



## بررسی عددی و تجربی خواص فشاری هسته‌های شانته تخم مرغی مورد استفاده در سازه‌های ساندویچی زیست تخریب پذیر

رضا بیگ پور<sup>۱</sup>، حسن شکراللهی<sup>۲\*</sup>، سید محمدرضا خلیلی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

### کلمات کلیدی:

سازه ساندویچی  
زیست تخریب پذیر  
فشار، روش تجربی  
هسته شانته تخم مرغی

**خلاصه:** در این پژوهش رفتار فشاری هسته‌های شانته تخم مرغ مقوایی که به عنوان لایه میانی در ساخت سازه ساندویچی متشکل از لایه‌های بیرونی کامپوزیتی از جنس ماده ترکیبی پلی لاکتیک اسید/کنف-کتان استفاده می‌گردد، به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. باتوجه به سازگاری این هسته‌ها با محیط زیست (زیست تخریب پذیر بودن آن‌ها)، استفاده از این نوع هسته‌ها سبب کاهش استفاده از مواد شیمیایی برای ساخت سازه‌های ساندویچی می‌شود. باتوجه به خصوصیت‌هایی همچون استحکام، خواص مکانیکی و عایق بندی آکوستیک بسیار مناسب، شانته‌های تخم مرغ به عنوان لایه میانی سازه‌های ساندویچی زیست تخریب پذیر انتخاب شده‌است. این سازه نسبت به فشار بسیار مقاوم بوده و انرژی زیادی را برای فشرده‌سازی هسته به خود جذب کرده است. مکانیزم خرابی در این لایه میانی، خرد شدن یا له شدن لبه‌های بیرونی و خانه‌های مورد تماس با لبه‌های بیرونی می‌باشد. افزایش ضخامت شانته‌های تخم مرغ، تأثیر مستقیمی بر خواص فشرده‌سازی سازه داشته و با دو برابر کردن ضخامت لایه‌ها، مقدار انرژی جذب شده توسط هسته سازه بیش از ۱۰۰٪ افزایش یافته است. در بین انواع چیدمان لایه میانی، هسته از نوع شانته‌های تخم مرغ سری (دو شانته تخم مرغ در هم)، نسبت به سایر هسته‌ها به صورت میانگین ۴۹٪ سفتی، ۱۰۸٪ انرژی جذب شده و ۱۲۸٪ استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهد و این نوع چیدمان نسبت به سایر هسته‌های مطرح شده، کمترین میزان آسیب را متحمل شده‌است.

### ۱- مقدمه

گسترش دانش امروزی و پیشرفت در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی و ساختمان، باعث معرفی و استفاده گسترده از سازه‌های جدیدی به نام سازه ساندویچی یا ساندویچ پنل گردیده که با ویژگی‌های خاص خود در بسیاری از کاربردهای سازه‌های سبک وزن قابل توجه شده است. ساندویچ پنل سازه‌ای است که از سه لایه شامل، یک هسته با چگالی کم که توسط دو لایه نازک هسته را احاطه کرده، تشکیل شده است. یک سازه ساندویچی معمولاً از پوسته‌هایی سفت و نسبتاً متراکم مانند فلز و یا ماده کامپوزیتی، به همراه ماده‌ای سبک وزن و نرم به نام هسته ساخته می‌شوند. این ساختار در واقع تداعی کننده تیر I شکل است که در آن صفحه‌ها در بالا و پایین هسته بارهای خمشی را تحمل می‌کنند و هسته منتقل کننده نیروی برشی بین صفحه‌ها می‌باشد [۱].

هسته سازه ساندویچی تقریباً می‌تواند از هر ماده یا شکلی برخوردار باشد، اما به طور کلی هسته‌ها در چهار نوع فوم یا هسته جامد، هسته لانه زنبوری،

هسته خرپا، هسته شبکه‌ای (بافته شده) قرار می‌گیرند. دو نوع متداول لانه زنبوری، ساختار سلولی شش ضلعی شکل (هگزگونالی) و سلول مربعی است. هسته‌های خرپا یا مثلث شکل به طور گسترده برای سازه‌های پل استفاده می‌شود. هسته‌های فومی یا جامد نسبتاً ارزان هستند و می‌توانند از چوب بالسا یا مواد فوم / پلاستیک با تنوع در تراکم و مدول‌های برشی نامتناهی که بسیاری از آن‌ها پلی وینیل کلراید هستند انتخاب شوند. در بیشتر سازه‌های ساندویچی با هسته‌های فومی و لانه زنبوری، بارهای خمشی و بار جانبی فقط توسط ورق‌های بیرونی حمل می‌شوند اما در سازه‌های هسته موج‌دار و شبکه‌ای، بخشی از این بارها توسط هسته تحمل می‌شوند [۵-۲]. دانیل<sup>۱</sup> و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۸ رفتار خمشی تیرهای ساندویچی ساخته شده از هسته‌های مختلف (فومی و لانه زنبوری) و پوسته‌های کامپوزیت الیاف کربن را تحت خمش سه نقطه و چهار نقطه مورد مطالعه قرارداد و تأثیر ابعاد هندسی، نوع بارگذاری و مواد تشکیل دهنده تیر ساندویچی را روی مکانیزم تخریب بررسی کرد. حالت‌های مختلف خرابی، وابسته به خاصیت مواد



مواد هسته، از دو نوع کامپوزیت از جنس اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه بافته تهیه نمودند. آزمون‌های فشار در نرخ شبه استاتیک بارگذاری نشان داد که مقاومت فشاری هسته به شدت به سطح محدودیت اعمال شده در طول آزمایش بستگی دارد، پنل‌های ساندویچی بر اساس پوسته‌های کامپوزیت متصل به هسته شانه تخم مرغ قابلیت تحمل بار بیش از دو برابر همتای غیر متصل خود بود. مقاومت فشاری شبه استاتیک هسته‌های الیاف کربن کمی بیشتر از سیستم‌های الیاف شیشه بود. آسیب شکاف محلی در مناطق اتصال سلول و خردشدگی سلول ساختار جعبه شانه تخم مرغ به عنوان مکانیسم اصلی شکست در این ساندویچ پنل شناخته شد. کارتی و فلک<sup>۶</sup> [۱۱] تأثیر بین تقویت کننده بر مقاومت فشاری ساندویچ پنل‌های دارای فوم را با بین‌هایی از جنس تیتانیوم و الیاف کربن به منظور افزایش استحکام ضخامت درون هسته فوم پلی متاکریل آمید یک ساندویچ پنل (با ورق‌های الیاف کربن) مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد که هسته فوم بین‌ها را در برابر کماتش الاستیک تثبیت می‌کند و هسته تقویت شده با بین دارای استحکام و قدرت جذب انرژی بیشتری را از خود نشان داد. وانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] رفتار مکانیکی ساختارهای ساندویچی با هسته خرپایی شبکه هرمی ساخته شده از مواد کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن را مورد بررسی قرار دادند و ورق‌های پوسته با هسته‌های خرپایی به هم متصل کردند. در آزمون‌های فشاری و برشی، کماتش خرپا مشاهده شد و هیچ گونه شکستی در محل گره‌های خرپا ایجاد نگردید. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که رفتار مکانیکی پنل‌های ساندویچی هسته خرپایی به تراکم نسبی هسته و خواص مواد اعضای خرپا بستگی دارد. یو<sup>۸</sup> و همکاران [۱۳] با انجام آزمایشات فشاری روی ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی شانه تخم مرغی پر شده از فوم، ارزیابی عملکرد جذب انرژی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها حالت‌های شکست هسته‌های کامپوزیتی بدون فوم، از جمله شروع و انتشار ترک، در هر دو طرف هسته شانه تخم مرغ را گزارش دادند. همچنین، نتایج آن‌ها نشان داد که ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی شانه تخم مرغی پر شده از فوم دارای قابلیت جذب انرژی خوبی با واکنش فروپاشی پایدار و جاذب انرژی ایده‌آل است.

در این پژوهش رفتار فشاری هسته‌های شانه تخم مرغی با سه نوع چیدمان متفاوت که در ساخت سازه ساندویچی زیست تخریب پذیر استفاده شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌های بیرونی این سازه

سازنده، ابعاد هندسی و نوع بارگذاری بوده است، این حالت‌ها شامل: خرابی پیوند چسب، خرابی ناشی از فرورفتگی، شکست و چین و چروک‌دار شدن پوسته و هسته می‌باشد. لیاقت و سرایلو [۷] در سال ۱۳۸۸ مقاله‌ای را برای بهینه‌سازی وزن سلول لانه زنبوری با شکل‌های شش ضلعی و چهارضلعی لانه زنبورها تحت بارگذاری محوری فشاری ارائه دادند. نتایج دو روش بهینه‌سازی تطابق بسیار خوبی باهم داشتند، در روش برنامه ریزی درجه دوم<sup>۱</sup> محدودیتی از نظر پیچیدگی شکل مقطع وجود نداشته و در تمام نواحی بارگذاری نیز مقادیر قابل قبولی را ارائه دادند. نتایج بهینه‌سازی وزن برای دو شکل متفاوت هسته لانه زنبوری، نشانگر آن است که مقطع شش ضلعی نسبت به مقطع چهارضلعی بهینه‌تر است که به ازای بارگذاری یکسان، دارای وزن کمتر و با افزایش تعداد اضلاع لانه‌ها، نسبت استحکام به وزن هسته افزایش می‌یابد. کای<sup>۲</sup> و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸، با شبیه سازی المان محدود و آنالیزهای نظری در موضوع شکل‌گیری ناحیه‌ی پلاستیک و رفتارهای شکست ساندویچ پنل‌ها با هسته‌ی شبیه به شانه تخم مرغی<sup>۳</sup> مشاهده کرد که تغییر شکل صفحات ساندویچ پنل با هسته شبه شانه تخم مرغی در عمل عمدتاً توسط سه حالت خرابی محدود می‌شود. در بین حالت‌های مختلف خرابی، کماتش ورق‌ها و شکست سلول‌های هسته در ناحیه‌ی پلاستیک، معمول‌ترین حالت‌های خرابی پنل‌های ساندویچی هستند. گالیک<sup>۴</sup> و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۸، به بررسی خواص مکانیکی شش مدل جعبه‌های شانه تخم مرغی مختلف (دو عدد از مقوا با فرم‌های مختلف، دو نمونه پلی استایرن منبسط شده، دو نوع پلی استایرن) پرداختند. جعبه‌های پر از تخم مرغ روی صفحه ثابت قرار داده شد و با صفحه‌ای متحرک تحت فشردگی قرار گرفت. در آزمایش دیگر نمونه‌ها با پروب استوانه‌ای در مرکز هر خانه، تا تماس با پوسته‌ی تخم مرغ‌ها تحت فشار قرار گرفت. این آزمایش نشان داد، بیشترین وزن و بهترین محافظت مکانیکی را جعبه‌های مقوایی داشته‌است، اما افزایش رطوبت سبب کاهش مقاومت مکانیکی این جعبه‌ها می‌شود. میانگین نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل جعبه مقوایی ۰.۸۳٪ بیشتر از نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل جعبه پلی استایرن و ۰.۲۸۹/۵٪ بیشتر برای تغییر شکل جعبه پلی استایرن منبسط بود. هالداری<sup>۵</sup> و همکاران [۱۰] هسته‌های سبک وزن، بر اساس طرح هسته جعبه شانه تخم مرغ، با استفاده از یک روش قالب‌گیری فشرده‌سازی ساده تولید کردند. برای تولید

- 1 Sequential Quadratic Programming (SQP)
- 2 Cai
- 3 Egg Box Like
- 4 Galic
- 5 Haldar

- 6 Cartié and Fleck
- 7 Wang
- 8 Yoo



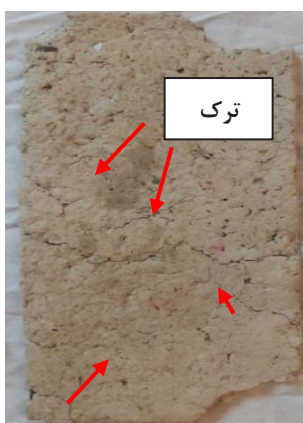
شکل ۲. صفحه مقوایی ساخته شده به روش مکانیکی

Fig. 2. Mechanically made cardboard material



شکل ۱. وجود اجزا متفرقه در مقوا

Fig. 1. Impurities in cardboard material



شکل ۳. صفحه مقوایی ساخته شده به روش دستی

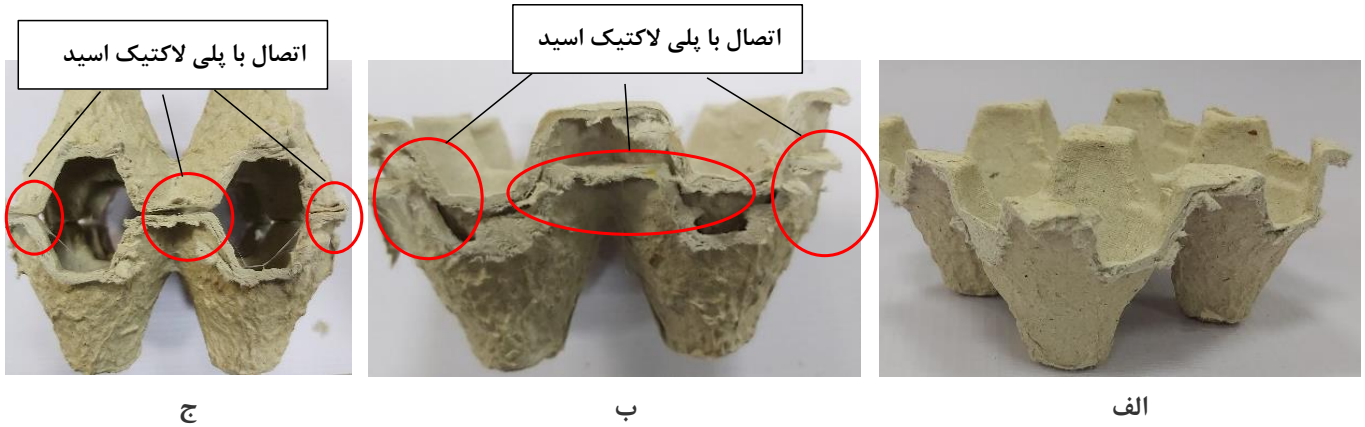
Fig. 3. Manually made cardboard material

الیاف مقوا از هم جدا شوند. سپس این نمونه در دو روش دستی و مکانیکی خرد شد و مواد زائد موجود در مقوای بازیافتی جداگردید (شکل ۱). در انتها ترکیب بدست آمده درون قالب قرارگرفت و برای خروج آب اضافی، قطعه توسط گیره فشرده شد. قالب پس از ۲ ساعت استراحت در دمای اتاق به مدت ۱۵ دقیقه، درون کوره با دمای ۱۰۰ درجه قرار گرفت و ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه خشک گردید (شکل ۲ و شکل ۳). در روش دستی، مخلوط شدگی الیاف به خوبی انجام نگیرد و پس از خشک شدن ترک‌های سطحی زیادی در نمونه ظاهرشد، روش مکانیکی نتیجه بهتری را نسبت به حالت دستی از خود نشان داد و چهار نمونه کششی به نام‌های  $Ca_1$ ،  $Ca_2$ ،  $Ca_3$  و  $Ca_4$  از صفحه‌ی مقوایی تهیه شد.

ساندویچی، از جنس ماده ترکیبی پلی لاکتیک اسید/کنف-کتان [۱۴] و لایه میانی (هسته) آن شانه تخم مرغ است. ویژگی مهم این سازه، سازگاری تمام اجزای تشکیل دهنده آن با محیط زیست (زیست تخریب پذیر بودن آن) است. خواص این سازه توسط تست‌های شبه استاتیکی فشاری تجربی با استفاده دستگاه تست کشش به همراه فک فشاری و شبیه‌سازی عددی به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس<sup>۱</sup> برای بررسی تأثیر پارامتر نوع چیدمان و ضخامت هسته مورد مطالعه قرار گرفت و صحت سنجی این تحلیل توسط نتایج تجربی بررسی شد.

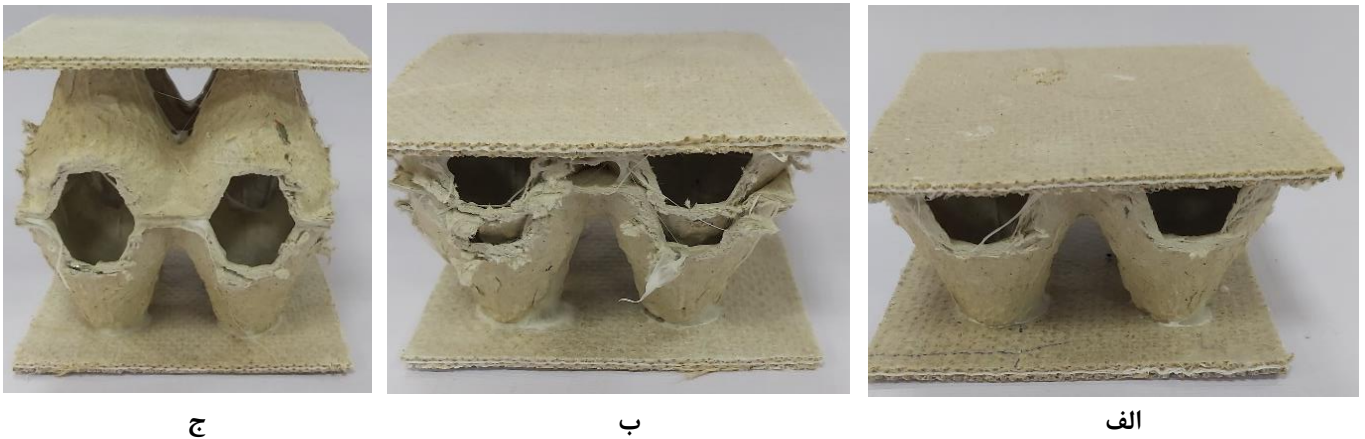
## ۲- ساخت نمونه‌ی کشش از جنس مقوا شانه تخم مرغ

برای بررسی خواص هسته شانه تخم مرغی، در ابتدا آزمایش کشش بر روی آن انجام گردید. باتوجه به جنس و هندسه این هسته، به دلیل وجود تمرکز تنش‌های متعدد در آن و ایجاد فشردگی مقوا در فک‌های دستگاه کشش، امکان آزمایش و محاسبه نتایج دقیق از نمونه دست نخورده شانه تخم مرغ وجود نداشت. در نتیجه، طی فرآیندی مشابه فرآیند واقعی ساخت شانه تخم مرغ، نمونه‌های کششی از همان جنس ساخته شد. برای کم کردن تفاوت نسبت به شانه تخم مرغ واقعی، اطلاعات و پارامترهای ساخت (دما، فشار و زمان) به طور دقیق از کارخانه سازنده شانه تخم مرغ (کارخانه شاهون واقع در محمد دشت استان کرج)، گردآوری شد و فرآیند ساخت نمونه کششی مقوایی تا حد امکان به طور مشابه انجام شد. ابتدا برای ساخت این قطعه، شانه تخم مرغ‌ها به مدت ۳۰ دقیقه درون آب گرم قرارگرفت تا



شکل ۴: انواع هسته مورد مطالعه، الف) تکی، ب) سری، ج) موازی

Fig. 4. Core specimens; a) single, b) two boxes inside each other, c) two boxes over each other



شکل ۵: انواع ساندویچ پنل؛ الف) هسته تکی، ب) هسته سری، ج) هسته موازی

Fig. 5. Sandwich panel specimens; a) the single core, b) the two boxes inside each other core, c) the two boxes over each other core

### ۳- نمونه هسته‌های شانه تخم مرغی

هسته این سازه از شانه‌های مقوا، کاغذ و مشتقات بازیافتی چوب با چگالی ۰/۴۲۳۳ کیلوگرم بر متر مکعب ساخته شده است. نمونه مقوایی این شانه‌ها دارای ظرفیت ۲۰ عددی جای تخم مرغ می‌باشد که برای کاهش میزان خرابی این سازه با توجه به ماهیت حساس آن نسبت به رطوبت و فشار، به صورت بسته بندی شده از کارخانه به صورت مستقیم تهیه گردید. برای صرفه‌جویی در ساخت کامپوزیت و نیز کاهش حجم محاسباتی در تحلیل عددی، نمونه‌های ۲۰ تایی هسته به نمونه کوچک‌تر ۱۰ تایی (۵×۲)

برش خورد. نمونه‌های هسته (شکل ۴) در سه حالت اتصال توسط رزین به هم چسبانده شدند. این چیدمان‌ها شامل: تکی، سری و موازی می‌باشند. فرآیند اتصال ساخت توسط سرنگ و رزین پلی لاکتیک اسید<sup>۱</sup> صورت گرفت و با بارگذاری ضعیف در مدت ۳ ساعت در دمای اتاق ۲۸ درجه سانتیگراد خشک شدند. چیدمان‌های نهایی این سازه ساندویچی که متشکل از لایه‌های بیرونی کامپوزیتی از جنس ماده ترکیبی پلی لاکتیک اسید/کنف-کتان [۱۴] و لایه میانی (هسته) شانه تخم مرغی است، در شکل ۵ نشان داده شده است.

1 Polylactic Acid (PLA)



کشش مواد و فشار هسته مقوایی در نرم افزار تحلیلی آباکوس با تعریف خواص و ویژگی‌های مواد تشکیل دهنده آن انجام شد. شبیه‌سازی تست کشش نمونه مقوایی، با تعریف دو گره مرجع برای اعمال شرایط بارگذاری بر روی نمونه، انجام شده است. در تست فشار با توجه به تماس بین رویه و هسته و صفحه بارگذاری، شرایط تماس بین این قطعات به صورت عمومی با ضریب اصطکاک ۰/۱۵ در نظر گرفته شد [۱۵] و در حالت‌های شامل دو هسته، قسمت‌های تماسی هسته به صورت مقید ایجاد گردید. شرایط بارگذاری نمونه‌های کششی در یک سر در تمامی جهات مقید و بسته و در سمت دیگر به میزان ۰/۱ میلی‌متر برای تحلیل ناحیه الاستیک تحت کشش قرار می‌گیرد. نمونه‌های تحت بار فشاری در شرایط مرزی همانند آزمون تجربی محدود گردید و صفحه بارگذاری با توجه به محدوده الاستیک هر سازه به صورت جابجایی تعریف گردیده است. به طور کلی، شبیه‌سازی با استفاده از شبکه بندی‌های متعددی انجام شد و با توجه به حجم پایین محاسبات در نتایج تحلیل اختلاف زیادی دیده نشد و تمامی نتایج عددی به محاسبات بدست آمده از تحلیل تجربی همگرا گردید. المان بندی مقوا تحت کشش دارای ۶۸۱۲ گره و ۶۵۰۰ المان چهاروجهی C3D10، و هسته‌های شانه تخم مرغی تحت بار فشاری دارای ۲۷۴۳۰ گره و ۱۳۶۲۹۸ المان چهاروجهی C3D10 بود [۱۶] (شکل ۷). بررسی نتایج همگرایی تحلیل‌های عددی و تجربی این پژوهش (شکل ۸)، نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف بین نتایج المان محدود و مقادیر تجربی، حدود ۱۳٪ است. علت این اختلاف را می‌توان به فرض‌های ساده‌سازی هندسی (صرف نظر کردن از بعضی انحنای سطوح) و تقریب در ابعاد نمونه، مربوط دانست.

## ۶- نتایج

### ۶-۱- تایید آزمون کشش

در آزمون کشش میکرو ترک‌هایی بر روی سطح نمونه‌های مقوایی با توجه به حالت‌های مختلف ساخت و خشک‌سازی مشاهده شد. در آزمون کشش نمونه Ca<sub>۹</sub> (شکل ۹)، نمونه در ناحیه فک مورد شکست قرار گرفت، اما دیگر نمونه‌ها در ناحیه میانی با انتشار و رشد ترک با میزان نیرو ۲۸/۰ نیوتن و میزان جابجایی ۱/۶۶۵ تخریب شدند (شکل ۱۰). ناحیه تخریب شده نمونه‌های مقوایی تحت کشش (بزرگ نمایی ۲۰ برابر) و خواص مکانیکی نمونه مقوایی به ترتیب در شکل ۱۱ و جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۶. اتصال نمونه مقوا کارتنی در فک کشش

Fig. 6. Tensile test of cardboard

## ۴- آزمایشات

### ۴-۱- کشش نمونه مقوایی

دو نمونه مقوایی با استاندارد ASTM D3029 به ابعاد ۲۵×۱۲۵ میلی‌متر با نرخ کشش ۲ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه HOUNSFIELD H25KS تحت کشش قرار گرفت. اکستنسومتر تا میزان جابجایی ۰/۱ میلی‌متر به قطعه متصل گردید و سپس در محدوده بالاتر بارگذاری از نمونه منفک گردید (شکل ۶).

### ۴-۲- فشرده‌سازی شانه‌های تخم مرغ

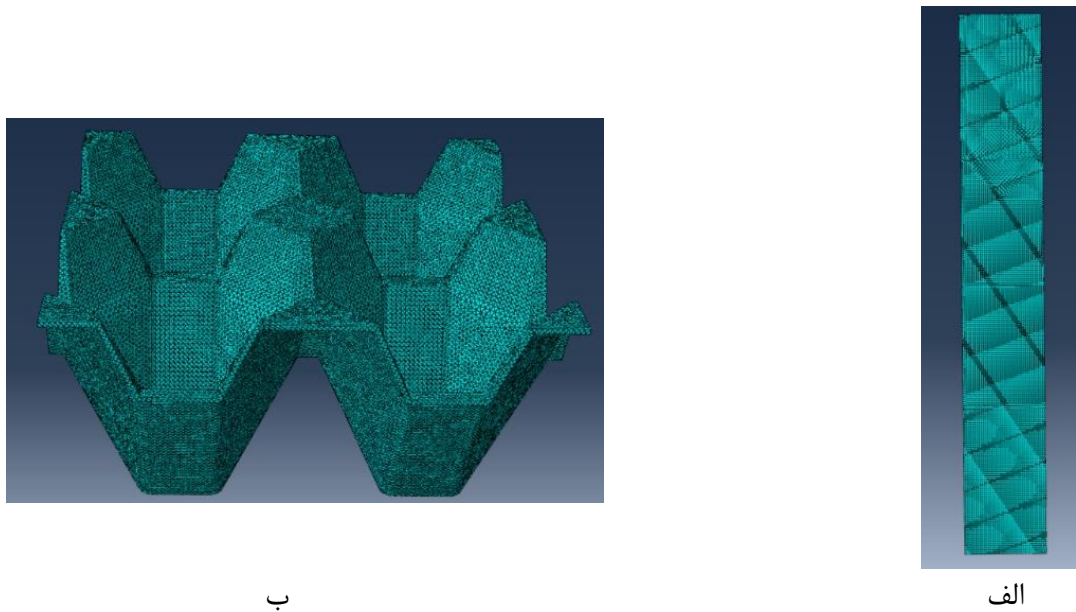
نمونه‌های مقوایی موجود در سه حالت در اندازه‌های ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متری با ۴ عدد جای تخم مرغ (۲×۲) تهیه گردید. ضخامت هسته‌ها به ترتیب برای نوع تکی، سری و موازی برابر با ۵۰، ۵۵ و ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد و تمامی نمونه‌ها با قرارگیری درون فک دستگاه با نرخ بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه HOUNSFIELD H25KS تحت فشار شبه استاتیکی با استاندارد ASTM C364 مورد آزمایش قرار گرفتند.

## ۵- شبیه‌سازی عددی

با توجه به هندسه پیچیده شانه تخم مرغ، برای ایجاد مدل هندسی، از بخش مدل‌سازی سطوح<sup>۱</sup> در نرم افزار کتیا<sup>۲</sup> استفاده شد. تحلیل و آنالیز آزمون

1 Generative shape design

2 CATIA

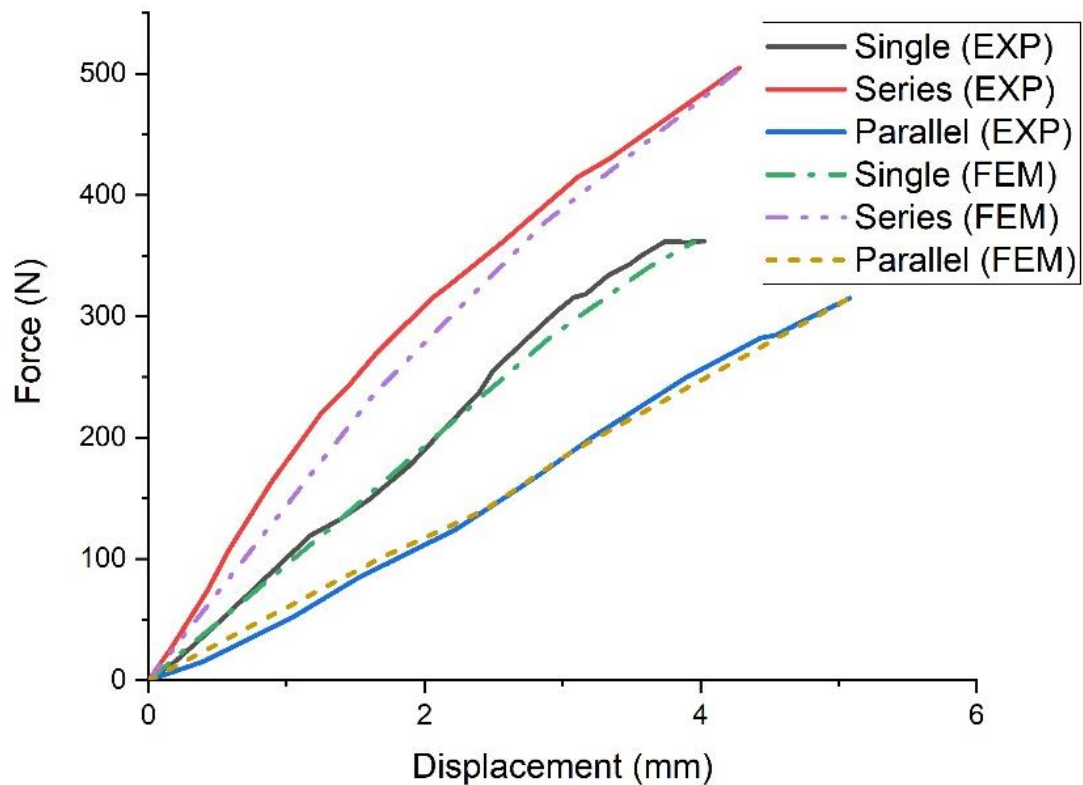


ب

الف

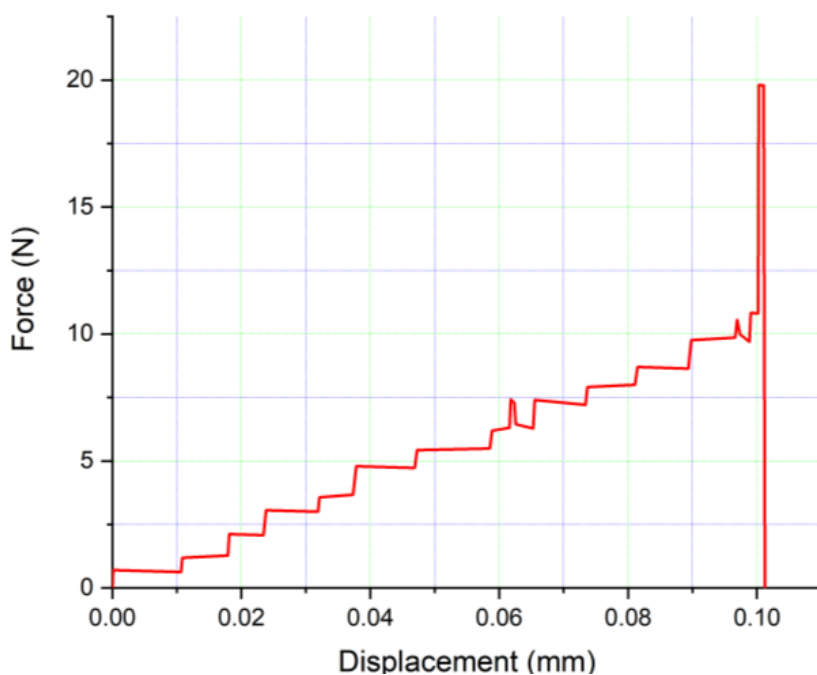
شکل ۷. شبکه بندی، الف) نمونه کشش ب) نمونه هسته

Fig. 7. Mesh visualization of FEM model for a) cardboard and b) core



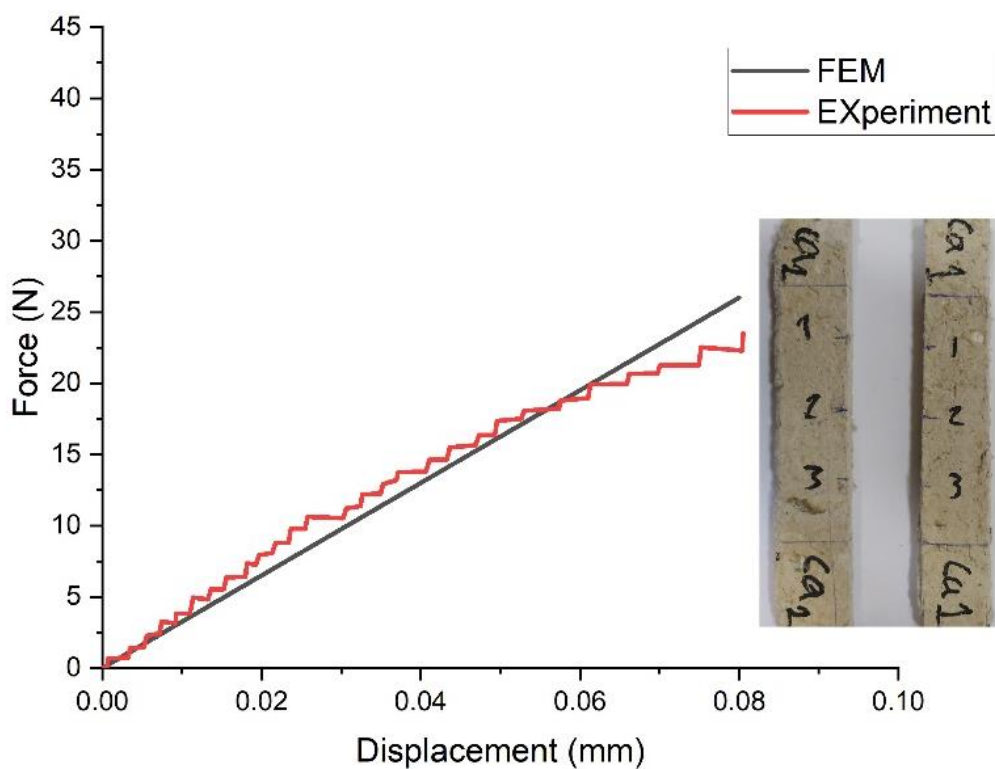
شکل ۸. مقایسه نتایج تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی هسته‌های مقوایی تحت نیروی فشاری

Fig. 8. Comparison of experimental and numerical results of force-displacement for core specimens under compression



شکل ۹. نتایج تجربی نمودار نیرو-جابجایی کشش نمونه مقوا  $Ca_4$  (شکست در فک)

Fig. 9. Force-displacement diagram of  $Ca_4$  cardboard under tensile test (failure at clamps)



شکل ۱۰. نتایج تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی کشش نمونه مقوا  $Ca_3$

Fig. 10. Comparison of experimental and numerical results of force-displacement for  $Ca_3$  under tensile test



شکل ۱۲. هسته تکی قبل از بارگذاری

Fig. 12. The single egg box specimen before loading



شکل ۱۱. ناحیه تخریب شده نمونه مقوایی تحت کشش

Fig. 11. Failure site of cardboard specimen under tension

جدول ۱. خواص مکانیکی کششی مقوا

Table 1. Tensile mechanical properties of the cardboard specimens

مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام کششی (MPa)	ماکزیم نیرو (N)	سطح مقطع (mm <sup>2</sup> )	نمونه
۰/۱۰۶۹	۰/۱۰۱	۲۸/۴	۱۹۲/۲	Ca <sub>۱</sub>
۰/۱۰۷۱	۰/۱۰۰	۲۸/۱	۱۹۱/۷	Ca <sub>۲</sub>
۰/۱۰۷۱	۰/۱۰۱	۲۸/۲	۱۹۲/۱	Ca <sub>۳</sub>

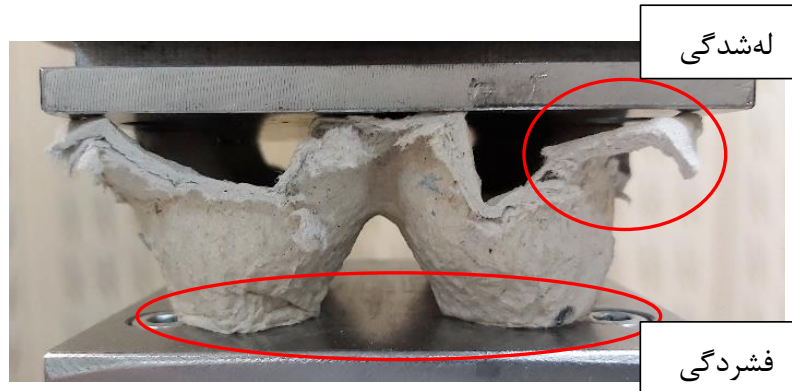
جابجایی ۲۰/۱۴۵ میلی متر صورت گرفته و نمودار نیرو-جابجایی (شکل ۱۴) روند صعودی را آغاز می کند، که خرابی کامل هسته و پایان آزمایش را نشان می دهد. با مشاهده نمونه در انتهای آزمایش با باربرداری، هسته مقداری به حالت اولیه خود بازگشته و مشهود است که فشردگی و بیشترین خرابی هسته در قسمت سطح تماس با صفحه پایینی صورت گرفته است و در سطح تماس هسته با فک محرک تغییری ایجاد نشده است (شکل ۱۵). نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی روند تخریب یکسانی را در مقایسه با آزمون تجربی ارائه کرده است (شکل ۱۶).

۶-۲- نتایج آزمون فشاری هسته

با شروع بارگذاری بر روی هسته تکی (شکل ۱۲)، تا میزان جابجایی ۶ میلی متری فک دستگاه تغییر شکلی خاصی در هسته رخ نداد، اما پس از عبور از این میزان جابجایی، چهار گوشه اطراف دچار خرد شدن یا له شدن شده اند (شکل ۱۳). با افزایش میزان بارگذاری، له شدگی گوشه های هسته و سطح تماس هسته با صفحه پایین فک، بیشتر شده و پس از رسیدن به میزان نیرو ۴۰۶/۶۶۶ نیوتن شکست در گوشه ها و فشردگی سطح تماس هسته با فک پایینی ایجاد و بارگذاری کاهش پیدا می کند. فشردگی هسته با رسیدن به

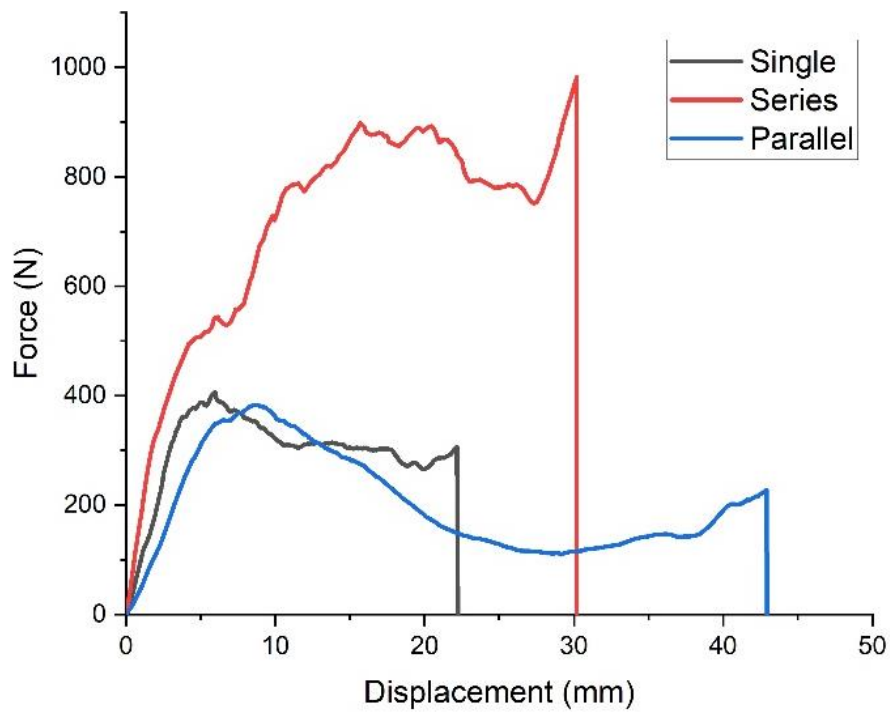
1 Crushing





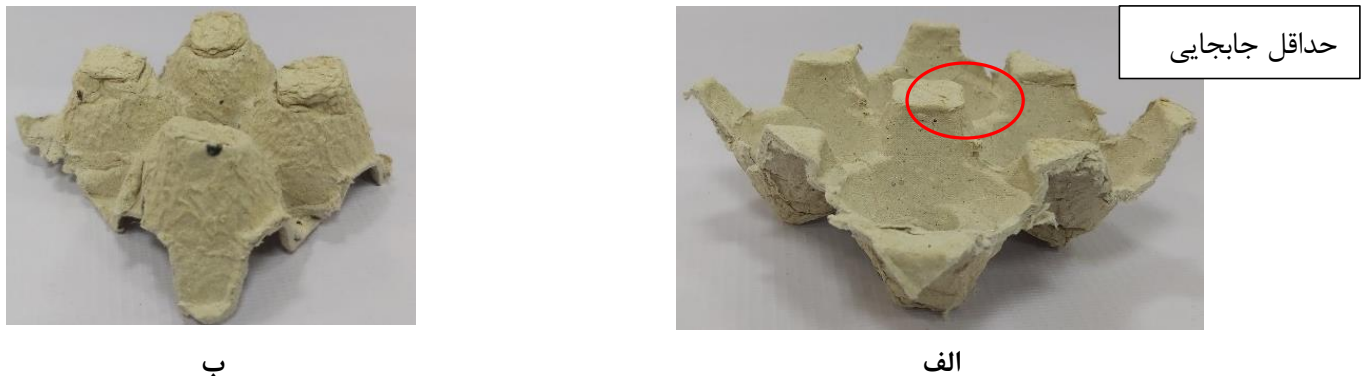
شکل ۱۳. هسته تکی در حین بارگذاری

Fig. 13. The single egg box specimen during loading



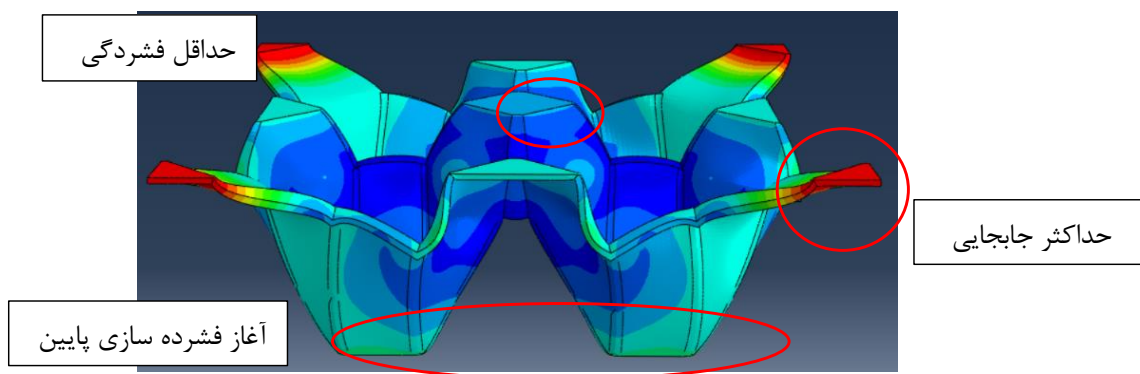
شکل ۱۴. نمودار نیرو-جابجایی هسته‌های مقوایی تحت نیروی فشاری

Fig. 14. Force-displacement diagram for egg box cores under compression



شکل ۱۵. هسته تکی بعد از بارگذاری (الف سمت بالا ب) سمت پایین

Fig. 15. The single egg box specimen after unloading; a) top side, b) bottom side



شکل ۱۶. هسته تکی تحت بارگذاری فشاری

Fig. 16. The FE simulation of single egg box specimen

هسته با صفحه‌ی ثابت و خرد شدن یا له‌شدن لبه در چهار گوشه هسته است. تغییر شکل هسته بیشتر در قسمت بالایی نسبت به ناحیه پایینی اتفاق افتاده است (شکل ۱۸ و شکل ۱۹) که در شبیه‌سازی عددی نیز این موضوع قابل مشاهده است (شکل ۲۰). در جابجایی برابر با ۲۰ میلی‌متر، نمودار شروع به کاهش قابل توجهی می‌کند و در میزان جابجایی ۳۰/۲ میلی‌متر مقدار نیرو تحمل شده توسط هسته به صورت صعودی افزایش می‌یابد که نشانگر آغاز فشردگی هسته می‌باشد. پس از باربرداری مود خرابی هسته سری مانند هسته تکی می‌باشد با این تفاوت که میزان فشرده سازی سطح مقطع پایینی

در نمونه هسته سری با شروع بارگذاری (شکل ۱۷)، همانند هسته اول شیب نمودار نیرو-جابجایی تا جابجایی ۴ میلی‌متر به صورت صعودی و تقریباً خطی بوده با این تفاوت که در هسته اول پس از این صعود، نمودار نزولی می‌شود اما در هسته دوتایی با بیشتر جفت شدن هسته‌ها در همدیگر، نمودار به صعود خود ادامه داده و به ماکزیمم نیرویی معادل ۹۰۰ نیوتن می‌رسد. در قسمت‌هایی از نمودار کاهش‌های جزئی دیده می‌شود که ناشی از جفت شدن و پر شدن فاصله بین دو هسته می‌باشد. در این نوع هسته نیز، خرابی مانند هسته نوع اول رخ می‌دهد، این خرابی‌ها به صورت جمع شدن سطح تماس



شکل ۱۸. هسته سری در حین بارگذاری

Fig. 18. The two boxes inside each other specimen during loading

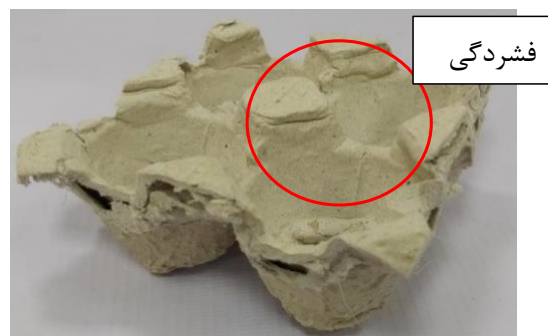


شکل ۱۷. هسته سری قبل از بارگذاری

Fig. 17. The two boxes inside each other specimen before loading



ب



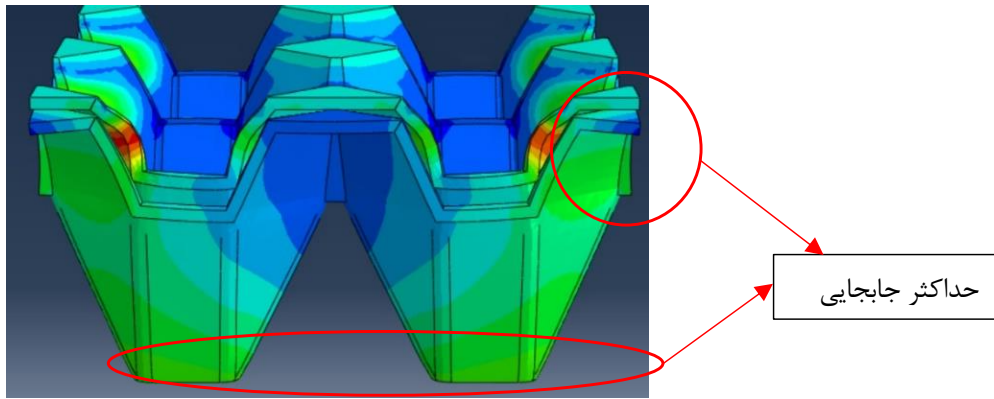
الف

شکل ۱۹. هسته سری بعد از بارگذاری، الف) فشردگی ناحیه بالایی شانه ب) فشردگی ناحیه پایینی شانه

Fig. 19. The two boxes inside each other specimen after unloading, a) compression of the upper box, b) compression of the lower box

شانه تخم مرغ بالایی به پایینی، وجود پستی و بلندی‌هایی که در این مرحله ایجاد شده سبب انتقال نیروی کمتری میان دو هسته در ناحیه‌های اتصال می‌شود. این نیرو منتقل شده از فک بالا در ناحیه میانی هسته، بیشتر صرف خمش این ناحیه شده و نیروی کمتری سبب فشردگی ناحیه پایینی هسته می‌شود، که در نهایت سبب ایجاد تغییرات نامتقارن در راستای ارتفاع این هسته شده است.

هسته نسبت به حالت تکی قابل ملاحظه است و سطح تماس هسته با فک محرک نیز در این هسته فشرده شده است. دلیل اصلی عدم تقارن در تغییر شکل هسته سری، عدم تداخل کامل ناحیه پایینی هسته‌ها باهم و وجود فضای خالی در بین قسمت پایینی هسته‌ها است. با اعمال نیرو توسط فک‌های دستگاه، ناحیه زیر بار هسته بالایی با توجه به قابلیت فشرده سازی مقوا، دچار تخریب زودتری نسبت به هسته پایینی می‌شود. پس از رسیدن



شکل ۲۰. هسته سری تحت بارگذاری فشاری

Fig. 20. Numerical simulation of the two boxes inside each other specimen under compression



شکل ۲۲. هسته موازی در حین بارگذاری

Fig. 22. The two boxes over each other specimen during loading



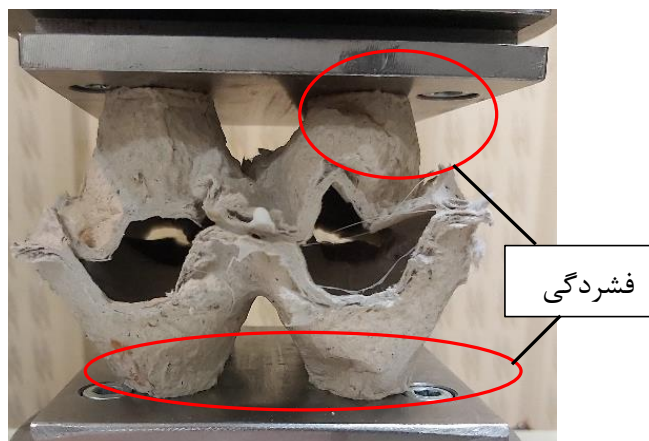
شکل ۲۱. هسته موازی قبل از بارگذاری

Fig. 21. The two boxes over each other specimen before loading

صورت شدیدی دچار خرابی و پارگی می‌شود (شکل ۲۲ و شکل ۲۳) اگرچه همانند نتایج پیش‌بینی عددی پایه‌های هسته پایینی مقداری فشرده سازی کمتری را نسبت به هسته بالایی متحمل می‌شوند (شکل ۲۴ و شکل ۲۵). هسته موازی بیشترین آسیب را نسبت به هسته‌های دیگر داشته و هسته سری (نوع دوم) میزان تحمل بار بیشتری داشته است (۱۲۱٪ بیشتر نسبت به هسته تکی و ۱۳۵٪ بیشتر نسبت به هسته موازی). در جدول ۲ خواص فشردگی این سازه‌ها ارائه شده‌است.

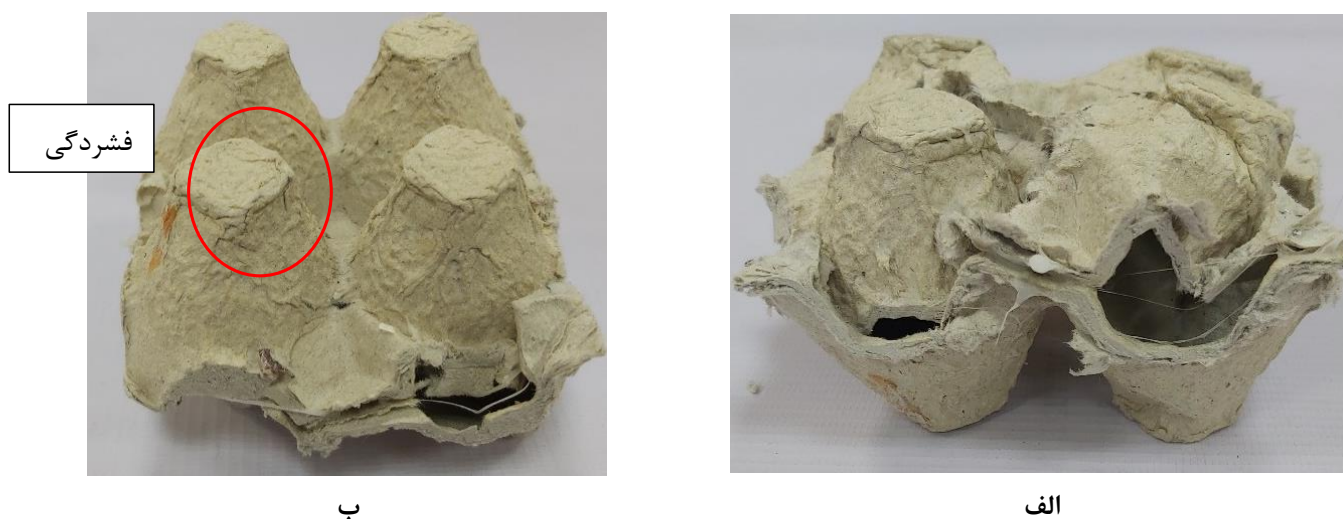
آزمون بارگذاری بر روی هسته موازی (شکل ۲۱) به علت حساسیت بیشتر با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید. در این آزمون با شروع بارگذاری نمودار نیرو-جابجایی به صورت صعودی بوده و مقدار ماکزیمم نیرو ۳۸۳/۳ نیوتن در ۸/۷۵ میلی‌متر جابجایی را از خود نشان می‌دهد و نمودار به صورت قابل توجهی با افزایش جابجایی دچار کاهش نیرو می‌شود. فشرده سازی هسته در جابجایی ۲۸ میلی‌متری رخ داده و پس از آن نیرو روند صعودی را در پی می‌گیرد. خرابی در این هسته همانند حالت‌های قبل ابتدا در گوشه‌های هسته رخ داده و با افزایش نیرو هسته بالایی به





شکل ۲۳. هسته موازی در انتهای بارگذاری

Fig. 23. The two boxes over each other specimen at the end of loading

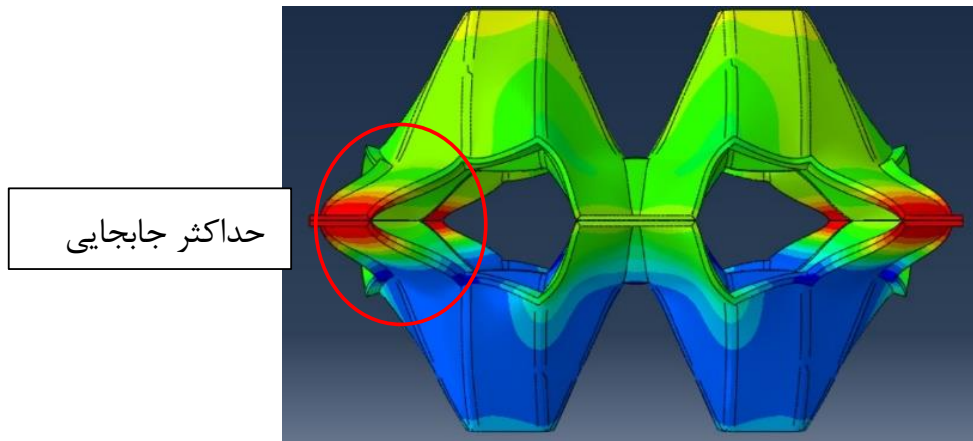


شکل ۲۴. هسته موازی پس از بارگذاری الف) فشردگی ناحیه بالایی شانه ب) فشردگی ناحیه پایینی شانه

Fig. 24. The two boxes over each other specimen after unloading, a) compression of the upper box, b) compression of the lower box

میزان تأثیر پارامتر ضخامت لایه‌های هسته به صورت شبیه‌سازی عددی، در هر سه حالت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان‌داد با دوبرابر سازی ضخامت هر لایه، انرژی جذب شده توسط هسته سازه در حدود ۱۰۰٪ الی ۱۲۰٪ افزایش می‌یابد. همانند بررسی‌های قبل، هسته سری نسبت به ضعیف‌ترین هسته (هسته نوع تکی) در حدود ۶۵٪ نیروی بیشتری را تحمل کرده‌است که در شکل ۲۶ این نتایج نشان داده شده‌است.

مطابق جدول ۲، میزان انرژی جذب شده نمونه‌های تکی، سری و موازی به ترتیب برابر با ۶/۶۳، ۲۰/۹۲ و ۸/۶۷ ژول می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه سری نسبت به نمونه‌های اول و سوم به ترتیب حدود ۲۱۵٪ و ۲/۵٪ انرژی جذب‌شده ویژه (نسبت انرژی به چگالی) بیشتری دارد. همچنین، نمونه سری به طور میانگین ۱۲۸٪ استحکام ویژه بالاتری را نسبت به دو نمونه دیگر از خود نشان داده است.



شکل ۲۵. هسته موازی تحت بارگذاری فشاری در مدل عددی

Fig. 25. Numerical simulation of the two boxes over each other specimen under compression

جدول ۲. میزان تحمل بار هسته‌های شانه تخم مرغی و انرژی جذب شده

Table 2. Stiffness, strength and energy absorption of egg box cores under compression

نمونه	سفتی (N/mm)	استحکام* (N)	استحکام ویژه** (Nm <sup>۲</sup> /kg)	انرژی جذب شده (J)	انرژی جذب شده ویژه** (Jm <sup>۳</sup> /kg)
تکی	۹۷۷۹۷/۴۵	۴۰۶/۴	۹۶۰/۰۷	۶/۶۳	۱۵/۶۷
سری	۱۳۵۸۹۸/۴۰	۸۹۸/۵	۲۱۲۲/۶۱	۲۰/۹۲	۴۹/۴۳
موازی	۸۵۸۵۰/۸۷	۳۸۲/۲	۹۰۲/۹۱	۸/۶۷	۴۸/۲۰

\* حداکثر نیرو قبل از فشرده‌سازی هسته

\*\* نسبت خاصیت به چگالی

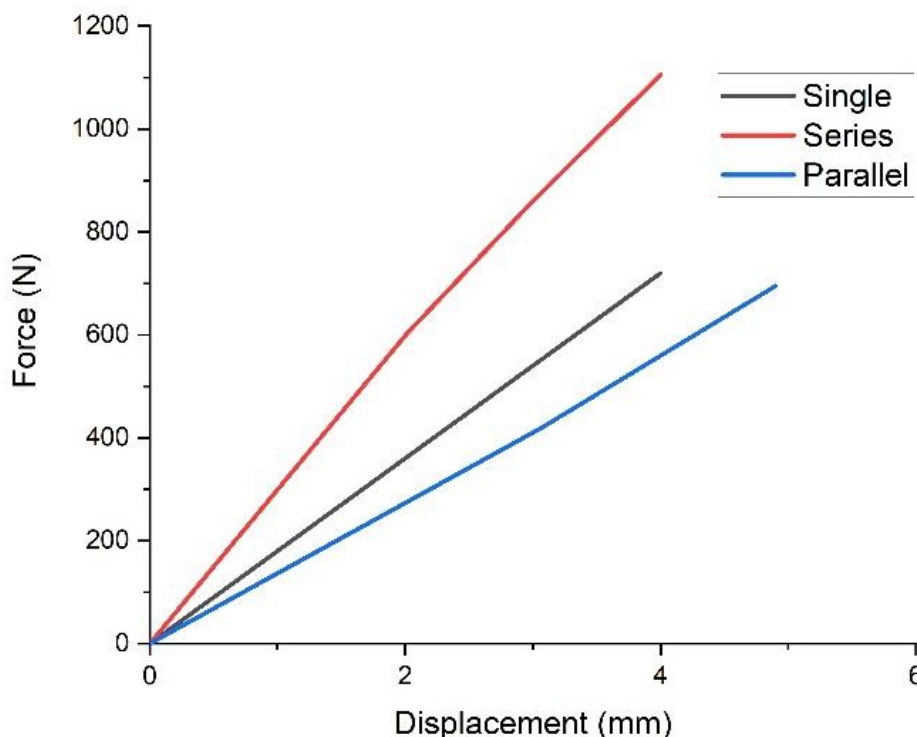
## ۷- نتیجه‌گیری

عنوان ماتریس کامپوزیت سازه‌های ساندویچی زیست تخریب انتخاب شده

است. خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش به این شرح است:

- بررسی خواص مکانیکی و مکانیزم تخریب نمونه‌های مقوایی نشان داد حالت‌های مختلف ساخت و خشک سازی نمونه مقوایی بر ایجاد ترک‌های موجود در نمونه بسیار تاثیرگذار است. نتایج بدست آمده از تست کشش نمونه‌های مقوایی، مکانیزم اصلی تخریب نمونه‌ها را رشد ترک و گسستگی میان الیاف سلولزی را نشان داد (پرش‌های نمودار نیرو-جابجایی کشش مقوا به دلیل وجود ترک‌های ذاتی موجود در این نوع ماده می‌باشد). مقاومت کششی و مدول یانگ به ترتیب ۰/۱۴۶۵ و مگاپاسکال و ۰/۱۰۶۹ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

رفتار فشاری هسته‌های شانه تخم مرغ مقوایی با چیدمان‌های مختلف به عنوان لایه میانی (هسته) شانه تخم مرغی در سازه‌های ساندویچی زیست تخریب پذیر، به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. ویژگی مهم این سازه، سازگاری آن با محیط زیست (زیست تخریب‌پذیر بودن آن) است، خواص این سازه توسط تست‌های شبه استاتیکی فشار مورد مطالعه قرار گرفت. این پژوهش با هدف نهایی عدم استفاده از مواد شیمیایی برای ساخت سازه‌های ساندویچی صورت گرفته است. با توجه به خصوصیت‌هایی همچون استحکام، خواص مکانیکی و عایق بندی آکوستیک بسیار مناسب، شانه‌های تخم مرغ در لایه میانی و پلیمر زیست تخریب به



شکل ۲۶. نمودار نیرو-جابجایی هسته‌های مقاوی تحت نیروی فشاری با دوبرابر سازی ضخامت هر لایه

Fig. 26. Force-displacement diagram for egg box cores with doubled thicknesses under compression

- بررسی نتایج تجربی و عددی نشان داد که تحلیل عددی سازه با دقت بالایی صورت گرفته‌است و اختلافی در حدود ۱۳٪ میان نتایج تحلیل عددی و تجربی وجود دارد.
- هسته شانه تخم مرغی نسبت فشرده سازی بسیار مقاوم بوده و انرژی زیادی را برای فشرده سازی، به خود جذب کرده‌است.
- مکانیزم خرابی در هسته، خرد شدن یا له شدن لبه‌های خارجی و فشرده سازی خانه‌های مورد تماس با لبه بیرونی می‌باشد.
- هسته موازی (دو شانه تخم مرغ برعکس روی هم) و هسته سری (دو شانه تخم مرغ در هم) به ترتیب بیشترین و کمترین آسیب را متحمل شده‌است.
- به دلیل اتصال ناحیه‌های برش خورد به هم در هسته موازی، بیشتر نیروی فشاری صرف جابجایی اتصالات اطراف هسته شده‌است، این امر سبب فشردگی نامتقارن در این هسته متقارن شده است.
- هسته سری، بیشترین باربرداری را داشته است. این هسته ۱۲۱٪ بیشتر از هسته تکی و ۱۳۵٪ بیشتر از هسته موازی، بار تحمل کرده است.
- هسته سری نسبت به سایر هسته‌ها به صورت میانگین ۴۹٪ سفتی، ۱۰۸٪ انرژی جذب شده و ۱۲۸٪ استحکام بیشتری را از خود نشان می‌دهد. این هسته به دلیل هندسه و نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها درون هم در هنگام فشرده سازی در ناحیه پایینی دچار فشردگی بیشتری می‌شود، این امر ناشی از وجود فضای خالی در این قسمت است.
- افزایش ضخامت شانه‌های تخم مرغ، تأثیری مستقیمی بر خواص فشرده‌سازی سازه داشته و با دو برابر کردن ضخامت لایه‌ها، مقدار انرژی جذب شده توسط هسته سازه بیش از ۱۰۰٪ افزایش یافته‌است.
- باتوجه به خواص مکانیکی مناسب این نوع هسته‌ها و وزن اندک آنان، این نوع هسته‌ها می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای لایه میانی سازه‌های ساندویچی خصوصاً در مورد سازه‌های زیست تخریب پذیر باشند.

- [9] A. Galic, S. Pliestic, D. Filipovic, I. Kovacev, K. Copec, Z. Janjecic, D. Bedekovic, Mechanical properties of ten-egg boxes made of different materials, *J Food Sci Technol*, 55(4) (2018) 1325-1330.
- [10] A.K. Haldar, Z.W. Guan, W.J. Cantwell, Q.Y. Wang, The compressive properties of sandwich structures based on an egg-box core design, *Composites Part B: Engineering*, 144 (2018) 143-152.
- [11] D.D. Cartié, N.A. Fleck, The effect of pin reinforcement upon the through-thickness compressive strength of foam-cored sandwich panels, *Composites Science and Technology*, 63(16) (2003) 2401-2409.
- [12] B. Wang, L. Wu, L. Ma, Y. Sun, S. Du, Mechanical behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss core, *Materials & Design* (1980-2015), 31(5) (2010) 2659-2663.
- [13] S.H. Yoo, S.H. Chang, M.P.F. Sutcliffe, Compressive characteristics of foam-filled composite egg-box sandwich panels as energy absorbing structures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(3) (2010) 427-434.
- [14] R. Beigpour, H. Shokrollahi, S.M.R. Khalili, Experimental and numerical analysis of a biodegradable hybrid composite under tensile and three-point bending tests, *Composite Structures*, 273 (2021) 114255.
- [15] C. Fellers, M. Backstrom, M. Htun, G. Lindholm, Paper-to-paper friction - paper structure and moisture, *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 13(3) (1998) 225-232.
- [16] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, *The finite element method*, McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [1] H. Altenbach, Mechanics of advanced materials for lightweight structures, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 225(11) (2011) 2481-2496.
- [2] T. Khan, V. Acar, M.R. Aydin, B. Hülagü, H. Akbulut, M.Ö. Seydibeyoğlu, A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores, *Polymer Composites*, 41(6) (2020) 2355-2400.
- [3] J.R. Vinson, Sandwich Structures: Past, Present, and Future, in: O. Thomsen, E. Bozhevolnaya, A. Lyckegaard (Eds.) *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, Springer, Dordrecht, 2005.
- [4] T. Bitzer, *Honeycomb Technology- Material Design, Manufacturing Applications and Testing*, Springer, Netherlands, 1997.
- [5] J. Romanoff, P. Varsta, Bending response of web-core sandwich beams, *Composite Structures*, 73(4) (2006) 478-487.
- [6] I.M. Daniel, E.E. Gdoutos, K.A. Wang, J.L. Abot, Failure Modes of Composite Sandwich Beams, *International Journal of Damage Mechanics*, 11(4) (2002) 309-334.
- [7] G.H. Liaghat, H.-a. Sorailo, Sandwich Design Optimization Honeycomb Panels Under Compressor Load, *mdrsjrn*, 9(1) (2009) 73-82.
- [8] Z.-Y. Cai, X. Zhang, X.-B. Liang, Multi-point forming of sandwich panels with egg-box-like cores and failure behaviors in forming process: Analytical models, numerical and experimental investigations, *Materials & Design*, 160 (2018) 1029-1041.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Beigpour, H. Shokrollahi, S. M. R. Khalili, *Numerical and Experimental Investigation on Compressive Properties of Egg Box Cores in Biodegradable Sandwich Panels*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(4) (2022) 843-858.

DOI: 10.22060/mej.2022.20587.7265

