

مطالعه‌ای بر رفتار ساختارهای ساندویچی با هسته لانه‌زنوری تحت بارگذاری دفعی

مصطفی سیاح بادخور^۱، مهدی حسن‌زاده^۲، توحید میرزابابای مستوفی^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

^۲ دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

بارگذاری دفعی

ساختار ساندویچی فلزی

شبیه‌سازی عددی

روش سطح پاسخ

جدول آنوا

خلاصه: ساختارهای ساندویچی یکی از اهداف مورد استفاده برای کاهش خسارت‌ها است. در این مقاله، اثر شرایط مختلف بارگذاری و همچنین هندسه ساختار بر رفتار ساختار ساندویچی تحت بارگذاری دفعی یکنواخت مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین، در ابتدا یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، جهت شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه‌های ساندویچی ساخته شده است. جهت صحت‌سنجی مدل عددی از داده‌های تجربی موجود در ادبیات تحقیق استفاده شد. سپس در بحث مطالعه پارامتریک، تأثیر پارامترهای مؤثر بر مقاومت این ساختار ساندویچی نظیر ضخامت صفحات بالا و پایین فلزی، تعداد صفحات در هسته و همچنین ضخامت آن‌ها تحت بارگذاری دفعی با جرم خرج‌های مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، مدلی مناسب جهت پیش‌بینی میزان تغییر شکل مرکزی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی توسعه داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده مطابقت بسیار خوب داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی است. مقدار بالای ضریب همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه و رفتار سازه حاکی از آن است که مدل ارائه شده از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده است. حالت بهینه این ساختار ساندویچی در محدوده مورد بررسی، با همین مدل رگرسیونی به‌دست آمده است.

۱- مقدمه

ساختارهای ساندویچی با هسته لانه‌زنوری از جنس فولاد ضدزنگ آستنیتی تحت بارگذاری انفجاری آزاد پرداختند. آزمایش‌ها در سه سطح بارگذاری روی ساختارهای ساندویچی و ورق‌های تک‌لایه با چگالی سطحی مشابه انجام شد. میزان ایمپالس و شدت بار دینامیکی وارد شده با تغییر میزان وزن بار ماده منفجره در فاصله استقرار ثابت تغییر داده شد. در پایین‌ترین میزان شدت بارگذاری، در مرکز پانل نزدیک به منبع انفجار، خمش ورق جلویی و همچنین کمناش دیواره سلولی به‌طور برجسته و رو به رشد مشاهده شد به‌طوری‌که با افزایش ایمپالس، کمناش در دیواره سلولی و تراکم هسته افزایش یافت.

در طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰، ژو و همکاران [۱۱ و ۱۲] تعداد زیادی آزمایش روی سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنوری و فوم آلومینیومی تحت بار انفجاری یکنواخت انجام دادند. نتایج کمی بر اساس اندازه‌گیری انجام شده در آزمایش نمونه‌ها با پاندول بالستیک به‌دست آمد. همچنین، در این سری از آزمایش‌ها، حالت‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک سازه و مکانیزم شکست آن‌ها طبقه‌بندی شد و اثرات ضخامت ورق جلویی و عقبی،

ساختارهای ساندویچی با هسته ساخته شده از مواد متخلخل (اغلب لانه‌زنوری و یا فوم‌های آلومینیومی) به‌عنوان یک ساختار محافظ در حال ظهور، توانایی جذب انرژی قابل‌توجهی را با تغییر شکل پلاستیک بزرگ تحت بارگذاری ضربه‌ای و انفجاری دارند. ریزساختارهای سلولی آن‌ها را قادر به تغییر شکل پلاستیک بزرگ در تنش تقریباً ثابت می‌کنند؛ بنابراین، این سازه‌ها می‌توانند مقدار زیادی انرژی جنبشی را قبل از فروپاشی به پیکربندی یا شکستگی پایدارتر تجربه کنند [۳-۱]. تاکنون، پاسخ ساختارهای ساندویچی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی یا تأثیر آن در طیف گسترده‌ای از سرعت‌ها به‌طور گسترده مورد مطالعه و مستندسازی شده است [۷-۴]. در سال‌های اخیر، افزایش توجه به این‌گونه سازه‌ها تحت بار انفجاری به دلیل افزایش احتمال تهدید انفجار به‌وسیله حادثه یا حملات تروریستی صورت گرفته است [۸ و ۹].

در سال ۲۰۰۸، ده‌ماسنا و همکاران [۱۰] به مطالعه رفتار دینامیکی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: t.m.mostofi@ey.ac.ir

جرم خرج انفجاری، نوع کامپوزیت استفاده شده، ضخامت ورق لانه زنبوری و اندازه سلول آن بر رفتار پلاستیک لایه های جلویی و هسته بررسی شدند. نتایج تجربی ارائه شده بیان گر تأثیر بسیار زیاد چگالی نسبی هسته و ضخامت لایه جلویی بر میزان تغییر شکل پلاستیک لایه عقبی بود. به طور دقیق تر می توان این گونه بیان کرد که به کارگیری لایه جلویی ضخیم همراه با هسته لانه زنبوری با چگالی بیشتر موجب کاهش زیاد میزان خیز دائمی لایه عقبی می شود. همچنین این نتیجه حاصل شد که برای یک هسته مشخص، خیز دائمی لایه عقبی با افزایش ایمپالس به صورت خطی افزایش می یابد [۱۵] - [۱۳].

در سال ۲۰۰۹، نوریک و همکاران [۱۶] و کاراگیزوا و همکاران [۱۷] با انجام تعداد زیادی آزمایش به بررسی پاسخ غیرالاستیک سازه های ساندویچی تحت بار انفجاری یکنواخت پرداختند که سازه ها متشکل از ورق های جلویی و عقبی از جنس فولادی نرم و با هسته لانه زنبوری آلیاژ آلومینیوم بودند. شایان توجه است که در این تحقیق، بار دفعی یکنواخت با منفجر کردن دیسکی از مواد منفجره و هدایت انفجار از طریق یک لوله به سمت هدف ایجاد شد. در ادامه این تحقیق، سه فاز تعامل برای هر ساختار ساندویچی بر اساس حالت تغییر شکل، تماس، لهیدگی و گسیختگی اجزای ساندویچی، شناسایی شدند.

در سال ۲۰۱۵، زمانی و گودرزی [۱۸] به بررسی تجربی و عددی ماکزیمم خیز ورق های دایروی تحت اثر موج شوک حاصل از انفجار پرداختند. آن ها دو سری آزمایش انجام دادند که در سری اول موج شوک رسیده به سازه، غیریکنواخت و در سری دوم موج شوک رسیده به سازه یکنواخت بود. هدف آن ها از طراحی و اجرای آزمایش ها، بررسی تأثیر نحوه برخورد موج بر میزان تغییر شکل و استخراج دو مدل نیمه تجربی برای پیش بینی میزان خیز ماکزیمم وسط ورق دایروی در دو حالت موج شوک یکنواخت و غیریکنواخت بود.

در سال ۲۰۱۸، میرفلاح نصیری و همکاران [۱۹]، به بررسی تأثیر دما و نرخ کرنش بر شکل دهی ورق های آلومینیومی پرداختند. آن ها دریافتند که سطح نمودار حد شکل دهی ورق های آلومینیومی با افزایش دما افزایش و با افزایش نرخ کرنش کاهش پیدا می کند.

در سال ۲۰۱۸، چنگ و همکاران [۲۰] و در سال ۲۰۱۹، چن و همکاران [۲۱] با هدف مشخص نمودن اثرات پر کردن فوم بر پاسخ دینامیکی پانل های ساندویچی با هسته موج دار به بررسی پاسخ دینامیکی این ساختارها تحت بار انفجاری آزاد پرداختند. این ساختارها به منظور بررسی تأثیرات پارامترهای

خاص مانند چگالی فوم پرکننده، پیکربندی هسته و مواد پرکننده بر روی عملکرد انفجاری از جنبه مود تغییر شکل دائم، مود شکست و مکانیزم های مربوطه طراحی شدند. نتایج تجربی نشان داد که پر کردن فوم یک روش مؤثر برای بهبود مقاومت در برابر انفجار پانل های ساندویچی است. نتایج همچنین نشان داد که مزایای حاصل از فوم پرکننده برای کاهش سطوح خرابی و تغییر شکل پلاستیک در صفحات با افزایش چگالی اسفنج بهبود می یابد. مقایسه پانل با پیکربندی های مختلف هسته تأیید کرد که پانل ساندویچی پر شده با فوم تحت بار انفجار با شدت پایین بهترین رفتار را نشان داده است و همچنین پانل های پر شده با فوم های پی.وی.سی^۱ در مقایسه با ساختارهای پر شده از فوم های آلومینیومی با چگالی یکسان مقاومت بسیار بالایی نشان دادند.

در سال ۲۰۱۹، احمدی و همکاران [۲۲] به بررسی تغییر شکل پانل های ساندویچی به کار رفته در بدنه شناورها تحت بارگذاری انفجار پرداختند. آن ها دریافتند که مقدار تنش وارد شده در لایه های میانی بیشتر از سایر قسمت های پانل است و شکست نیز از همین قسمت شروع می گردد.

علی رغم تحقیقات بسیار زیاد انجام شده بر روی ساختارهای ساندویچی با هسته لانه زنبوری تحت بار انفجاری یکنواخت، تاکنون مطالعه ای بر روی شبیه سازی عددی و بهینه سازی آماری پارامترهای مؤثر بر این سازه نظیر ضخامت صفحات فلزی، ضخامت صفحات در هسته و تعداد صفحات در هسته مشاهده نشده است. لذا در این مقاله در ابتدا استفاده از نرم افزار تجاری المان محدود آباکوس به شبیه سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه های ساندویچی با هسته لانه زنبوری تحت بار انفجاری یکنواخت پرداخته شده و صحت گذاری مدل با استفاده از نتایج تجربی دهارماسنا و همکاران [۱۰] انجام گرفته است. در ادامه این تحقیق، از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ^۲ به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر مقاومت ساختار ساندویچی با هسته لانه زنبوری نظیر ضخامت صفحات فلزی، تعداد صفحات در هسته و ضخامت آن ها در هسته و همچنین تعیین ارتباط بین این عوامل با استفاده از طرح مرکب مرکزی^۳ و پیدا کردن مقدار بهینه هر پارامتر استفاده شده است.

۲- شبیه سازی عددی

ساختارهای چندلایه یا ساختار ساندویچی با یک لایه مرکزی مشبک به عنوان جاذب انرژی عمل می کنند. یکی از کاربردهای این صفحات

1 PVC
2 Response Surface Method
3 Central Composite Design

جامد^۱ انتخاب شده است. همچنین، به منظور کاهش محاسبات با توجه به متقارن بودن مسئله، مدل هندسی سازه به صورت سه بعدی و یک چهارم مدل شده و قسمت لانه زنبوری نیز به صورت پوسته با ضخامت ۰/۷۶ میلی متر انتخاب شده است. با توجه به اتصال بین لانه زنبوری و صفحات بالا و پایین و با فرض عدم شکست در جوش ها، از قید تایی^۲ استفاده شده است. به منظور همگرایی جواب مسئله اندازه مش به صورت ۱۲ المان در جهت ضخامت، مطابق نمودار شکل ۲ انتخاب شده است.

۲-۲- مدل سازی رفتاری مواد

رفتار ساختار ساندویچی به گونه ای در نظر گرفته شده است که المان ها در صورت افزایش مقدار انرژی آن ها از سطح ماده حذف شوند. به این منظور از مدل گسیختگی جانسون-کوک استفاده شده است. این مدل قابلیت پیش بینی شروع شکست یا گسیختگی را دارا است. پارامترهای ثابت ماده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: ثابت های ماده برای AL6XN [۲۳]

Table 1. Material constants for AL6XN [23]

α (K ⁻¹)	C_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	ν	E (GPa)
۰/۰۰۰۰۱۵	۵۰۰	۸۰۶۰	۰/۳	۱۹۵

معادله جانسون-کوک برای تغییر شکل ها با وابستگی به نرخ کرنش و

تغییرات دما مطابق رابطه (۱) است [۲۴ و ۲۵]:

$$\sigma_{eq} = (A + B \varepsilon_{eq}^n) (1 + \dot{\varepsilon}_{eq}^*)^c (1 - T^*)^m$$

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$$

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0}$$
(۱)

در این رابطه $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنشی است که مقادیر A، B و n در آن نرخ، اندازه گیری می شوند. این سه ثابت با تست کشش استاتیکی تعیین می شوند و به همین دلیل به آن ها ثوابت شبه استاتیکی می گویند. ثوابت C و m توسط

به عنوان دیواره محافظ در برابر انفجار است. در این قسمت، مقدار تغییر شکل یک ساختار ساندویچی تحت فشار ناشی از انفجار مورد بررسی قرار گرفته و برای شبیه سازی عددی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. برای به دست آوردن میزان تغییر شکل های ساختار ساندویچی از روش صریح در آباکوس استفاده شده است.

۲-۱- هندسه و حساسیت به مش

شرایط ساختار ساندویچی و مواد منفجره مطابق مقاله دهارماسنا و همکاران [۱۰] در نرم افزار آباکوس، مدل سازی و تحلیل شده است. مطابق با شکل ۱، این ساختار ساندویچی از سه لایه ساخته شده است. لایه بالایی و پایینی از یک ورق با ضخامت ۵ میلی متر و از جنس فولاد زنگ نزن سوپر آستینیتی به نام AL6XN ساخته شده است. لایه وسط نیز از یک ساختار لانه زنبوری با همان جنس و ضخامت ۰/۷۶ میلی متر که به صفحه های بالایی و پایینی جوش داده، ساخته شده است. ساختار ساندویچی با استفاده از گیره، روی یک صفحه فولادی به ضخامت ۱۹ میلی متر بسته می شود. سپس این مجموعه با استفاده از ۸ پیچ بر روی دو عدد تیر بسته می شود. ماده منفجره نیز در فاصله ۱۰۰ میلی متری در بالای صفحه ساختار ساندویچی قرار داده می شود.

دور تا دور لبه های صفحه بالایی و پایینی مقید شده است. بنابراین در مدل سازی تمامی درجت آزادی لبه های بیرونی باید بسته شود. در این شبیه سازی، صفحه های فلزی با ضخامت های مختلف به صورت تغییر شکل پذیر مدل شده و مش مورد نظر ساختار نیز از نوع المان خطی چهاروجهی

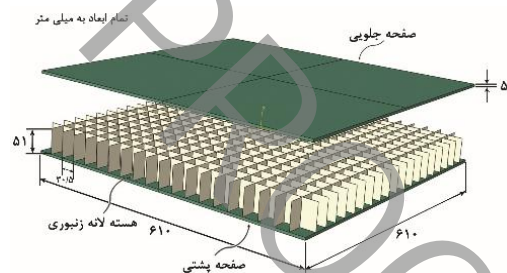


Fig. 1. A view of the sandwich structure examined [10]

شکل ۱: نمایی از ساختار ساندویچی مورد بررسی [۱۰]

1 C3D4

2 Tie

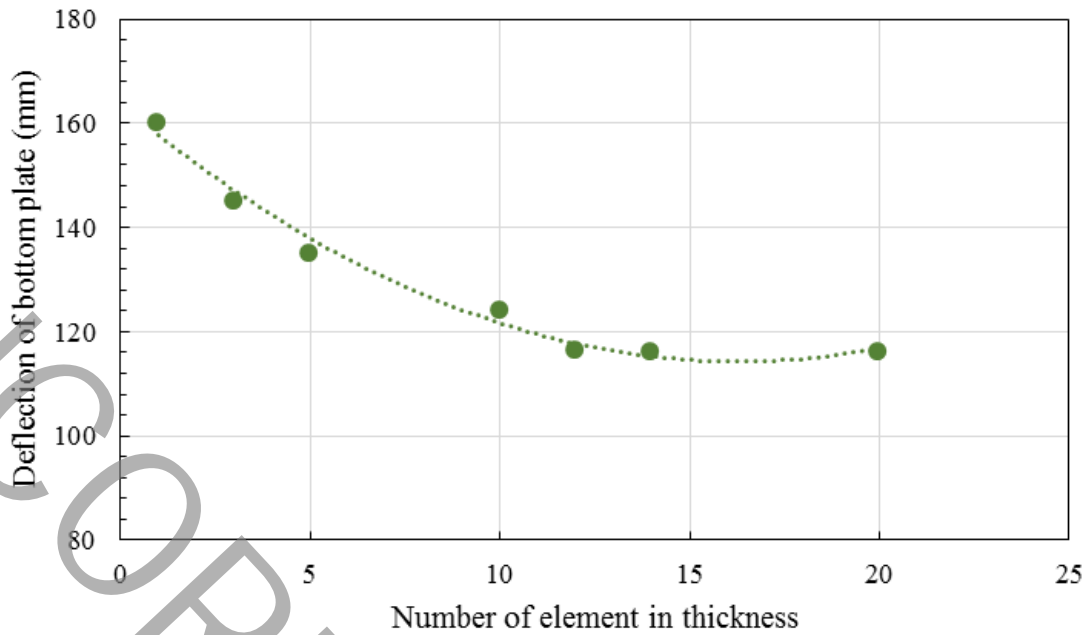


Fig. 2. Convergence of the results by changing the number of elements

شکل ۲: همگرایی جواب مسئله با تغییر تعداد المان

جدول ۲: ثوابت معادله جانسون-کوک برای AL6XN [۲۳]

Table 2. Constants of the Johnson-Cook equation for AL6XN [23]

T_m (K)	T_r (K)	$\dot{\epsilon}_0$	m	C	n	B (MPa)	A (MPa)
۱۷۰۰	۲۹۶	۰/۰۰۱	۱/۰۳	۰/۰۲۴	۰/۸۲	۱۹۰۲	۴۱۰

تولید یک موج شوک به سمت بیرون از نقطه انفجار می‌کند. این موج شوک به صورت کروی از مرکز انفجار انتشار می‌یابد و سبب اعمال نیروی زیادی بر اجسام اطراف خود می‌شود. این نیرو اصطلاحاً انفجار هوا^۲ نامیده می‌شود و امواج حاصله نیز امواج بلست نامیده می‌شوند. زمان رسیدن این موج به نقطه‌ای با فاصله R از مرکز انفجار، T_a است. پس از این که موج به این نقطه برسد، فشار آن از P_{atm} به سرعت تا P_{max} افزایش می‌یابد. مقدار فشار ماکزیمم در این نقطه از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۶].

تست‌های پیچش در نرخ کرنش‌های و دماهای متفاوت و تست فشار میله هاپکینسون^۱ تعیین می‌شوند. $\dot{\epsilon}_{eq}$ ، کرنش پلاستیک معادل است. T ، دمای مطلق، T_r ، دمای محیط و T_m دمای ذوب ماده است. در جدول ۲ ثوابت رابطه (۱) برای AL6XN نشان داده شده است.

۲-۳- مدل سازی فشار و نیروی انفجار

زمانی که یک انفجار در هوا به وقوع می‌پیوندد، یک توده بسیار بزرگ از هوای فشرده و داغ تشکیل می‌شود. این هوای فشرده، در هوای محیط بیرون

2 Air Blast

1 Hopkinson Bar

که مقدار آن بر واحد سطح، برابر مساحت زیر منحنی فشار-زمان موج بلست است. مقدار ضربه با استفاده از رابطه تجربی (۴) قابل محاسبه است [۲۶].

$$\frac{I}{A} = \frac{0.067 \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.23}\right)^4}}{Z^2 \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.55}\right)^3}} \quad (3)$$

I ایمپالس موج و A سطح مقطع وارد شدن موج است. در نرم افزار آباکوس اثرات موج بلست بر روی ساختار ساندویچی توسط مدل کانوپ^۲ اعمال شده است. این مدل مبتنی بر داده‌های تجربی است و توسط ارتش ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای محاسبه فاصله نقطه اثر نیرو تا مرکز انفجار، از فاصله مقیاس شده $(Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}})$ استفاده می‌کند. پس از محاسبه فاصله مقیاس شده، مدل کانوپ از داده‌های تجربی موجود، موارد زیر را تخمین می‌زند: زمان رسیدن فشار به نقطه مورد نظر (T_a) با فاصله مشخص ماکزیمم فشار اعمال شده در آن فاصله (P_{max}) زمان فاز مثبت (T_p) توان تابع کاهش نمایی در فاز مثبت برای فشار تابع^۳ و فشار بازتاب شده برای مدل سازی جرم ماده منفجره از جرم معادل تی‌ان‌تی آن، استفاده شده است.

۴-۲- صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، نتایج حاصل با نتایج تجربی گزارش شده توسط دهارماسنا و همکاران [۱۰] مقایسه شد. در شکل ۳، مقایسه‌ای بین مدل واقعی و شبیه‌سازی شده در بار انفجار ۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی نشان داده شده است. مقایسه پروفیل تغییر شکل نشان می‌دهد که مطابقت مطلوبی میان مدل شبیه‌سازی شده با مقادیر تجربی برقرار است؛ لذا می‌توان بر مدل ارائه شده صحت‌گذاری کرد.

در شکل ۴ نیز مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی برای میزان تغییر شکل مرکزی نمونه انجام شده است. در این مقایسه، مقدار جابجایی صفحات بالایی و پایینی در فشارهای مختلف ناشی از انفجار مواد تی‌ان‌تی مقایسه شده است. این نمودار نشان‌دهنده دقت مدل کانوپ در پیش‌بینی فشار انفجار و تطابق قابل قبول آن با نتایج واقعی است.

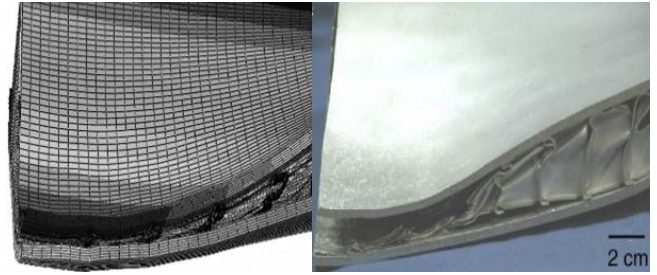


Fig. 3. Comparison between the results of experiments and simulated model

شکل ۳: مقایسه بین نتایج آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی شده

$$P_{max} = \begin{cases} \frac{6.7}{Z^3} & : P_{max} > 10 \text{ kg/cm}^2 \\ \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 & : 0.1 < P_{max} < 10 \text{ kg/cm}^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$$

Z در این رابطه W وزن معادل ماده منفجره بر حسب تی‌ان‌تی^۱ است. علاوه بر فشار، یک ویژگی دیگر موج بلست، ضربه یا ایمپالس آن است

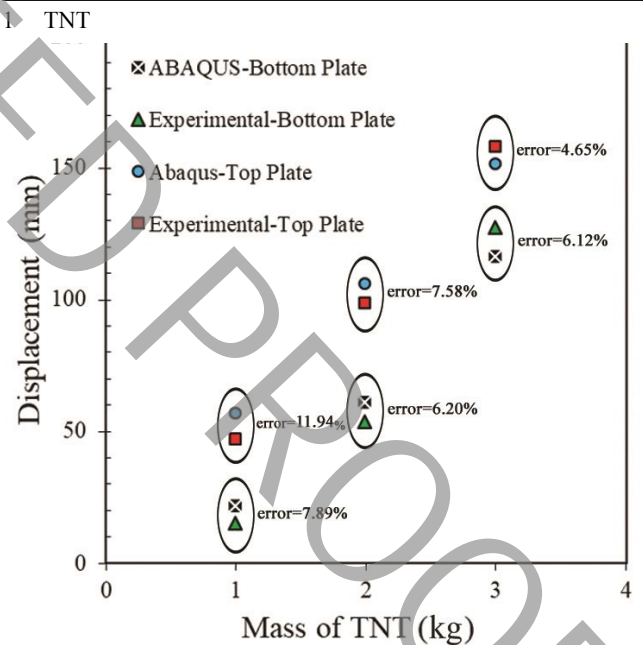


Fig. 4. Comparison diagram of the top and bottom plates displacement of sandwich structures

شکل ۴: نمودار مقایسه جابجایی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی

2 CONWEP
3 Incident

جدول ۳: متغیرهای مستقل در طراحی آزمایش و سطوح آنها

Table 3. Independent variables in the design of the experiment and their levels

بازه و سطوح متغیرها			واحد	متغیرهای طراحی	متغیرهای مستقل
-۱	۰	۱			
۲	۳	۴	mm	X_1	ضخامت صفحات فلزی
۳	۵	۷	-	X_2	تعداد صفحات در هسته
۰/۴	۰/۶	۰/۸	mm	X_3	ضخامت لانه زنبوری
۰/۵	۱	۱/۵	kg	X_4	جرم خرج

جدول ۴: جدول آنوا مربوط به مدل سطح پاسخ جابجایی صفحات بالا (Y_1) و پایین (Y_2)

Table 4. Independent variables in the design of the experiment and their levels

Probe > F	F-value	متوسط مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
<۰/۰۰۰۱	۸۶۸/۲۸	۳۹۴۰/۹۵	۱۴	۵۵۱۷۳/۲۹	مدل (Y_1)
<۰/۰۰۰۱	۱۴۱۱/۴۸	۶۴۰۶/۴۲	۱	۶۴۰۶/۴۲	X_1 (ضخامت صفحات بالا و پایین)
<۰/۰۰۰۱	۶۵/۷۹	۲۹۸/۶۰	۱	۲۹۸/۶۰	X_2 (تعداد صفحات در لانه زنبوری)
<۰/۰۰۰۱	۸۷/۵۹	۳۹۷/۵۷	۱	۳۹۷/۵۷	X_3 (ضخامت صفحات در لانه زنبوری)
<۰/۰۰۰۱	۵۰۵۸/۰۹	۲۲۹۵۷/۶۳	۲	۴۵۹۱۵/۲۶	X_4 (جرم تی‌ان‌تی)
۰/۰۰۴۷	۸/۸۷	۴۰/۲۶	۱	۴۰/۲۶	$X_1 X_2$
<۰/۰۰۰۱	۳۳/۶۵	۱۵۲/۷۳	۱	۱۵۲/۷۳	$X_1 X_3$
<۰/۰۰۰۱	۱۱۶/۳۸	۵۲۸/۲۱	۲	۱۰۵۶/۴۱	$X_1 X_4$
۰/۰۱۱۲	۷/۰۰	۳۱/۷۹	۱	۳۱/۷۹	$X_2 X_3$
<۰/۰۰۰۱	۵۰/۲۱	۲۲۷/۸۷	۲	۴۵۵/۷۵	$X_3 X_4$
<۰/۰۰۰۱	۷۳/۰۸	۳۳۱/۶۷	۱	۳۳۱/۶۷	X_1^2
۰/۰۰۷۶	۷/۸۲	۳۵/۵۰	۱	۳۵/۵۰	X_3^2
-	-	۴/۵۴	۴۵	۲۰۴/۲۵	باقیمانده
-	-	۰/۲۸	۱۵	۴/۱۳	خطای خالص
<۰/۰۰۰۱	۴۲۰/۲۲	۳۵۳۳/۸۵	۱۰	۳۵۳۳۸/۴۸	مدل (Y_2)
<۰/۰۰۰۱	۶۸۳/۸۹	۵۷۵۱/۲۳	۱	۵۷۵۱/۲۳	X_1 (ضخامت صفحات بالا و پایین)
۰/۰۰۲۷	۹/۹۷	۸۳/۸۰	۱	۸۳/۸۰	X_2 (تعداد صفحات در لانه زنبوری)
<۰/۰۰۰۱	۲۳/۰۵	۱۹۳/۸۵	۱	۱۹۳/۸۵	X_3 (ضخامت صفحات در لانه زنبوری)
<۰/۰۰۰۱	۱۶۱۷/۸۴	۱۳۶۰۵/۳۲	۲	۲۷۲۱۰/۶۵	X_4 (جرم تی‌ان‌تی)
<۰/۰۰۰۱	۶۲/۹۲	۵۲۹/۱۵	۲	۱۰۵۸/۲۹	$X_1 X_4$
<۰/۰۰۰۱	۲۵/۰۳	۲۱۰/۴۹	۲	۴۲۰/۹۷	$X_3 X_4$
<۰/۰۰۰۱	۷۳/۶۹	۶۱۹/۶۹	۱	۶۱۹/۶۹	X_1^2
-	-	۸/۴۱	۴۹	۴۱۲/۰۷	باقیمانده
-	-	۰/۴۰	۱۵	۵/۹۵	خطای خالص

جدول ۵: مدل رگرسیونی مرتبه دوم برای جابجایی صفحات بالا و پایین سازه

Table 5. Second-order regression model for the displacement of the top and bottom plates of the structure

معادله	جرم خرج kg	پاسخ
$Y_1 = 122/29 - 29/45 X_1 - 1/46 X_2 - 39/19 X_3 + 0/65 X_1 X_2 + 12/61 X_1 X_3 - 2/88 X_2 X_3 + 2/05 X_1^2 - 16/75 X_3^2$	۰/۵	جابجایی صفحات بالا (Y1)
$Y_1 = 152/97 - 33/67 X_1 - 1/46 X_2 - 3/69 X_3 + 0/65 X_1 X_2 + 12/61 X_1 X_3 - 2/88 X_2 X_3 + 2/05 X_1^2 - 16/75 X_3^2$	۱	جابجایی صفحات بالا (Y1)
$Y_1 = 206/53 - 40/82 X_1 - 1/46 X_2 - 10/34 X_3 + 0/65 X_1 X_2 + 12/61 X_1 X_3 - 2/88 X_2 X_3 + 2/05 X_1^2 - 16/75 X_3^2$	۱/۵	جابجایی صفحات پائین (Y2)
$Y_2 = 49/82 - 21/81 X_1 - 0/66 X_2 - 21/70 X_3 + 2/76 X_1^2$	۰/۵	جابجایی صفحات پائین (Y2)
$Y_2 = 113/87 - 27/33 X_1 - 0/66 X_2 - 21/70 X_3 + 2/76 X_1^2$	۱	جابجایی صفحات پائین (Y2)
$Y_2 = 154/52 - 33/30 X_1 - 0/66 X_2 - 19/30 X_3 + 2/76 X_1^2$	۱/۵	جابجایی صفحات پائین (Y2)

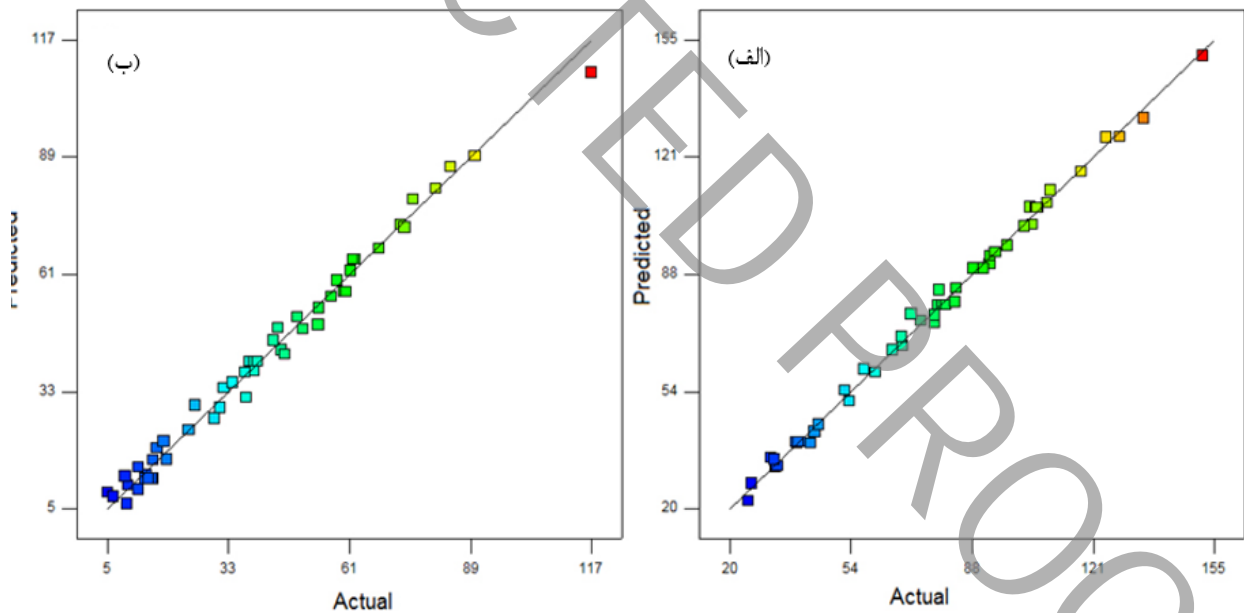


Fig. 5. Comparison of actual and predicted values by the surface response method of the plates displacement (a) top (b) bottom

شکل ۵: مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل سطح پاسخ جابجایی صفحات بالا (الف) و پایین (ب).

۳- طراحی آزمایش

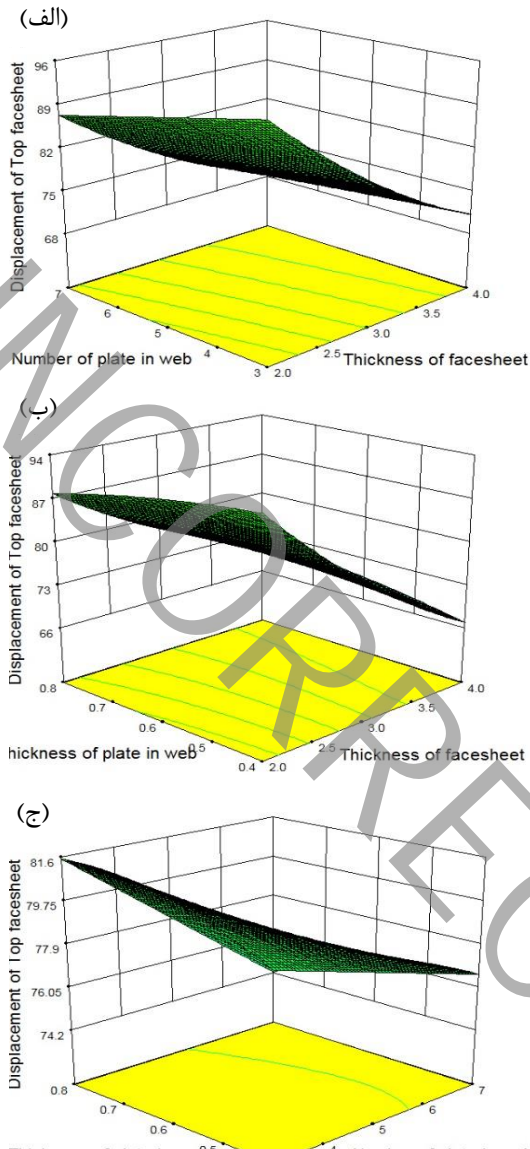


Fig. 6. The Response surface Chart for the interaction of effective parameters in plates displacement (a, b) top (c) bottom

شکل ۶: نمودار سطح پاسخ مربوط به برهم کنش پارامترهای موثر در جابجایی صفحات بالا (الف) و (ب) و پایین (ج).

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای موثر در جابجایی صفحات، بررسی تاثیر هر کدام از آن‌ها به صورت جداگانه کار بسیار دشوار و زمان‌بری است. استفاده از روش‌های ساده مانند تغییر یک پارامتر در هر زمان نیز، نمی‌تواند به خوبی تاثیر آن و برهم کنش بین آن‌ها را نشان دهد. به همین جهت استفاده از روش طراحی آزمایش پیشنهاد شده است. در این روش با انجام تعدادی آزمایش یا شبیه‌سازی عددی، تاثیر پارامترهای موثر بر خروجی نهایی مشخص می‌گردد. در بین روش‌های مختلف طراحی آزمایش مانند روش‌های چند عاملی، فاکتوریل جزئی، فاکتوریل کامل، سطح پاسخ، تاگوچی، روش سطح پاسخ به علت کارایی بالا بیشتر مورد استفاده محققان قرار می‌گیرد. منظور از کارایی، توانمندی‌های روش در اعتباربخشی، قابلیت برازش و بهینه‌سازی است. در این تحقیق یک طرح مرکب مرکزی^۱ چهار متغیره به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف و بهینه‌سازی ساختار ساندویچی در برابر بارهای انفجاری در نظر گرفته شد و در خروجی آن، تعداد ۶۰ آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مربوط به آزمایش‌ها در جدول پیوست آمده است. در این مقاله تابع پاسخ، جابجایی صفحات بالا (Y_1) و پایین (Y_2) است و متغیرهای مستقل موثر بر آن نیز عبارت‌اند از ضخامت صفحات فلزی (X_1)، ضخامت صفحات هسته (X_2)، تعداد صفحات هسته (X_3) و جرم خرج (X_4). در این بین جرم خرج به دلیل شرایط آزمایش به صورت متغیر گسسته و سایر متغیرها به صورت پیوسته در نظر گرفته شده است. مدل مرتبه دوم که به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود بر روی داده‌های به دست آمده، اعمال گردید.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=2}^3 \beta_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

که در آن Y پاسخ محاسبه شده، x_1 و x_2 متغیرهای کدگذاری شده، β ضریب ثابت، β_i ضریب خطی، β_{ii} ضریب مرتبه دوم، و β_{ij} ضریب متقابل است [۲۷].

روش سطح پاسخ به منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس (آنوا)^۲ استفاده می‌کند. نتایج تحلیل واریانس به طور معمول به صورت جدولی شامل مجموع مربعات هر عامل و خطا، درجه آزادی هر عامل و خطا، میانگین مربعات (واریانس) هر عامل و خطا، پارامتر معنی‌داری پاسخ برای عامل (F) و سهم هر عامل در پاسخ (p -value) ارائه می‌شود.

در این تحقیق از نرم‌افزار طراحی آزمایش^۳ به منظور پردازش و تحلیل نتایج به دست آمده استفاده گردید. در جدول ۳، متغیرهای مستقل با بازه مورد بررسی نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان جابجایی در صفحات بالا (Y_1) و پایین (Y_2) به همراه شرایط انجام مربوط به هر کدام از آزمایش‌های انجام شده، در جدولی که در پیوست آمده، ارائه شده

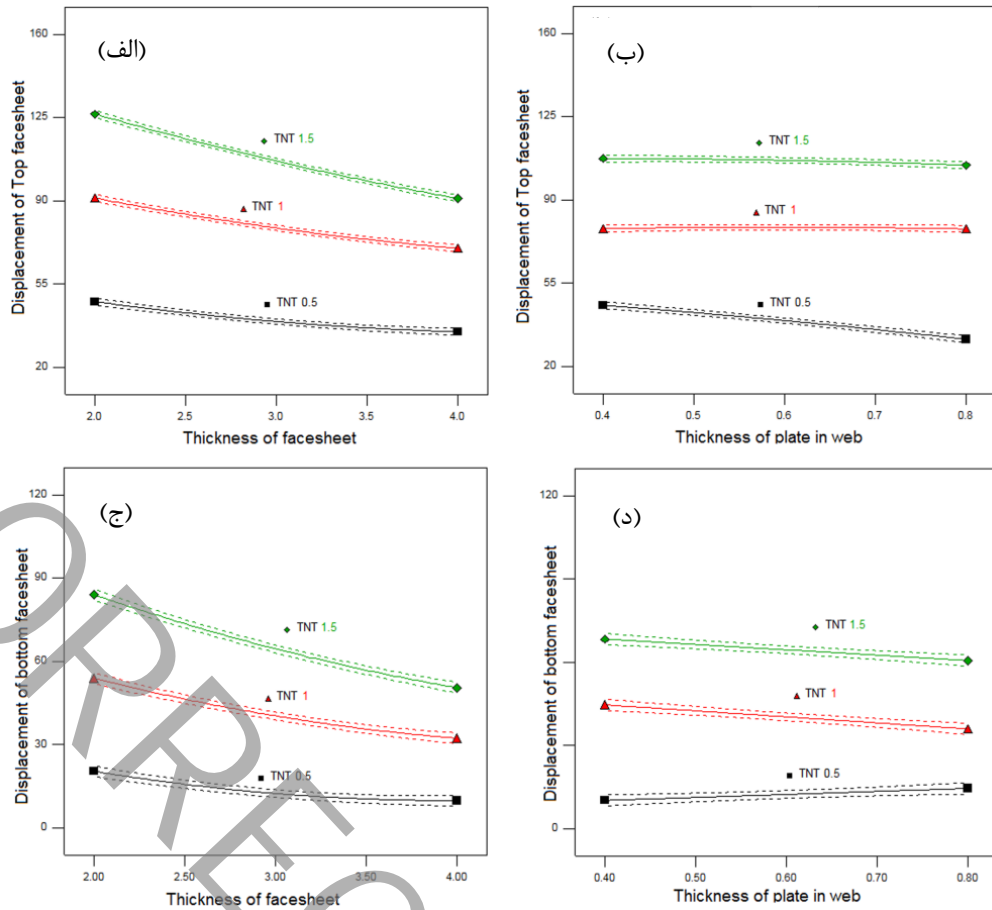


Fig. 7. The effect of the interaction of charge mass changes with the thickness of the metal plates (X1X4) and the thickness of the plates in the core (X3X4) on the displacement of the plates (a, b) top and (c, d) bottom

شکل ۷: اثر برهم کنش تغییرات جرم خراج با ضخامت صفحات فلزی (X1X4) و ضخامت صفحات در هسته (X3X4) بر روی جابجایی صفحات بالا (الف) و (ب) و پایین (ج) و (د)

و مقادیر به دست آمده از آزمایش با مقادیر پیش بینی شده برای جابجایی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی، بر اساس مدل مطابقت دارد. مقایسه مقادیر واقعی و پیش بینی شده توسط مدل سطح پاسخ برای جابجایی صفحات بالا و پایین در شکل های ۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است.

شکل های ۶ (الف) و (ب) تاثیر متغیرهای مورد بررسی بر میزان جابجایی صفحات بالا و شکل ۶ (ج) تاثیر متغیرهای مورد بررسی بر میزان جابجایی صفحات پایین را نشان می دهد. بر این اساس تاثیر متقابل و برهم کنش ضخامت صفحات فلزی (X_۱) و تعداد صفحات در هسته (X_۳) (شکل ۶ (الف))، برهم کنش ضخامت صفحات فلزی (X_۱) و ضخامت صفحات در هسته (X_۳) در شکل ۶ (ب) و برهم کنش تعداد صفحات در هسته (X_۳) و

است. در این تحقیق به منظور بررسی معنی دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. بر این اساس، چنانچه سهم هر عامل در پاسخ برای مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی دار است. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، سهم هر عامل در پاسخ و همچنین R^2 و R^2_{adj} به دست آمد که در جدول ۴ مشاهده می شود.

مدل مرتبه دوم به دست آمده برای سطح پاسخ جابجایی صفحات بالا (Y_۱) و پایین (Y_۲) نیز به صورت نشان داده شده در جدول ۵ برای مقادیر واقعی متغیرهای مورد بررسی است. مقدار R^2 و R^2_{adj} به ترتیب برابر ۰/۹۹۶ و ۰/۹۹۵ برای جابجایی صفحات بالا (Y_۱) و برابر ۰/۹۸۸ و ۰/۹۸۶ برای جابجایی صفحات پایین (Y_۲) است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بازه های انتخاب شده و مدل ارائه شده برای این آزمایش مناسب بوده

جدول ۶: شرایط بهینه متغیرهای موردبررسی در آزمایش برای دستیابی به بیشترین مقاومت.

Table 6. Optimum conditions for test variables in order to achieve the highest strength

متغیرهای مستقل	مقادیر بهینه	مقادیر بهینه	مقادیر بهینه برای
	برای جرم خرج	جرم خرج	جرم خرج
	۰/۵ کیلوگرم	۱ کیلوگرم	۱/۵ کیلوگرم
ضخامت صفحات فلزی (mm)	۳/۸۲	۳/۹۵	۴/۴۴
تعداد صفحات در هسته	۷	۷	۹
ضخامت صفحات در هسته (mm)	۰/۸	۰/۹	۰/۹

صفحات بالا و پایین سازه ساندویچی، با استفاده از مدل رگرسیون شرایط زیر تعیین گردید. به طوری که شرایط و متغیرهای موثر (ضخامت صفحات فلزی (X_1) ، ضخامت صفحات در هسته (X_2) ، تعداد صفحات در هسته (X_3) و جرم خرج (X_4) هر کدام در سطوح قبلی انتخاب شدند. مقادیر بهینه به دست آمده در جدول ۶ ارائه شده است.

بر اساس جرم خرج ۰/۵ کیلوگرم، سازه مورد بررسی دارای بیشترین مقاومت در برابر انفجار بوده و میزان جابجایی صفحات بالا و پایین آن به ترتیب برابر ۲۷/۱۱ و ۱۰/۷۸ میلی متر با میزان مطلوبیت ۰/۹۶ پیش بینی شد. به منظور بررسی نتایج به دست آمده برای جابجایی صفحات بالا و پایین، شرایط بهینه متغیرها در جرم خرج ۰/۵ کیلوگرم به دست آمده، برای مدل شبیه سازی شده، تعریف گردید. مقدار جابجایی صفحات بالا و پایین از نرم افزار آباکوس به ترتیب ۲۸/۷۵ و ۱۲/۱۳ میلی متر به دست آمد که حداکثر مقدار ۱۱ درصد خطا را نشان می دهد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، پاسخ دینامیکی ساختارهای ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت و همچنین بهینه سازی آماری پارامترهای موثر بر این سازه نظیر ضخامت صفحات فلزی، ضخامت صفحات در هسته و تعداد صفحات در هسته مورد مطالعه قرار گرفت. در گام اول در بخش عددی، با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس به شبیه سازی رفتار دینامیکی ساختار ساندویچی با هسته لانه زنبوری و صحت سنجی آن با داده های تجربی دهارماسنا و همکاران [۱۰] پرداخته شد. در بخش شبیه سازی عددی، صفحه های فلزی با ضخامت های مختلف به صورت تغییر شکل پذیر مدل شده و مش مورد نظر ساختار نیز از نوع المان خطی چهاروجهی جامد انتخاب شده است. همچنین، به منظور کاهش محاسبات با توجه به مقارن

ضخامت صفحات در هسته (X_2) در شکل ۶ (ج) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش ضخامت صفحات فلزی، ساختار ساندویچی از میزان جابجایی و تغییر شکل صفحات کاسته می شود و مقاومت بیشتری را در برابر بار آبی انفجاری یکنواخت نشان می دهد. همچنین بیشینه مقاومت سازه در برابر بارگذاری انفجاری و کمترین تغییر شکل در صفحات پایین در بیشترین ضخامت صفحات در هسته و همچنین بیشترین ضخامت صفحات فلزی سازه رخ داده است به طور مشابه در مورد صفحه بالایی سازه نیز نتایج مشابهی به دست آمد با این تفاوت که روند جابجایی صفحه بالا به صورت خطی و جابجایی صفحه پایین سازه به صورت غیرخطی بوده است. همچنین با بررسی نمودار پرتشیدگی داده ها مشخص شد که ضخامت صفحات فلزی تأثیر بیشتری را بر روی بهبود مقاومت سازه در برابر بارگذاری انفجاری دارد و با افزایش ضخامت آن می توان به میزان قابل توجهی از جابجایی صفحات بالا و پایین سازه کاست.

به منظور بررسی اثر جرم خرج بر میزان مقاومت در برابر انفجار و جابجایی صفحات بالا و پایین سازه ساندویچی، و همچنین برهم کنش آن با سایر متغیرهای مورد بررسی، نمودار تأثیر متقابل جرم خرج و متغیرهای موثر بر روی پاسخ به دست آمد و در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، افزایش جرم خرج سبب افزایش جابجایی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی شده و از مقاومت انفجاری آن کاسته می شود. این تغییرات با متغیرهای موثر مورد بررسی نظیر ضخامت صفحات فلزی (X_1) و ضخامت صفحات در هسته (X_2) برهم کنش داشته و دارای تأثیر متقابل می باشند.

بر اساس نتایج به دست آمده و پس از تحلیل واریانس نتایج حاصل از مدل رگرسیون، به منظور تعیین شرایط بهینه ساخت ساندویچ پانل با هدف دستیابی به بیشترین مقاومت انفجاری و کمترین تغییر و جابجایی در

- in: Key Engineering Materials, Trans Tech Publ, 1998, pp. 501-552.
- [6] M. Meo, R. Vignjevic, G. Marengo, The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading, International journal of mechanical sciences, 47(9) (2005) 1301-1325.
- [7] W. Goldsmith, J.L. Sackman, An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates, International Journal of Impact Engineering, 12(2) (1992) 241-262.
- [8] D. Radford, N. Fleck, V. Deshpande, The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading, International Journal of Impact Engineering, 32(6) (2006) 968-987.
- [9] D. Radford, G. McShane, V. Deshpande, N. Fleck, The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading, International Journal of solids and structures, 43(7-8) (2006) 2243-2259.
- [10] K.P. Dharmasena, H.N. Wadley, Z. Xue, J.W. Hutchinson, Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading, International Journal of Impact Engineering, 35(9) (2008) 1063-1074.
- [11] F. Zhu, L. Zhao, G. Lu, Z. Wang, Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels—experimental investigations, International Journal of Impact Engineering, 35(8) (2008) 937-951.
- [12] F. Zhu, L. Zhao, G. Lu, E. Gad, A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels, International Journal of Impact Engineering, 36(5) (2009) 687-699.
- [13] F. Zhu, L. Zhao, G. Lu, Z. Wang, Structural response and energy absorption of sandwich panels with an aluminium foam core under blast loading, Advances in Structural Engineering, 11(5) (2008) 525-536.
- [14] F. Zhu, Z. Wang, G. Lu, L. Zhao, Analytical investigation and optimal design of sandwich panels subjected to shock loading, Materials & Design, 30(1) (2009) 91-100.
- [15] F. Zhu, Z. Wang, G. Lu, G. Nurick, Some theoretical

بودن مسئله، مدل هندسی سازه به صورت سه بعدی و یک چهارم مدل شده و قسمت لانه زنبوری نیز به صورت پوسته با ضخامت $0/76$ میلی متر انتخاب شده است. همچنین در این بخش، از مدل کانوپ برای اعمال فشار و شوک ناشی از انفجار ماده تی ان تی استفاده شد. همچنین برای مدل سازی رفتار ماده، از مدل ماده پلاستیک جانسون-کوک همراه با معیار خسارت آن به کار گرفته شد. در این تحقیق از نرم افزار طراح آزمایش به منظور پردازش و تحلیل نتایج به دست آمده از شبیه سازی های عددی استفاده شد. در این تحقیق به منظور بررسی معنی دار بودن مدل، سطح اطمینان 95 درصد در نظر گرفته شد؛ بدان معناست که چنانچه سهم هر عامل در پاسخ برای مدل کمتر از $0/05$ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی دار است. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، سهم هر عامل در پاسخ و همچنین R^2 و R_{adj}^2 به دست آمد. مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تجربی متناظر با آن نشان داد که مدل عددی شبیه سازی شده دارای دقت بسیار خوبی بوده و قابلیت استناد دارد. با توجه به مقدار بالای ضریب همبستگی ($R^2=0/99$) به دست آمده از روش سطح پاسخ می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی مربوط به تغییر شکل صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری دارد. همچنین نتایج مربوط به بهینه سازی پارامترهای مورد مطالعه نشان داد که ساختار ساندویچی با بیشترین مقاومت در برابر بارگذاری انفجاری در ضخامت صفحات فلزی $3/82$ میلی متر، تعداد 7 صفحه در هسته، ضخامت صفحات در هسته $0/8$ میلی متر برای جرم خرج انفجاری $0/5$ کیلوگرم به دست می آید.

منابع

- [1] G. Lu, T. Yu, Energy absorption of structures and materials, Elsevier, 2003.
- [2] L.J. Gibson, M.F. Ashby, Cellular solids: structure and properties, Cambridge university press, 1999.
- [3] M.F. Ashby, T. Evans, N.A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson, Metal foams: a design guide, Elsevier, 2000.
- [4] S. Abrate, Impact on composite structures, Cambridge university press, 2005.
- [5] H. Wen, T. Reddy, S. Reid, P. Soden, Indentation, penetration and perforation of composite laminate and sandwich panels under quasi-static and projectile loading,

- response of aluminum foam core sandwich panels subjected to localized air blast loading, *Marine Structures*, 65 (2019) 343-361.
- [22] A. Maleki, S.A. Ahmadi, M.H. Pashaei, Three-dimensional Elastic-Plastic Deformation Analysis of Composite Sandwich Panel under blast loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2019) - (in Persian).
- [23] T. Børvik, L. Olovsson, A. Hanssen, K. Dharmasena, H. Hansson, H. Wadley, A discrete particle approach to simulate the combined effect of blast and sand impact loading of steel plates, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(5) (2011) 940-958.
- [24] G.R. Johnson, A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures, *Proc. 7th Int. Sympo. Ballistics*, (1983) 541-547.
- [25] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering fracture mechanics*, 21(1) (1985) 31-48.
- [26] G.F. Kinney, K.J. Graham, *Explosive shocks in air*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [27] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons, 2016.
- considerations on the dynamic response of sandwich structures under impulsive loading, *International Journal of Impact Engineering*, 37(6) (2010) 625-637.
- [16] G. Nurick, G. Langdon, Y. Chi, N. Jacob, Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast–Part 1: Experiments, *Composite Structures*, 91(4) (2009) 433-441.
- [17] D. Karagiozova, G. Nurick, G. Langdon, Behaviour of sandwich panels subject to intense air blasts–Part 2: Numerical simulation, *Composite Structures*, 91(4) (2009) 442-450.
- [18] J. Zamani, M. Goudarzi, Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion, *Modares Mechanical Engineering*, 15(1) (2015) 219-226.
- [19] S.m. Mirfalah nasiri, A. Basti, R. Hashemi, A. Darvizeh, Theoretical analysis of the temperature and strain rate effects on the forming limit diagram of AA3104, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2018) - (in Persian).
- [20] Y. Cheng, M. Liu, P. Zhang, W. Xiao, C. Zhang, J. Liu, H. Hou, The effects of foam filling on the dynamic response of metallic corrugated core sandwich panel under air blast loading–Experimental investigations, *International Journal of Mechanical Sciences*, 145 (2018) 378-388.
- [21] G. Chen, P. Zhang, J. Liu, Y. Cheng, H. Wang, Experimental and numerical analyses on the dynamic

جدول الف: مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده و مورد بررسی .

Table A. Measured and examined parameters values

ردیف	متغیرهای مستقل					
	ضخامت صفحات فلزی (mm)	تعداد صفحات در هسته	ضخامت صفحات هسته (mm)	جرم خرج (kg)	جابجایی صفحات بالا (mm)	جابجایی صفحات پایین (mm)
۱	۲	۷	۰/۸	۰/۵	۳۳/۱۹۵	۱۸/۱۶۱
۲	۲	۳	۰/۸	۱	۹۲/۵۵۷	۴۹/۰۷۷
۳	۳	۵	۰/۶	۱/۵	۱۰۵/۵۴۷	۶۱/۸۲۴
۴	۳	۹	۰/۶	۱	۷۶/۹۸۹	۳۶/۸۴
۵	۳	۹	۰/۶	۱/۵	۱۰۴/۲۰۴	۶۱/۲۴۹
۶	۴	۷	۰/۸	۰/۵	۲۵/۹۵	۹/۹۰۶
۷	۳	۵	۰/۶	۱/۵	۱۰۵/۸۵۳	۶۲/۱۵۶
۸	۵	۵	۰/۶	۱/۵	۸۲/۶۴۱	۴۶/۰۶۸
۹	۲	۳	۰/۴	۱	۹۷/۳۷۵	۵۸/۱۲۷
۱۰	۳	۵	۰/۶	۱/۵	۱۰۵/۹۱۶	۶۲/۳۸۲
۱۱	۳	۵	۰/۶	۰/۵	۳۸/۵۴	۱۳/۹۴۱
۱۲	۳	۱	۰/۶	۱	۸۳/۱۲۸	۴۵/۳۳۹
۱۳	۳	۵	۰/۶	۱	۷۹/۳۳	۳۹/۱۰۸
۱۴	۳	۵	۰/۶	۰/۵	۳۹/۱۳۵	۱۴/۶۲
۱۵	۳	۵	۱	۱	۷۷/۰۹۵	۳۷/۲۵۳
۱۶	۲	۷	۰/۴	۱/۵	۱۲۸/۷۴۶	۸۴/۳۹۳
۱۷	۵	۵	۰/۶	۰/۵	۳۱/۳۹۱	۹/۲۰۲
۱۸	۲	۷	۰/۴	۱	۹۲/۴۲۲	۵۹/۸۰۵
۱۹	۳	۵	۰/۶	۰/۵	۳۹/۴۹۷	۱۵/۳۹۱
۲۰	۳	۵	۰/۶	۰/۵	۳۹/۶۵۸	۱۵/۶۱۹
۲۱	۲	۷	۰/۸	۱	۷۸/۲۷۸	۴۴/۴۲۱

ادامه جدول الف: مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده و مورد بررسی .

Continued table A.. Measured and examined parameters values

پاسخ		متغیرهای مستقل				ردیف
جابجایی صفحات پایین (mm)	جابجایی صفحات بالا (mm)	جرم خرج (kg)	ضخامت صفحات هسته (mm)	تعداد صفحات در هسته	ضخامت صفحات فلزی (mm)	
۱۵/۷۴	۲۵/۱۰۴	۰/۵	۱	۵	۳	۲۲
۶۲/۲۳۱	۱۰۵/۹۳۹	۱/۵	۰/۶	۵	۳	۲۳
۳۹/۴۶۷	۷۹/۱۰۸	۱	۰/۶	۵	۳	۲۴
۳۸/۴۳۹	۷۸/۶۷۹	۱	۰/۶	۵	۳	۲۵
۴۲/۵۱۱	۸۷/۹۲۱	۱/۵	۰/۸	۷	۴	۲۶
۶۱/۷۳۲	۱۰۵/۲۶۷	۱/۵	۰/۶	۵	۳	۲۷
۲۵/۳۶۲	۶۵/۳۸۳	۱	۰/۶	۵	۵	۲۸
۳۹/۷۵۳	۷۹/۴۳۷	۱	۰/۶	۵	۳	۲۹
۶/۳۸	۵۳/۱۷۳	۰/۵	۰/۲	۵	۳	۳۰
۱۲/۲۷۶	۴۴/۶۶۶	۰/۵	۰/۶	۱	۳	۳۱
۶۷/۹۴۹	۱۰۹/۳۶۷	۱/۵	۰/۶	۱	۳	۳۲
۱۴/۸۲۱	۳۹/۲۴۳	۰/۵	۰/۶	۵	۳	۳۳
۳۳/۹۵	۶۸/۰۹	۱	۰/۴	۷	۴	۳۴
۹/۶۱	۳۸/۶۸۱	۰/۵	۰/۴	۷	۴	۳۵
۵۳/۷۹۵	۷۰/۵۴	۱	۰/۲	۵	۳	۳۶
۶۲/۰۹۴	۱۰۵/۸۷۸	۱/۵	۰/۶	۵	۳	۳۷
۱۴/۰۷	۳۲/۶۸۴	۰/۵	۰/۸	۳	۴	۳۸
۷۳/۸۰۷	۱۰۳/۷۲۹	۱/۵	۰/۲	۵	۳	۳۹
۱۳/۸۸۳	۳۸/۴۲۲	۰/۵	۰/۶	۵	۳	۴۰
۳۲/۰۶۷	۵۷/۳۷۳	۰/۵	۰/۶	۵	۱	۴۱
۳۹/۸۶۴	۸۰/۱۴۸	۱	۰/۶	۵	۳	۴۲
۶۰/۳۳۹	۱۰۲/۱۴۷	۱/۵	۱	۵	۳	۴۳

ادامه جدول الف: مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده و مورد بررسی .

Continued table A.. Measured and examined parameters values

پاسخ		متغیرهای مستقل				ردیف
جابجایی صفحات پایین (mm)	جابجایی صفحات بالا (mm)	جرم خرج (kg)	ضخامت صفحات هسته (mm)	تعداد صفحات در هسته	ضخامت صفحات فلزی (mm)	
۹۰/۰۴۶	۱۰۵/۳۰۵	۱/۵	۰/۴	۳	۲	۴۴
۵۴/۰۲۳	۹۰/۶۹۲	۱/۵	۰/۴	۷	۴	۴۵
۴۹/۸۳۹	۶۷/۷۸۵	۱	۰/۸	۷	۴	۴۶
۳۱/۰۹۱	۷۳/۲۷۲	۱	۰/۸	۳	۴	۴۷
۲۳/۸۹	۴۳/۵۸۸	۰/۵	۰/۸	۳	۲	۴۸
۵۰/۲۵۲	۹۳/۹۸۴	۱/۵	۰/۸	۳	۴	۴۹
۵/۱۴	۴۲/۴۸۸	۰/۵	۰/۴	۳	۴	۵۰
۱۸/۷۱۱	۵۲/۱۴۴	۰/۵	۰/۴	۷	۲	۵۱
۱۶/۵۷۶	۶۰/۶۴۷	۰/۵	۰/۴	۳	۲	۵۲
۵۶/۸۶۲	۸۹/۱۳۵	۱/۵	۰/۴	۳	۴	۵۳
۳۸/۸۸۴	۶۸/۲۱۳	۱	۰/۴	۳	۴	۵۴
۸۱/۰۲۴	۱۲۴/۹۱۴	۱/۵	۰/۸	۳	۲	۵۵
۷۲/۹۰۴	۱۰۸/۳۵۱	۱	۰/۶	۵	۱	۵۶
۱۲/۲۵۶	۳۲/۳۰۷	۰/۵	۰/۶	۹	۳	۵۷
۳۷/۸۸۵	۷۸/۰۶۹	۱	۰/۶	۵	۳	۵۸
۷۵/۷۳۴	۱۱۷/۸۶	۱/۵	۰/۸	۷	۲	۵۹
۱۱۶/۹۵۹	۱۵۱/۸۹	۱/۵	۰/۶	۵	۱	۶۰