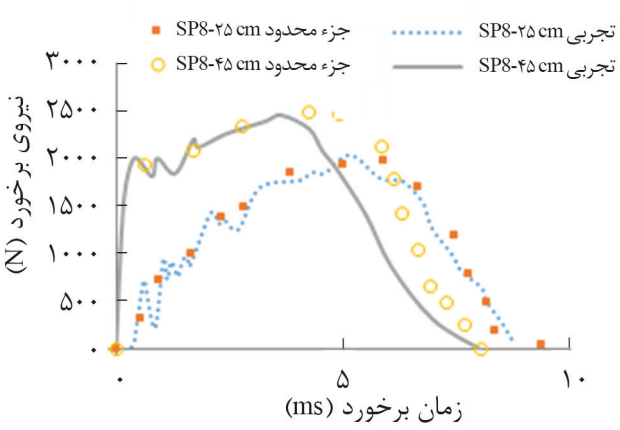


شکل ۱۰- مقایسه تجربی و عددی نیروی ضربه در ارتفاع‌های مختلف روی نمونه کامپوزیتی با هسته ۲/۵ cm روی تکیه‌گاه ساده.

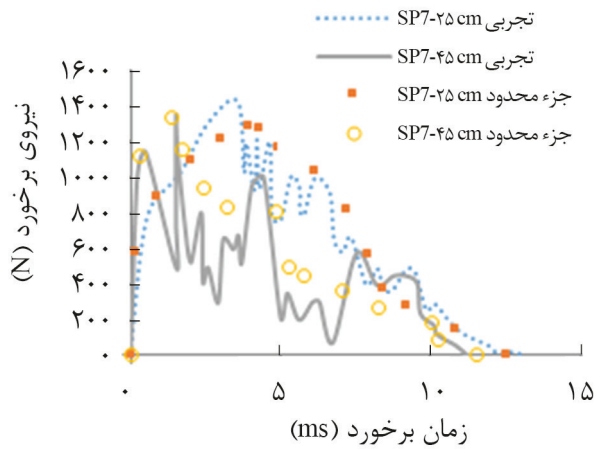
نسبت به نمونه‌های با رویه آلومینیمی است.

در نمونه‌های آلومینیمی تغییرشکل‌های پلاستیکی مشاهده می‌شود و تغییرشکل‌ها دائمی‌تر و به شکل سوراخ‌شدن در نمونه‌هاست. عامل اصلی زیاد بودن نیروی برخورد در نمونه‌ها نسبت به نمونه‌هایی با رویه کامپوزیتی است.

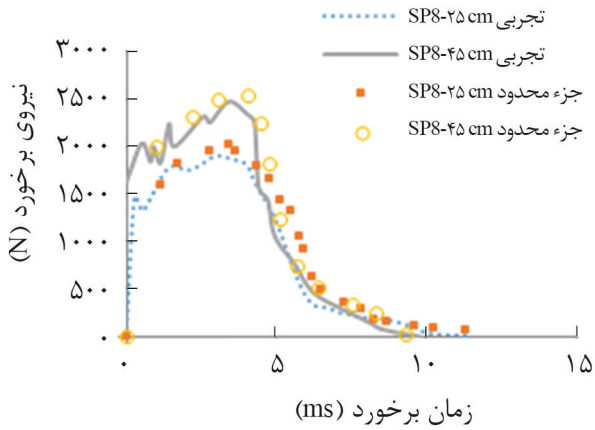
همان‌طور که در جدول ۱۳ مشخص شده است، در نمونه‌هایی با رویه کامپوزیتی، نفوذ کمترین مقدار را دارد. از طرفی، هرچه ضخامت هسته افزایش می‌یابد، عمق خرابی بیشتر می‌شود. دلیل آن محلی‌ترشدن خرابی و نفوذ بیش از حد ضربه‌زن در نمونه است که در نتیجه آن افزایش مقدار ناحیه خرابی را شامل می‌شود. در نتیجه هرچه عمق خرابی افزایش می‌یابد، محیطی که در معرض خرابی قرار می‌گیرد نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- مقایسه نتایج تجربی و عددی نیروی ضربه در ارتفاع‌های مختلف روی نمونه آلومینیمی با هسته ۲/۵ cm روی تکیه‌گاه ساده.



شکل ۱۲- مقایسه تجربی و عددی نیروی ضربه در ارتفاع‌های مختلف روی نمونه کامپوزیتی با هسته ۲/۵ cm روی تکیه‌گاه صلب.



شکل ۱۳- مقایسه نتایج تجربی و عددی نیروی ضربه در ارتفاع‌های مختلف روی نمونه آلومینیمی با هسته ۲/۵ cm روی تکیه‌گاه صلب.

پاسخ دینامیکی اسفنج‌های گرانروکشسان

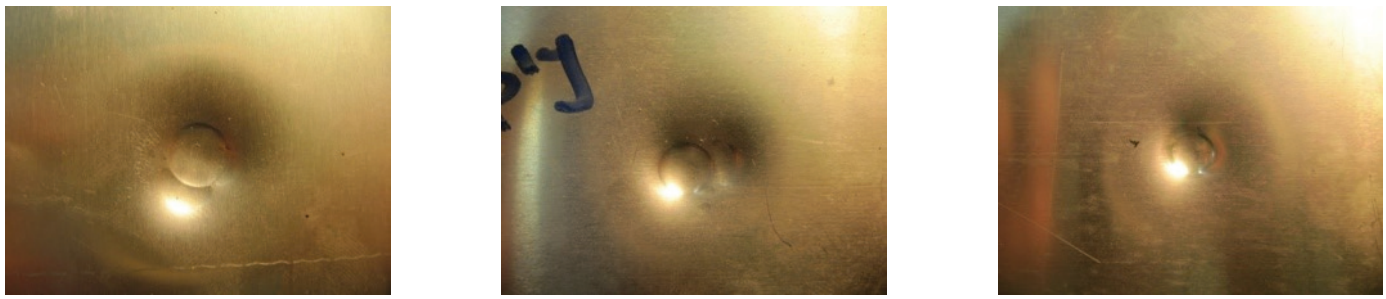
در این بخش، رفتار اسفنج‌های گرانروکشسان استفاده شده به‌عنوان هسته، در اثر اعمال بارهای دینامیکی به روش تجربی مطالعه شده است. با دو بار انتگرال‌گیری از شتاب ضربه‌زن می‌توان مقدار جابه‌جایی آن را حین برخورد به‌دست آورد. با داشتن این مقدار و نیز انتگرال‌گیری از سطح زیر نمودار نیرو و جابه‌جایی در حالت دینامیکی، می‌توان به مقدار انرژی ذخیره شده و نیز مقدار حداکثر جابه‌جایی در بیشینه نیرو دست یافت.

همان‌طور که از جدول ۱۴ مشخص است، هر چه ضخامت اسفنج کمتر باشد، بیشینه نیروی اعمالی در منطقه کشسان این دسته از اسفنج‌ها بیشتر است. هرچه ضخامت افزایش یابد، مقدار جابه‌جایی لازم برای رسیدن به بیشینه نیرو در منطقه کشسان کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش سفتی سازه است که باعث محلی‌ترشدن شکست در اسفنج می‌شود. دلیل اصلی آن است که در اسفنج‌های با ضخامت کم، تعداد لایه‌های بیشتری از اسفنج در معرض فشردگی قرار دارد. در حالی که هرچه ضخامت افزایش می‌یابد، مقدار ضخامتی که در معرض فشردگی قرار می‌گیرد، کمتر است.

این موضوع باعث کاهش مقدار نیروی بیشینه تماسی و انرژی ذخیره شده در سازه می‌شود. از طرفی، در بارگذاری دینامیکی، هرچه ضخامت افزایش یابد، مقدار انرژی جذب شده در سازه بیشتر می‌شود، زیرا در اثر اعمال بار، سازه با ضخامت کمتر، به‌طور عمومی‌تر و کلی جابه‌جایی از خود نشان می‌دهد، در حالی که در ضخامت‌های زیاد، تمام فعالیت‌های سازه محلی‌تر است.

اثر سرعت ضربه‌زن بر پاسخ دینامیکی صفحه‌های ساندویچی

در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳، اثر سرعت ضربه‌زن بر رفتار سازه‌های مختلف در تکیه‌گاه‌های استفاده شده در پژوهش، بررسی شده است. شکل ۱۴ نیز خرابی نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی در تکیه‌گاه ساده در اثر اعمال بار را در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. افزایش سرعت ضربه‌زن به‌طور شایان توجهی باعث افزایش نیروی وارد شد ه به سازه می‌شود. از طرفی این افزایش سرعت باعث کاهش زمان برخورد می‌شود.



شکل ۱۴- شکل خرابی نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی در تکیه‌گاه ساده در اثر اعمال بار در ارتفاع‌های مختلف.

جدول ۱۵- درصد خطای بیشینه شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج تجربی نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی و کامپوزیتی روی تکیه‌گاه ساده در ارتفاع‌های مختلف.

نوع سازه	ارتفاع ضربه (cm)	درصد خطای تکیه‌گاه صلب	درصد خطای تکیه‌گاه ساده
کامپوزیتی با هسته ۲/۵ cm	۲۵	۰/۴۵	۱/۴۷
کامپوزیتی با هسته ۲/۵ cm	۴۵	۶/۱۵	۹/۸۸
آلومینیمی با هسته ۲/۵ cm	۲۵	۱/۳۱	۱/۱۱
آلومینیمی با هسته ۲/۵ cm	۴۵	۲/۰۹	۶/۲۵

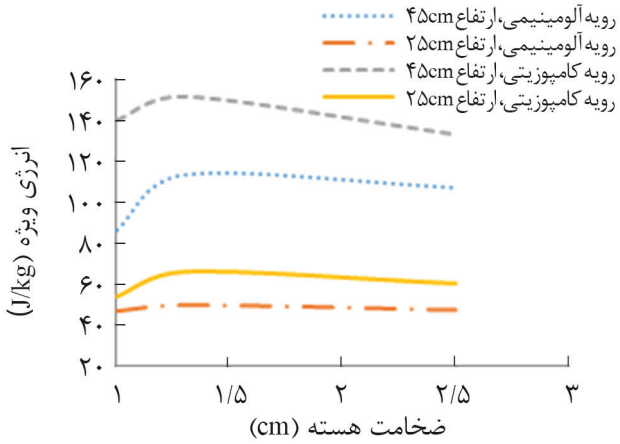
در سرعت‌های زیاد، وجود ضربه‌های بعدی نیز در نمودارهای به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که باعث به‌وجودآمدن نوفه در نمودارها شده و این بخش از نمودارها در ارائه نتایج حذف شده است. از طرفی هرچه سرعت بیشتر می‌شود، خرابی‌های مشاهده شده در سازه به سمت محلی‌ترشدن می‌رود، ناحیه خرابی کوچک‌تر و عمق مربوط به خرابی بیشتر می‌شود. آنچه در ضخامت‌های زیاد هسته مشاهده می‌شود، آن است که تغییرشکل‌های محلی باعث می‌شود تا هم نیرو و هم زمان برخورد کاهش یابد. در بخش‌های بارگذاری مربوط به رویه‌های آلومینیمی، رفتار هموارتر از رویه‌های کامپوزیتی است. این موضوع به دلیل ترک‌های مشاهده شده در الیاف رویه‌های کامپوزیتی است که باعث ایجاد رفتار رفت و برگشتی در نمونه‌ها می‌شود.

همان‌طور که در اکثر نمودارهای مربوط به صفحه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت ضربه‌زن، شکست در رویه‌ها اتفاق می‌افتد. در نمودارهای مربوط به آن‌ها سه منطقه اصلی مشاهده می‌شود.

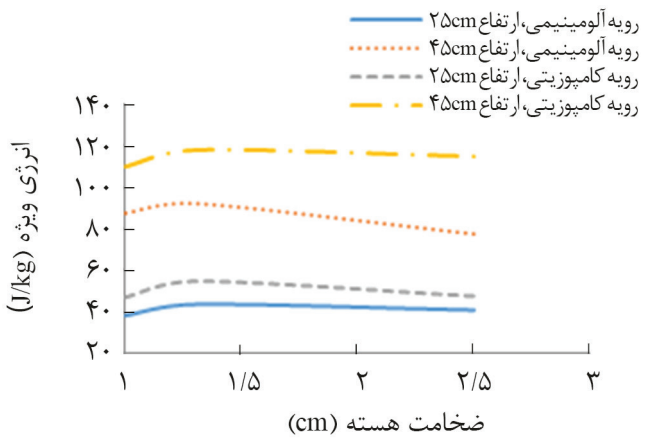
ابتدا نیروی وارد شده به سازه با اعمال بار ضربه افزایش می‌یابد تا جایی که به مقدار بیشینه‌ای رسیده و در آن منطقه رویه دچار شکست می‌شود. از آنجا به بعد در نمودار نیرو کاهش محسوس مشاهده شده و از آن پس سفت‌شدگی هسته آغاز می‌شود. در این بخش بار به‌طور کامل به هسته منتقل می‌شود. در ادامه، مقدار بار منتقل شده به هسته نیز به بیشترین مقدار رسیده و هسته نیز دیگر قابلیت تحمل بار را ندارد و دچار شکست می‌شود. از آنجا به بعد بار به رویه‌های پایینی منتقل شده و بار دیگر نمودار نیروی مربوط به این سازه‌ها دچار کاهش چشمگیر دیگری می‌شود. از طرف دیگر، با مقایسه دو حالت تکیه‌گاه صلب و تکیه‌گاه ساده می‌توان مشاهده کرد، در تکیه‌گاه ساده، زمان مربوط

جدول ۱۶- انرژی ویژه و بیشینه نیروی تجربی وارد شده به نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های گوناگون در ارتفاع‌های مختلف، روی تکیه‌گاه‌های ساده و صلب در بارگذاری ضربه سرعت کم.

نمونه‌ها		ارتفاع (cm)											
		۶۵		۴۵		۲۵		۶۵		۴۵		۲۵	
		انرژی ویژه (J/kg)						نیروی بیشینه (N)					
		صلب	ساده	صلب	ساده	صلب	ساده	صلب	ساده	صلب	ساده	صلب	ساده
هسته ۱ cm	اسفنج	–	–	–	–	۲۱۴/۶۹	۲۱۴/۶۹	–	–	–	–	۳۹۹۲	۳۹۹۲
	رویه‌آلومینیمی	۱۹۹/۹۵	۱۲۷/۵۲	۸۸/۰۳	۸۶/۸۴	۳۸/۶۱	۴۶/۵۷	۳۰۰۷	۳۲۰۰	۲۵۰۴	۲۷۲۸	۲۰۴۰	۱۹۶۰
	رویه‌کامپوزیتی	–	–	۱۱۰/۱۲	۲۴۰/۴۶	۴۶/۷۱	۵۳/۶۳	–	–	۲۷۳۲	۲۴۰۴	۲۰۴۸	۱۹۸۴
هسته۱/۳cm	اسفنج	–	–	–	–	۱۸۲/۴۳	۳۰۰	–	–	–	–	۳۰۱۰	۱۲۸۰
	رویه آلومینیمی	۲۳۰/۷۶	۱۱۸/۴۷	۹۲/۶۷	۲۱۱/۶۳	۴۴/۰۵	۴۹/۷۲	۳۱۲۴	۴۰۰۰	۲۵۶۸	۲۳۰۴	۱۸۱۰	۱۹۲۰
	رویه‌کامپوزیتی	–	–	۱۱۸/۰۳	۱۱۳/۸۹	۵۴/۴۵	۶۵/۷۷	–	–	۲۰۴۶	۲۵۴۸	۲۰۱۰	۱۹۳۲
هسته۲/۵cm	اسفنج	–	–	–	۱۵۱/۹۷	۱۱۵/۴۳	۹۵/۸۵	–	–	–	–	۶۹۲	۶۲۰
	رویه آلومینیمی	۱۸۱/۰۹	۱۰۸	۷۸/۰۵	–	۴۱/۲۶	۵۷/۱۸	۳۲۴۲	۲۷۵۰	۲۵۲۴	۲۴۴۴	۱۷۳۲	۲۰۰۸
	رویه کامپوزیتی	–	–	۱۱۹/۰۲	۱۲۲/۰۳	۴۷/۲۷	۸۰/۰۳	–	–	۲۱۹۶	۲۹۸۸	۱۸۴۰	۲۰۸۴



شکل ۱۵- انرژی ویژه در صفحه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و آلومینیمی روی تکیه‌گاه ساده در ارتفاع‌های مختلف.



شکل ۱۶- انرژی ویژه در صفحه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و آلومینیمی روی تکیه‌گاه صلب در ارتفاع‌های مختلف.

به شکست رویه آلومینیمی کمتر از شکست رویه در نمونه‌ها روی تکیه‌گاه صلب است. علت اصلی این موضوع را می‌توان در تفاوت توزیع گشتاور خمشی در دو سازه جست‌وجو کرد.

در حالت تکیه‌گاه ساده، ضخامت بیشتری از سازه در معرض خمش قرار می‌گیرد، در حالی که این موضوع در حالت تکیه‌گاه صلب کمتر است، یعنی ضخامت کمتری از سازه در معرض خمش کلی قرار می‌گیرد. در واقع نوع تکیه‌گاه باعث تغییر مقدار سفتی سازه شده و این تغییر سفتی باعث تغییر مقدار زمان برخورد در سازه می‌شود. جدول ۱۵ نیز درصد خطای بیشینه شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج تجربی را برای نمونه‌ها با رویه‌های کامپوزیتی و آلومینیمی و هسته یکسان در برابر اعمال بار ضربه در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، هرچه ارتفاع ضربه‌زن افزایش می‌یابد، مقدار خطای به‌وجود آمده نیز افزایش پیدا می‌کند. در این حالت نتایج درصد خطای قبلی در این حالت نیز نمونه‌ها با رویه‌های کامپوزیتی دارای درصد خطای بیشتری نسبت به نمونه‌ها با رویه‌های آلومینیمی هستند.

مقایسه انرژی‌های ویژه ذخیره شده در صفحه‌های ساندویچی

در این بخش انرژی‌های ویژه ذخیره شده در سازه‌های مورد آزمون، در دو حالت تکیه‌گاه‌های ساده و صلب، زیر بارگذاری ضربه سرعت‌کم بررسی می‌شود. در واقع، مهم‌ترین عامل برتری کامپوزیت‌ها نسبت به سازه‌های همسانگرد، نسبت زیاد سفتی به وزن در این نوع سازه‌هاست. همان‌طور که از جدول ۱۶ مشخص است، در ضربه‌های سرعت‌کم نزدیک به حالت شبه‌ایستا، نیرو در رویه‌هایی با ضخامت کم، کمتر است. در مقایسه دو نمونه با رویه‌های آلومینیمی و کامپوزیتی که از نظر ضخامت رویه یکسان هستند، رویه آلومینیمی به دلیل تغییرشکل‌های پلاستیک ایجاد شده در آن و سوراخ‌شدگی که در رویه آن مشاهده می‌شود، دارای نیروی بیشینه تماسی بیشتری است. برخلاف رفتار ایستای سازه‌ها در بارگذاری ایستای خمشی، در حالت بارگذاری دینامیکی، انرژی ویژه سازه با رویه‌های کامپوزیتی بیشتر از نمونه‌های آلومینیمی با ضخامت برابر با این نوع سازه است. برای سازه با یک نوع رویه، هرچه ضخامت هسته افزایش می‌یابد، طبیعی است که انرژی ویژه سازه، به دلیل افزایش سفتی سازه ازدیاد یابد. از طرف دیگر، هرچه سرعت ضربه بیشتر می‌شود، مقدار نیروی تماسی و نیز مقدار انرژی ویژه ذخیره شده در سازه افزایش می‌یابد. برای هر دو آزمون روی هر دو تکیه‌گاه، با افزایش ضخامت اسفنج، مقدار نیروی بیشینه تماسی و در پی آن انرژی ویژه کرنشی ذخیره شده در سازه کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل آن است که نفوذ ضربه‌زن در نمونه با ضخامت‌های بیشتر، زیادتر است. بنابراین، مقدار بیشینه نیرو و نیز انرژی ذخیره شده در سازه کاهش می‌یابد. در ادامه آنچه به‌طور کلی از شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشخص است، اینکه نمونه‌ها با رویه‌های کامپوزیتی انرژی ویژه بیشتری نسبت به نمونه‌های آلومینیمی دارند. هرچه سرعت ضربه‌زن بیشتر شود، انرژی ویژه نیز به دنبال آن افزایش می‌یابد. در حالت‌هایی که ضخامت هسته کم است، انرژی ویژه نیز کم است. با افزایش ضخامت هسته، این انرژی نیز افزایش می‌یابد تا جایی که دیگر با افزایش ضخامت هسته، تغییرات انرژی ویژه ناچیز می‌شود. با افزایش ضخامت هسته بیش از این مقدار حدی، روند کاهشی ناچیزی مشاهده شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار صفحه‌های ساندویچی با هسته گرانروکشسان و رویه‌های همسانگرد کامپوزیتی و ناهمسانگرد آلومینیمی زیر بار ضربه سرعت‌کم روی دو تکیه‌گاه ساده و صلب به دو روش تجربی و عددی مطالعه شد. پس از کالیبره‌شدن مدل عددی، در حالت‌های مختلف و نیز استفاده از متغیر انتگرالی انرژی کرنشی و جنبشی کل ورق به شکل نرمال شده برای بررسی استقلال نتایج از مش‌بندی، مقدار اختلاف نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌ها بررسی و تحلیل شدند. آنچه از نتایج مشخص است، اختلاف کمی بین نتایج تجربی و عددی به‌دست آمده است. این مسئله به‌وضوح در نمودارهای پیشین قابل نتیجه‌گیری است. در برخی موارد، تفاوت نتایج و به عبارتی خطا افزایش یافته که به‌طور عمده از بروز برخی پدیده‌ها، مانند وجود ناهمگنی در اسفنج، برش لایه چسب و شکست و تورق در رویه‌های کامپوزیتی ناشی می‌شود در ارتفاع‌های زیاد ضربه‌زن مشاهده شده است. از دیگر منابع خطا نیز می‌توان خطای عددی حین شبیه‌سازی، مانند برخورد سطوح صلب ناهموار، ناپیوستگی در سرعت برخورد در آغاز حل و وجود اصطکاک دانست. از نتایج به‌دست آمده مشاهده شد، افزایش ضخامت هسته در نمونه‌های آلومینیمی باعث افزایش مقدار نیروی بیشینه تماسی و در نمونه‌هایی با رویه‌های کامپوزیتی، باعث کاهش نیرو می‌شود. دلیل این موضوع آن است که در نمونه با رویه‌های آلومینیمی، پلاستیک‌شدن عامل اصلی افزایش نیروی تماسی است. در حالی که جدایش لایه‌ها در رویه‌های کامپوزیتی، باعث آزاد شدن انرژی و در پی آن کاهش نیروی تماسی در ضخامت‌های بیشتر هسته است. همچنین افزایش ضخامت هسته، باعث ازدیاد سفتی مربوط به سازه شده و این موضوع باعث کاهش زمان برخورد ضربه‌زن و سازه ساندویچی می‌شود. در این راستا هرچه ضخامت هسته کمتر باشد، نوسانات منطقه بارگذاری در سازه بیشتر از نمونه با ضخامت‌های بیشتر است. علت این مسئله عدم میراسازی انرژی و بروز ترک‌های میکروسکوپی در سازه با ضخامت‌های کم هسته است. از طرفی، افزایش سرعت ضربه‌زن باعث کاهش زمان برخورد و افزایش نیروی تماسی بیشینه می‌شود. همچنین افزایش سرعت ضربه‌زن، باعث موضعی‌ترشدن خرابی‌ها به شکل افزایش عمق و کاهش محیط خرابی می‌شود. این موضوع، باعث افزایش مقدار انرژی ویژه ذخیره شده در سامانه می‌شود. رفتار ضربه نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیمی هموارتر، ولی نسبت به رویه‌های کامپوزیتی تیزتر است. دلیل تیزتربودن نمودار، تغییرشکل پلاستیک در سازه با رویه آلومینیمی و دلیل عدم ناهموارتربودن نمونه با رویه کامپوزیتی، شکست پیوسته الیاف سازنده رویه‌ها حین اعمال بار است. زمان مربوط به شکست در رویه‌های آلومینیمی در تکیه‌گاه ساده، کمتر از زمان لازم برای شکست در تکیه‌گاه صلب است. دلیل اصلی این موضوع آن است که در حالت تکیه‌گاه صلب فقط ضخامت کمی از سازه در معرض خمش و تغییرمکان عرضی قرار می‌گیرد. در حالی که این موضوع در حالت تکیه‌گاه ساده به گونه‌ای است که، ضخامت بیشتری از سازه تحت خمش قرار می‌گیرد. انرژی ویژه صفحه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی، در شرایط بارگذاری ضربه سرعت‌کم، روی تکیه‌گاه‌های مختلف بیشتر از صفحه ساندویچی گرانروکشسان با رویه آلومینیمی است. هرچه ضخامت هسته اسفنج در صفحه‌های ساندویچی بیشتر باشد، مقدار نیروی بیشینه تماسی و انرژی ذخیره شده در سامانه کمتر است. دلیل آن در اسفنج‌هایی با ضخامت کم، قرارگرفتن در معرض فشار بخش بیشتری از ضخامت است، در حالی که در ضخامت‌های زیاد، ضخامت کمتری از اسفنج در معرض فشردگی قرار می‌گیرند.

قدردانی

از آزمایشگاه مواد و کامپوزیت دانشکده مهندسی مکانیک و نیز قطب علمی ترموالاستیسیته دانشگاه صنعتی امیرکبیر که در تأمین مالی پژوهش، برای ساخت نمونه‌ها و انجام آزمون‌های مربوط همراهی کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Zenkert D., *The Handbook of Sandwich Construction*, Engineering Materials Advisory Services, The Netherlands, Chapt. 8, 1997.
2. Vinson J.R., Sandwich Structures, *Appl. Mech. Rev.*, **54**, 201-214, 2001.
3. Sabzikar Boroujerdy. M., Dariushi S., and Sadighi M., Bending Properties of Sandwich Beams with Fiber Metal Laminate Face Sheet, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.(Persian)*, **25**, 375-382, 2013.
4. Williams D., Leggett D.M.A., and Hopkins H.G., Flat Sandwich Panels under Compressive End Loads, *HM Stationery Office*, 1941.
5. March H.W., Effects of Shear Deformation in the Core of a Flat

Rectangular Sandwich Panel–1. Buckling under Compressive End Loads, 2. Deflection under Uniform Transverse Load, U.S. Forest Products Laboratory Report 1583, 1948.

6. Gibson L.J. and Ashby F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge, Cambridge University, 1997.
7. Plantema F.J., *Sandwich Construction*, John Wiley and Sons, USA, 138, 1966.
8. Zenkert D., *An Introduction to Sandwich Construction*, Chameleon, London, Chapt. 5, 1997.
9. Bose P. and Reddy J.N., Analysis of Composite Plates Using Various Plate Theories. Part 1, Formulation and Analytical Solutions, *Struct. Eng. Mech.*, **6**, 583-612, 1998.
10. Allen H.G., *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels: The Commonwealth and International Library: Structures and Solid Body Mechanics Division*, Elsevier, 2013.
11. Sadeghnejad S. and Sadighi M., Theoretical and Experimental Static Behavior of Sandwich Structures with Viscoelastic Core, *The Bi-Annual International Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics (X-Mech-2014)*, Tehran, Iran.
12. Sun C.T. and Wu C.T., Low Velocity Impact of Composite Sandwich Panels, *AIAA Paper*, 91-1077, 1991.
13. Lee L.J., Kuang K.Y., and Fann Y.J., Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted by a Rigid Ball, *J. Compos. Mater.*, **27**, 1238-1256, 1993.
14. Sadighi M. and Pouriayevali H., Quasi-Static and Low-Velocity Impact Response of Fully Backed or Simply Supported Sandwich Beams, *J. Sandwich Struct. Mater.*, **10**, 499-524, 2008.
15. Choi I.H., Contact Force History Analysis of Composite Sandwich Plates Subjected to Low-Velocity Impact, *Compos. Struct.*,**75**, 582-586, 2006.
16. Dear J.P., Lee H., and Brown S.A., Impact Damage Processes in Composite Sheet and Sandwich Honeycomb Materials*, Int. J., Impact Eng.*, **32**, 130-154, 2005.
17. Lee L.J., Huang K.Y., and Fann Y.J.. Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted by a Rigid Ball, *J. Compos. Mater.,* **27**, 1238-1252, 1993.
18. Arora H., Hooper P.A., and Dear J.P., Dynamic Response of Full-Scale Sandwich Composite Structures Subject to Air-Blast Loading, *Composites: Part A*, **42**, 1651-1662, 2011.
19. Arora H., Hooper P.A., and Dear J.P., The Effects of Air and Underwater Blast on Composite Sandwich Panels and Tubular Laminate Structures, *Exp. Mech.*, **52**, 59-81, 2012.
20. Taraz Jamshidi Y., Sadeghnejad S., and Sadighi M., Static and Dynamic Study of Sandwich Panels with Composite Skins and Nomex™ Honeycomb Core, *The 22nd Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME2014)*, Ahvaz, Iran, 22-24 April, 2014.
21. Arvin H., Sadighi M., and Ohadi A.R., A Numerical Study of Free and Forced Vibration of Composite Sandwich Beam with Viscoelastic Core, *Compos. Struct.,* **09**, 047, 2009.
22. Sadeghnejad S., Sadighi M., and Ohadi A.R., Free Vibration Analysis of Composite Sandwich Plate with Viscoelastic Core, *J. Key Eng. Mater. Published by Trans Tech Publications,* **471-472**, 658-663, 2011.
23. Ohadi A.R., Sadeghnejad S., and Sadighi M., An Extended Higher-Order Free Vibration Analysis of Composite Sandwich Beam with Viscoelastic Core, *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, **3**, Nantes, France, 75-82, 2012.
24. Taraz Jamshidi Y., *Experimental and Numerical Investigation of Low-Velocity Impact Behavior in Time-Dependent Hyper-Viscoelastic Sandwich Panels, Master of Science Final Project*, Msc Thesis, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2014.
25. Taraz Jamshidi Y., Sadeghnejad S., and Sadighi M., Viscoelastic Behavior Determination of EVA Elastomeric Foams Using FEA, *The 23nd Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME2015)*, Tehran, Iran, 12-14 May, 2015.
26. Rizov V., Shipsha A., and Zenkert D., Indentation Study of Foam Core Sandwich Composite Panels, *J. Compos. Struct.*, **69**, 95-102, 2005.
27. Reissner E., Finite Deflections of Sandwich Plates, *J. Aeronautical Sci.*, **15**, 435-440, 1948.
28. Anderson A., An Investigation of SDOF Models for Large Mass Impact on Sandwich Composites, *Composites: Part B,* **36**, 135-142, 2005.