

# بررسی جذب انرژی و بهینه‌سازی پانل‌های ساندویچی با هسته مشبک ساخته شده با پرینتر سه بعدی

## خلاصه

هسته‌های مشبک به دلیل دارا بودن وزن کم و مکانیزم فروریزش مناسب، دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند. در این مقاله پانل‌های ساندویچی با هسته مشبک سه بعدی که توسط [پرینترهای سه بعدی](#) ساخته شده اند، تحت بارگذاری محوری به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است و در این راستای مطالعه در چگونگی رفتار فروریزش این پانل‌های ساندویچی نمودارهای نیرو جابه‌جایی مورد مطالعه قرار گرفته است.

آنالیز و تحلیل پارامترهای مورد بررسی در آزمون تجربی با استفاده از طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ باکس-بنکن انجام گردید، که در این راستا تاثیر تعداد لایه‌های هسته، اندازه زاویه بین لینک‌ها و اندازه قطر لینک‌های سلول‌های هسته مشبک بر میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که با کاهش زاویه بین لینک‌ها و افزایش قطر لینک‌های هسته مشبک در یک محدوده تعیین شده باعث بهبود عملکرد پانل‌های ساندویچی، تحت بارگذاری محوری می‌گردد. برهمکنشی بین پارامتر تعداد لایه‌های هسته و دو پارامتر دیگر یعنی زاویه و قطر لینک‌ها مشاهده نشد. افزایش لایه‌های هسته تا تعداد بهینه تعیین شده، باعث افزایش جذب انرژی ویژه گردید و در خارج از این نقطه، عملکرد پانل در رفتار جذب انرژی کاهش می‌یابد.

نمونه بهینه با میزان 3.87839 ژول بر گرم جذب انرژی ویژه و نیروی بیشینه اولیه با مقدار 3458.9 نیوتون، عملکرد بالایی را به عنوان یک جاذب انرژی نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که قطر لینک‌های هسته بیشترین تاثیر را بر نیروی بیشینه اولیه دارد.

انتشار مقاله:

بیست و نهمین همایش بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران و هشتمین همایش صنعت نیروگاه‌های حرارتی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، 4 تا 6 خرداد 1400

کلمات کلیدی: جاذب انرژی، بهینه‌سازی ساندویچ پانل، ساندویچ پانل سه بعدی، هسته‌های مشبک سه بعدی، بارگذاری محوری

فهرست عناوین این مقاله:

1- [مقدمه ای بر ساختارهای سه بعدی شبکه ای](#)

2- [خواص مکانیکی ساختارهای سلولی و جذب انرژی در دمای بالا](#)

3- فرآیند ساخت صفحات مشبک توسط پرینتر سه بعدی و معرفی نمونه‌ها

4- آزمون محوری شبه استاتیکی

5- طراحی تست

6- نتایج بحث

7- بهینه‌سازی خواص جذب انرژی در ساندویچ پانل

8- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نهایی

## 1- مقدمه ای بر ساختارهای سه بعدی شبکه ای

ساختارهای سه بعدی شبکه‌ای، همه جا در طبیعت هستند و نیز در انواع برنامه‌های کاربردی مهندسی استفاده می‌شوند، اعم از ساختار ساندویچ با هسته چگالی کم برای حفاظت از سازه‌ها به عنوان جاذب انرژی. در این زمینه، مکانیک سازه سلولی دو بعدی به صورت گسترده با استفاده از رویکردهای نظری، مدل‌های محاسباتی و آزمایش‌های قوی بررسی شده است و لازم است بر روی حالت سه بعدی بیشتر کار شود.

### ساختارهای سلولی در طبیعت

ساختارهای سلولی با سازمان ساختاری لوزی دوازده وجهی در طبیعت مشاهده شده است. زنبور عسل با استفاده از هندسه دوازده وجهی لوزی به شکل لانه زنبوری که هر کدام یک منشور شش ضلعی با نیم دوازده وجهی لوزی است بهره می‌برد. برخی از مواد معدنی مانند گارنت (سنگ‌های نیمه قیمتی) یک عادت کریستال لوزی دوازده وجهی مانند تشکیل می‌دهد.

مک کاون و همکاران به بررسی فروریزش و جذب انرژی بر روی ساختارهای سلولی پرداختند. در نتایج خود به این نکته اشاره کردند که هسته با جهت‌گیری صفر و 45 در فروریزش خود دچار کماتش در سلول‌ها شده است در حالی که هسته با جهت‌گیری فقط 45 فروریزشی همگن از خود نشان داده است. در مطالعات ایشان توجهی به تأثیرات ساختار و نوع اسکلت شبکه‌های سلولی در میزان جذب انرژی نشده است.

رائومینس و همکاران به بررسی جذب انرژی در پانل‌های ساندویچی با هسته سلولی سه بعدی تحت بارگذاری موضعی پرداختند. در ادامه کار هسته مورد مطالعه را با پانل با هسته لانه زنبوری مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که ساختار شبکه سلولی با کیفیت بهتر و حساسیت کمتری نسبت به هسته لانه زنبوری از خود در برابر شرایط ساخت و اکنش می‌دهند.

پانل با هسته سلولی در برابر ضربات جسم خارجی می‌تواند عملکرد بهتری از خود نشان دهد به ویژه که می‌توان با استفاده از مواد مختلف در ساخت هسته و بررسی ساختاری هسته این رفتار را بهبود بخشید. همچنین رائومینس و همکاران بیان کردند که برای کارهای آینده و انجام تحقیقات بیشتر بر روی سرعت و جذب انرژی در هسته‌های مشبک، از نقطه نظر ساختار هسته بررسی‌های بیشتری انجام شود.

### خواص مکانیکی ساختارهای سلولی و جذب انرژی در دمای بالا

لیجون ژیاو و همکاران در راستای مطالعه بر روی خواص مکانیکی ساختارهای سلولی به بررسی انرژی جذب شده از شبکه در دمای بالا پرداختند و نتایج تجربی ساختار سلولی از جنس فولاد ضد زنگ را با فوم آلومینیوم و فوم تیتانیوم مقایسه کردند. در نهایت نشان دادند که لوزی دوازده وجهی تیتانیم ساختار شبکه را می‌توان به عنوان اجزای تحمل بار و جاذب انرژی در دمای بالا مورد استفاده قرار داد و در مقایسه با دیگر ساختارهای سلولی با تراکم نسبی مشابه، ساختار دوازده وجهی لوزی شکل را با ظرفیت مقاومت تغییر شکل و جذب انرژی بسیار عالی‌تر معرفی کرد.

همانطور که در این بخش اشاره گردید، ساختارهای سلولی در راستای تغییر شکل زیادی که در میکرو ساختارهای آنها می‌یابد، منجر به توان اتلاف انرژی بالایی می‌شود. توماس تانکوگن و همکاران به این نتیجه رسیدند که ساختار سلولی **ظرفیت جذب انرژی ویژه را تا 30 درصد نسبت به ماده سازنده پایه افزایش می‌دهد** که این افزایش به صورت چشمگیری از ساختار لانه زنبوری با دیواره نازک معمولی بیشتر است.

همچنین نتایج تحقیقات صورت گرفته در راستای جذب انرژی بر روی ساختارهای سلولی نشان از بالا بودن ظرفیت جذب انرژی ویژه توام با پایین بودن نیروی فله اولیه می‌دهد که یک حالت ایده‌آل برای جاذبها محسوب می‌شود. رانو مینس و همکاران از کیفیت بالا و حساسیت کمتر ساختارهای لوزی شکل دوازده وجهی نسبت به هسته لانه زنبوری در برابر بارگذاری اطلاع می‌دهند.

ژوهال اوزدمیر و همکاران بیان کردند که ساختار لوزی دوازده وجهی بیشترین جذب انرژی را نسبت به سایر ساختارها از خود نشان می‌دهد. لیجون ژیاو و همکاران نیز موفقیت این نوع ساختار در جذب انرژی را تایید کردند.

>>> بیشتر بدانید: [خط تولید بطری پلاستیکی](#) با پرینتر سه بعدی

## فرآیند ساخت صفحات مشبک توسط پرینتر سه بعدی و معرفی نمونه‌ها

ساخت صفحات مشبک به روش‌های مختلفی، از جمله روش ریخته‌گری و استفاده از پرینترهای سه بعدی با مواد پلیمری وجود دارند. در این تحقیق **با روش پرینتر سه بعدی** برای ساخت هسته مشبک سلولی با ورق‌های بالا و پایین مورد استفاده قرار گرفت نمونه سه بعدی پانل و سلول هسته در شکل 1 نشان داده شده است.

پرینت پانل‌های ساندویچی با **پرینترهای سه بعدی FDM** انجام گردید، لازم به ذکر است اندازه نازل مورد استفاده طبق استاندارد 0.4 میلیمتر بوده و دقت لایه گذاری 40 میکرون تعیین شده است. از مزیت‌های این روش تولید در مرحله‌ی اول می‌توان به دقت ساخت آن اشاره کرد. برای ساخت تمامی نمونه‌ها، از مواد پلیمری PLA استفاده شده است.

به منظور بررسی خواص مکانیکی ورقه‌ها، با استفاده از استاندارد E08M ASTM-04 پنج نمونه استاندارد، تحت آزمایش کشش در آزمایشگاه متالورژی رازی قرار داده شده و نتایج در جدول 1 آورده شده است. همچنین در شکل 2 نمودار تنش برحسب کرنش حقیقی که از نتایج آزمایش کشش ورق‌های پلیمری PLA به دست آمده، رسم شده است. زاویه پرینت تمامی نمونه‌ها 45 درجه می‌باشد.

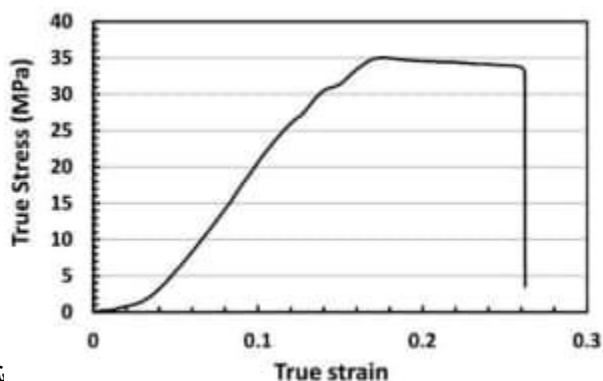
## آزمون محوری شبه استاتیکی

برای انجام آزمایش‌های محوری شبه استاتیکی از دستگاه آزمایش کشش و فشار STM SANTM 400 با ظرفیت 40 تن، دانشکده مواد و متالورژی دانشگاه سمنان استفاده شده است. نمایی از این دستگاه در شکل 3 آمده است. دستگاه آزمایش کشش و فشار از دو فک تشکیل شده است، فک پایینی آن ثابت و فک بالایی آن متحرک می‌باشد. سرعت بارگذاری در آزمون

شبه‌استاتیکی برابر 10 میلیمتر در دقیقه است. در حین فرآیند جابه‌جایی مقدار نیروی وارده به نمونه توسط کامپیوتر ترسیم شده و نمودار نیرو جابه‌جایی را رسم می‌کند.



شکل 1 پانلهای مشبک ساخته شده به روش پرینت سه بعدی



شکل 2 نمودار تنش-کرنش حقیقی

$\sigma_y (MPa)$	$\sigma_u (MPa)$	Elongation at break (%)	$E (GPa)$	$\nu$
32.04	35.04	26	2.4	0.37

جدول 1 خواص مکانیکی پلیمری PLA

## طراحی تست

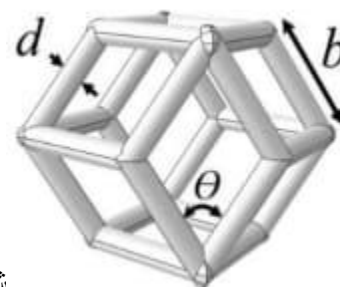
در این مقاله، برای دستیابی به یک رابطه کمی بین خواص جذب انرژی و عوامل ورودی از طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ استفاده می‌شود. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی برای شبیه‌سازی و تحلیل مسائلی است که متغیر پاسخ از چندین متغیر در ورودی تأثیر می‌پذیرد و پاسخ به صورت یک رویه یکپارچه ارائه می‌گردد.

با توجه به اهداف تحقیق، عامل‌های طراحی و دامنه تغییرات آن‌ها، مطابق جدول 2 لحاظ می‌گردد. این عامل‌ها شامل زاویه لوزی سلول هسته، ضخامت یا قطر لینک‌های سلول‌ها و تعداد لایه در هسته می‌باشند که در شکل 4 نشان داده شده است. به علت محدودیت در ساخت نمونه‌ها توسط پرینتر سه بعدی حداقل زاویه بین لینک‌ها برابر 60 درجه و حداقل قطر لینک‌ها 2 میلیمتر تعیین می‌گردد. با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش Design Experts، تعداد حالت‌های آزمایش با سه نقطه مرکزی برای بررسی رفتار ساندویچ پانلی در فصل چهارم مطرح می‌گردد.

عامل‌ها	واحد	حد پایین	حد بالا
قطر یا ضخامت هرلینک سلول	mm	۲	۴
زاویه لوزی سلول‌ها در هسته	degree	۶۰	۱۲۰
تعداد لایه هسته	No.	۱	۵

جدول 2

عاملهای طراحی و بازه تغییرات آنها



شکل 4 تعریف پارامترهای هندسی یک سلول هسته مشبک

## نتایج بحث

کلیه نتایج شامل بازده نیروی فروریزش، میزان جذب انرژی، انرژی جذب شده ویژه، نیروی بیشینه و متوسط، و همچنین درصد اختلاف نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی و عددی در جدول 3 مشخص شده است.

همانطور که از این شکل‌های 5 و 6 مشخص است در ابتدا سطح نمودار نیرو - جابه‌جایی به صورت خطی افزایش می‌یابد و تا مقدار اوج اول که با شروع فروریزش سلول‌ها در لایه اول به اتمام می‌رسد ادامه می‌یابد؛ سپس مشاهده می‌گردد که با شروع فروریزش سطح نمودار شروع به کاهش می‌کند. این رفتار مجدداً با رسیدن به سلول‌های لایه بعدی تکرار می‌گردد و نیرو تا قله دوم دنبال می‌شود.

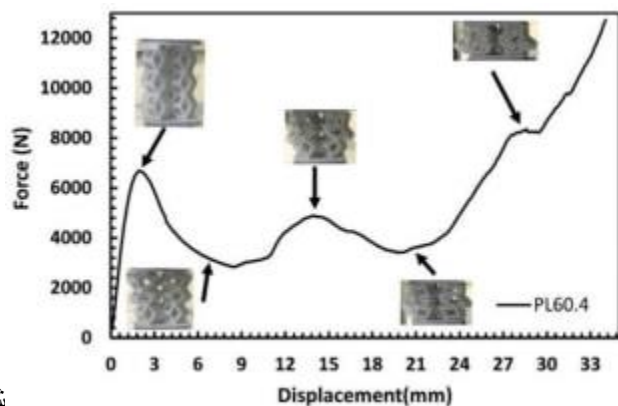
پس از فروپاشی کامل سلول‌ها در هسته، بار مانند رفتار فشرده سازی یک جسم جامد نیرو را ثابت می‌کند که پیوسته در حال افزایش است. نوسانات سطح نمودار نیرو - جابه‌جایی را میتوان برای تمامی پیکربندی‌های هسته در پانل‌های ساندویچی به طور مشابه توجیه کرد. از این شکل‌ها مشخص است که اولین قله برای همه تنظیمات در جابه‌جایی بین 2 تا 3 میلی‌متر اتفاق می‌افتد.

همانطور که در این نمودار نشان داده شده است، در بیشتر نمونه‌ها دومین قله نیروی کمتر از اولین نیروی بیشینه است، به این معنی که ممکن است برخی از سلول‌های باقیمانده هسته پس از خرابی سلول‌های لایه اول در هسته از کار افتاده باشند و کارایی ابتدایی خود را ندارند.

### فروریزش ساندویچ پانل ها با هسته ضعیفتر

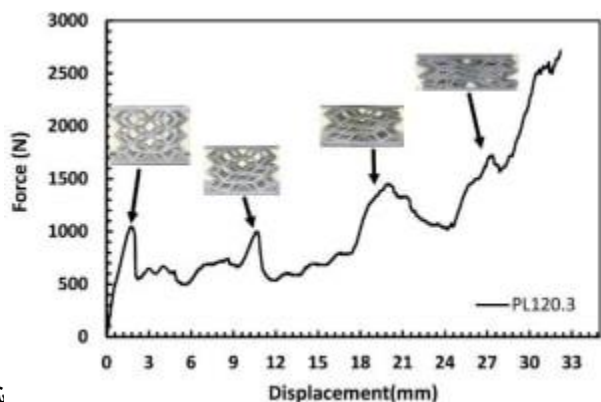
فروریزش ساندویچ پانل با هسته ضعیفتر به قطر لینک‌های 2 میلیمتر و زاویه بین لینک‌های 120 درجه (5، 2، 120) با نیروی نسبتاً کم، N250 شروع شد و خم شدن لینک‌ها در مراحل ابتدایی فروریزش در طی آزمون دیده نشد و سلول‌های هسته در جهت زاویه 45 درجه در هسته فروریزش را تجربه کرد.

مطابق شکل 5 در طی آزمایش بر روی نمونه 3، 4، 60 مشاهده شد که شروع فروریزش هسته به دلیل قطر بیشتر لینک‌های هسته و در جهات پایین‌تر بین لینک‌های هسته، در نیروی بسیار بالاتری از N 6600 رخ داده است. در این نوع هسته‌ها، پس از خرد شدن یک سلول از هسته شبکه، فشردگی هسته و خم شدن لینک‌های سلول‌ها در هسته بهم پیوند خورده است و در واقع تمامی هسته با هم شروع به فروریزش می‌کنند.



شکل 5 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 60.4.3 و چگونگی

فروریزش



شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 120.3.3 و چگونگی

فروریزش

جدول 3 نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی و عددی پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی

نمونه	Wm(gr)	SEA(J/gr)	CFE	Ea-total(J)	Pmean(N)	PPeak(N)
60.2.1	18.7	0.56	72.93	...	919	1260
60.2.3	24.57	0.97	110.52	24.028	628	569
60.2.5	32.8	1.78	109.03	...	883	810

60.3.1	22	1.24	70.5	27.4	2303	3267
60.3.3	34.07	2.23	86.21	75.976	2173	2521
60.3.5	48	1.57	67.04	75.59972	1532	2286
60.4.1	36.4	3.63	126.14	...	11353	9000
60.4.3	54	3.37	78.23	182.06	5220	6672
60.4.5	86.2	5.37	121.66	...	9255	7607
90.2.3	33.71	0.5	78.75	16.922	425	540
90.3.1	29	0.62	64.01	...	1664	2600
90.3.3	46.06	1.13	97.88	52.00621	1526	1560
90.3.3	46.06	1.07	93.3	49.64296	1427	1530
90.3.3	46.06	1.03	87.93	47.72373	1518	1727
90.3.5	62	0.66	65.81	...	968	1472
90.4.3	69	1.65	80.4	113.8611	3927	4885
120.2.1	49.7	0.08	63.37	...	369	582
120.2.5	71.5	0.19	109.32	...	273	250
120.3.1	48	0.19	49.99	9.419923	936	1874
120.3.3	73.73	0.465	104.2	34.320136	1091	1047
120.3.5	95	0.29	71.51	28.39692	667	933
120.4.1	71	0.32	91.25	...	3582	3926
120.4.3	101	0.42	75.65	43.015	1669	2207
120.4.5	168	0.47	81.06	...	2501	3085

در شکل 7 و 8 تأثیر همزمان پارامترها بر پاسخ را به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. در این شکل‌ها می‌توان گفت در زاویه‌های پایین‌تر (60 درجه) حساسیت نیروی بیشینه و جذب انرژی بیشینه به تغییرات اندازه قطر لینک‌ها بیشتر است. از طرفی افزایش قطر لینک‌ها و افزایش جذب انرژی رابطه خطی وجود دارد و می‌توان نتیجه گرفت که عامل تعداد لایه‌ها تا جایی که وزن سازه محدودیت ایجاد نکند، باعث بهبود جذب انرژی می‌گردد.

افزایش قطر لینک‌ها همانطور که گفته شد باعث افزایش نیروی بیشینه و جذب انرژی ویژه می‌شود ولی در نیروی بیشینه به صورت غیرخطی و با بزرگای بیشتری اتفاق افتاده است.

>>بیشتر بدانید: [ساخت اسباب بازی با پرینتر سه بعدی برای کودکان](#)

## بهینه‌سازی خواص جذب انرژی در ساندویچ پانل

در بخش پیشین مشخص شد که زاویه بین لینک‌ها و قطر لینک‌ها، هیچ برهم‌کنشی با تعداد لایه‌ها ندارند. از طرفی پارامتر تعداد لایه‌ها یک رابطه غیرخطی و قابل پیش‌بینی با پاسخ‌های، جذب انرژی ویژه و نیروی بیشینه دارد و همچنین این پارامتر بر روی جذب انرژی ویژه و نیروی بیشینه اولیه نسبت به پارامترهای قطر و زاویه بین لینک‌ها تأثیر به مراتب کمتری داشته است.

با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز واریانس و بهینه‌سازی صورت گرفته بر روی این سه پارامتر، (تعداد لایه‌ها، قطر لینک‌ها و اندازه زاویه بین لینک‌ها) مقادیر بهینه ارائه شده است. بعد از مطالعه اثر پارامترهای طراحی روی ظرفیت جذب انرژی ویژه و نیروی بیشینه، مقدار بهینه‌ی پارامترها که اهداف طراحی را برای ما برقرار می‌سازد تعیین می‌گردد.

مقادیر بهینه زاویه لوزی، قطر هر لینک سلول هسته مشبک و تعداد الیه هسته مشبک در ساندویچ پانلی که تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی مورد آزمون و بررسی قرار گرفت در جدول 4 نشان داده شده است. مقادیر بیشینه برای جذب انرژی ویژه برابر  $J/gr$  87839/3 و مقدار کمینه برای نیروی بیشینه برابر  $N$ 9/3458 بدست آمده است. نمودار نیرو- جابه‌جایی برای حالت بهینه در شکل 9 نشان داده شده است.

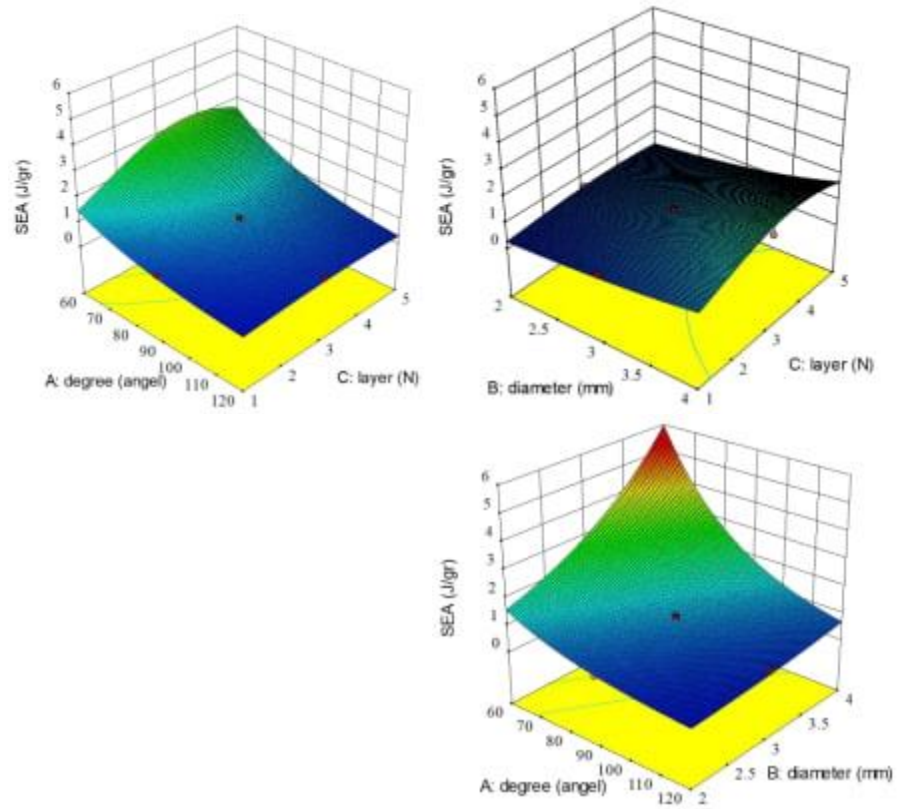
همچنین جایگاه مقادیر بهینه برای پارامترهای طراحی و پاسخ‌ها در محدوده کلی و حد بالایی و پایینی این مقادیر در شکل 10 نشان داده شده است. از آنجا که بهینه‌سازی انجام شده به صورت چند هدفه به صورت معادله زیر و در راستای افزایش جذب انرژی ویژه و کاهش نیروی بیشینه به صورت هم‌زمان می‌باشد درصد قابلیت اطمینان رسیدن به جواب بهینه برابر 67.4 درصد است.

$$\begin{aligned}
 &max: \quad SEA \text{ (kg J)} \\
 &min: \quad P \\
 &\quad \quad peak(N) \\
 &\quad \quad 1 \leq N(\text{core} \\
 &\quad \quad \text{layers number}) \\
 &\quad \quad \leq 5 \\
 &\quad \quad 60 \leq \varphi(\text{Angle} \\
 &subject\ to: \text{ between struts}) \\
 &\quad \quad \leq 120 \\
 &\quad \quad 2mm \leq d(\text{struts} \\
 &\quad \quad \text{diameter}) \leq \\
 &\quad \quad 4mm
 \end{aligned}$$

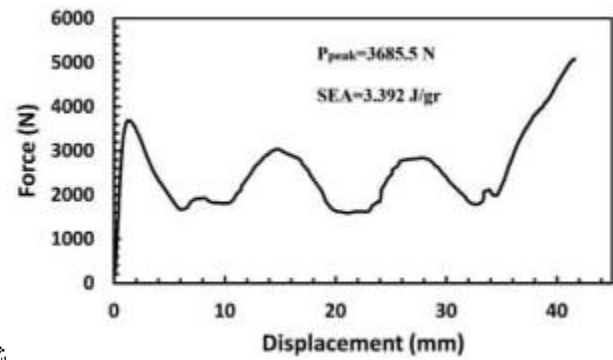
جدول 4 مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و پاسخ‌ها

Link angle (degree)	Link diameter (mm)	Layer number	Ppeak (N)	SEA (J/gr)
60	3/30257	4	3458/9	3/87839



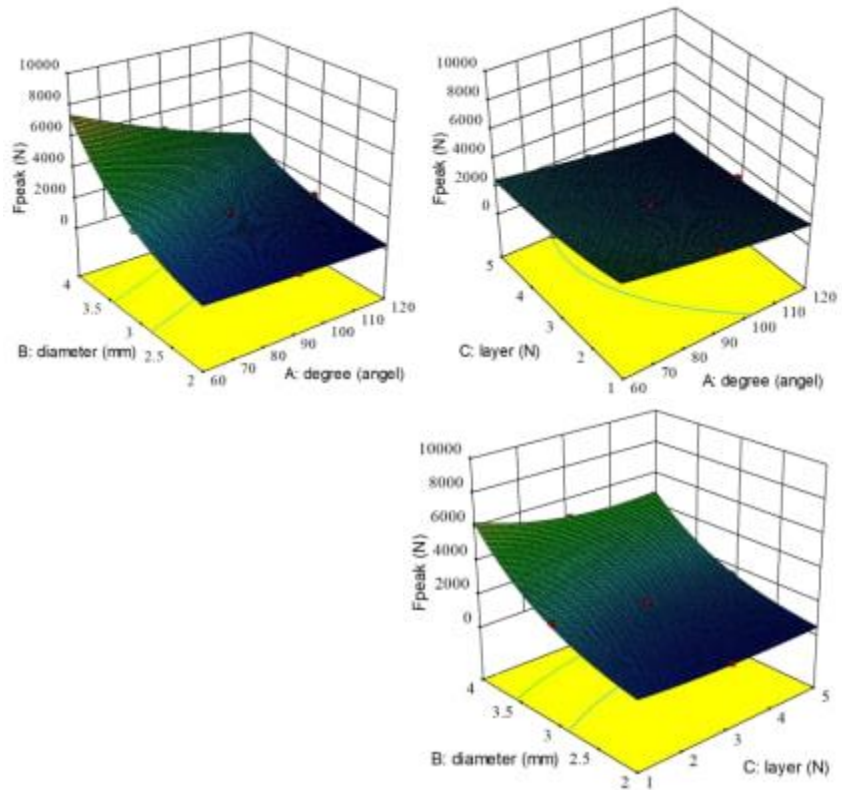


شکل 7 تاثیر زاویه لوزی و قطر هر لینک سلول و تعداد لایه هسته مشبک بر ظرفیت جذب انرژی ویژه

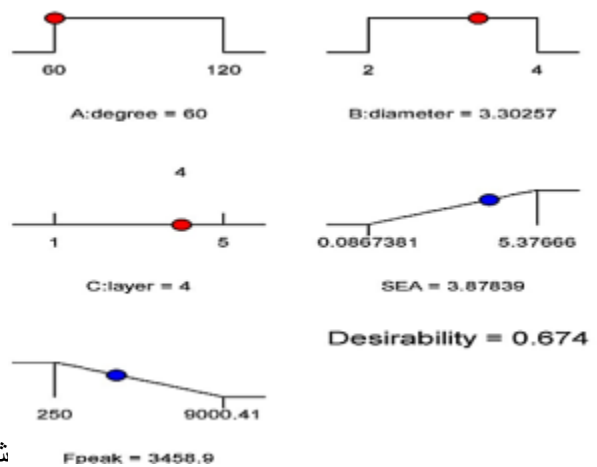


شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه بهینه حاصل از

آزمون تجربی شبه استاتیکی



شکل 8 تاثیر زاویه لوزی و قطر هر لینک سلول و تعداد لایه هسته مشبک بر نیروی بیشینه



شکل 10 مقادیر بهینه برای پارامترها و پاسخهای طراحی

ساندویچ پانلی با هسته مشبک تحت بارگذاری محوری

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نهایی

با مطالعه تجربی بر روی سازه‌های ساندویچ پانلی با هسته مشبک سه بعدی تحت بارگذاری محوری به عنوان سیستم‌های جاذب انرژی، نتایج ذیل بدست آمده است:

- با توجه به نتایج جذب انرژی دیده شد که کاهش زاویه بین لینک‌های سلول تا 6 برابر میزان جذب انرژی را افزایش می‌دهد.
- نظر به استفاده از روش طراحی آزمایش (DOE) در آزمون تجربی، نشان داد این تکنیک باعث کاهش هزینه‌ها و تعداد تکرار آزمایشات گردیده و نتایج قابل قبولی جهت اثر پارامترهای هندسی و اندازه بهینه آن‌ها بر میزان جذب انرژی ساندویچ پانل‌ها با هسته مشبک، ارائه داده است.
- با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی دیده شد که افزایش تعداد لایه‌های هسته تا 5 لایه میزان نیروی بیشینه اولیه را تا 50 درصد کاهش می‌دهد.
- مکانیزم رفتار فروریزش این سازه‌های ساندویچ پانل یا هسته مشبک بدلیل هندسه‌سازه، متقارن همگن می‌باشند.
- افزایش تعداد لایه‌های هسته تا دو مرحله اول باعث افزایش SEA (جذب انرژی ویژه) می‌شود اما در مرحله سوم بدلیل افزایش وزن، جذب انرژی ویژه کاهش پیدا می‌کرد.
- پس از بررسی اثر پارامترهای هندسه سلول هسته مشبک و اثر تعداد لایه‌های مربوطه و بهینه‌سازی پارامترها دیده شد که در نمونه بهینه میزان جذب انرژی ویژه سازه تا 44 برابر نسبت به کمترین حالت افزایش پیدا کرد.

ارائه شده در بیست و نهمین همایش بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران و هشتمین همایش صنعت نیروگاه‌های حرارتی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، 4 تا 6 خرداد 1400 <https://iconference.isme.ir>

حسین تقی پور : استادیار، دانشگاه ولایت ایرانشهر، h.taghipoor@velayat.ac.ir

محمد تفضل :مدیر بخش تولید، شرکت هینا انرژی، تهران، tafa

**Keywords:** *3d printing, 3d printed sandwich panels, sandwich panels, 3d sandwich panel optimization, 3d printer*

## Bibliography

- Wei, V. S. Deshpande, A. G. Evans, and K. P. Dharmasena, "The resistance of metallic plates to localized impulse," vol. 56, pp. 2074–2091, 2008, doi: 10.1016/j.jmps.2007.10.010.
- S. Deshpande and N. A. Fleck, "Energy absorption of an egg-box material," J. Mech. Phys. Solids, vol. 51, no. 1, pp. 187–208, 2003, doi: 10.1016/S0022-5096(02)00052-2.
- J. Gibson, "Cellular Solids," MRS Bull., vol. 28, no. 04, pp. 270–274, 2003, doi: 10.1557/mrs2003.79.
- Lindström, "In-plane Compressive Response of Sandwich Panels," 2009.
- McKown et al., "The quasi-static and blast loading response of lattice structures," Int. J. Impact Eng., vol. 35, no. 8, pp. 795–810, 2008, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2007.10.005.

- A. W. Mines, S. Tsopanos, Y. Shen, R. Hasan, and S. T. Mckown, “International Journal of Impact Engineering Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 60, pp. 120-132, 2013, doi:10.1016/j.ijimpeng.2013.04.007.
- Lijun, W. D. X. X, D. X. X. Fan, and D. X. Jianzhong, “International Journal of Impact Engineering Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron titanium alloy lattice structure manufactured using electron beam melting under dynamic loading,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 100, pp. 75–89, 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.10.006.
- Xiao, W. Song, C. Wang, H. Liu, and H. Tang, “Materials Science & Engineering A lattice structure,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 640, pp. 375–384, 2015, doi: 10.1016/j.msea.2015.06.018.
- W. Abueidda, R. K. A. Al-rub, A. S. Dalaq,
- Lee, K. A. Khan, and I. Jasiuk, “Mechanics of Materials Effective conductivities and elastic moduli of novel foams with triply periodic minimal surfaces,” *Mech. Mater.*, vol. 95, pp. 102\_115, 2016, doi:10.1016/j.mechmat.2016.01.004
- Tancogne-Dejean, A. B. Spierings, and D. Mohr, “Additively-manufactured metallic micro- lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading,” *Acta Mater.*, vol. 116, pp. 14–28, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.05.054.
- Ozdemir et al., “International Journal of Impact Engineering Energy absorption in lattice structures in dynamics : Experiments,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 89, pp. 49–61, 2016, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2015.10.007.
- Najibi, M. H. Shojaeefard, and M. Yeganeh, “Developing and multi-objective optimization of a combined energy absorber structure using polynomial neural networks and evolutionary algorithms,” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 13, no. 14, pp. 2252–2272, 2016, doi: 10.1590/1679-78252797.
- Tarlochan, F. Samer, A. M. S. Hamouda, S. Ramesh, and K. Khalid, “Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 71, pp. 7–17, 2013, doi: 10.1016/j.tws.2013.04.003.
- Sun, T. Pang, C. Xu, G. Zheng, and J. Song, “Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 118, no. April, pp. 214–228, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.04.004.
- Ahmad and D. P. Thambiratnam, “Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading,” *Comput. Struct.*, vol. 87, no. 3–4, pp. 186\_197, Feb. 2009, doi:10.1016/j.compstruc.2008.10.003.