



مدل سازی رفتار تورفتگی دیواره های ساندویچی لانه زنبوری گرمانرم

وحید خلیلی مگامیر، حمید رحیمی*، میرحمیدرضا قریشی، امیر مسعود رضادوست، مسعود اسفنده

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۸۶/۱۲/۱۲، پذیرش: ۸۷/۲/۱۸

چکیده

لانه زنبوری های گرمانرم از جنس پلی پروپیلین یکی از جدیدترین انواع هسته های هستند که در دیواره های ساندویچی مورد استفاده قرار گرفته اند. تا کنون بررسی های کمی روی خواص مکانیکی دیواره های ساندویچی دارای هسته لانه زنبوری گرمانرم انجام شده و کمتر سعی شده است که خواص آنها شبیه سازی شود. در این مقاله، با توجه به شباهت رفتار مکانیکی لانه زنبوری ها با اسفنج ها سعی شد، واکنش لانه زنبوری ها در برابر تورفتگی ایستا با استفاده از مدل Crushable Foam که خاص اسفنج هاست، به وسیله نرم افزار اجزای محدود ABAQUS شبیه سازی شود. منحنی به دست آمده از تحلیل عددی انطباق خوبی را با منحنی تجربی تا جایی که حدود ۲۰ درصد ضخامت نمونه ها نشان می دهد. با توجه به این که در بارگذاری های ایستا معمولاً گسیختگی قطعه مد نظر نیست، به نظر می رسد، مدل Crushable Foam مدل موادی مناسبی برای شبیه سازی رفتار لانه زنبوری های گرمانرم در تحلیل های ایستاست.

واژه های کلیدی

ساختار ساندویچی،
لانه زنبوری گرمانرم،
خواص مکانیکی،
تورفتگی، مدل سازی

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

h.rahimi@ippi.ac.ir

Modelling of the Indentation Behaviour of Thermoplastic Honeycomb Sandwich Panels

V. Khalili Moghamir, H. Rahimi*, M.H.R. Ghoreishy, A.M. Rezadoust,
and M. Esfandeh

Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965/115, Tehran, Iran

Received 2 March 2008; accepted 7 May 2008

Abstract

Thermoplastic honeycombs based on polypropylene are one of the latest types of cores used in sandwich structures. Up to now there have been few experimental and modelling studies on the mechanical behaviour of sandwich structures with thermoplastic cores. In this paper, by considering the similar properties of foams and thermoplastic honeycombs, attempts are made to model the static indentation behaviour of honeycombs based on a crushable foam material model using the ABAQUS finite element programme. Comparison of the experimental results and numerical predictions for indentation values show a good correlation up to 20% depth of the panel thickness. It must be noted that in static indentations it would be irrelevant to study the rupture of the skins or cores and, therefore, the crushable foam model should be suitable for modelling the behaviour of thermoplastic honeycombs.

Key Words

sandwich structure,
thermoplastic honeycomb,
mechanical properties,
indentation, modeling

(* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: h.rahimi@ippi.ac.ir

مقدمه

دیواره های ساندویچی ساختارهایی متشکل از ۲ پوسته نازک و قوی و یک هسته سبک، ضخیم و ضعیف هستند که با وجود وزن کم، استحکام و سفتی خمشی زیادی دارند. همچنین، این مواد دارای مزایایی نظیر جذب انرژی زیاد، عایق صوت و گرما نیز هستند. تاکنون انواع مختلفی از اسفنج ها و لانه زنبوری ها به عنوان هسته در دیواره های ساندویچی مورد استفاده قرار گرفته اند، که هر کدام دارای مزایا و معایبی بوده اند [۱،۲]. به تازگی استفاده از لانه زنبوری های پلی پروپیلن به عنوان هسته در دیواره های ساندویچی رو به گسترش است. این مواد گرچه خواص مکانیکی ضعیف تری نسبت به لانه زنبوری های آلومینیمی و نامکس (Nomex) دارند و معمولاً در صنایع پیشرفته نظیر هوا - فضا استفاده نمی شوند، اما به دلیل ارزانی، سبکی، مقاومت ضربه بالا، قابلیت بازیافت و عایق گرمایی بودن در صنایع قایق سازی، خودرو و لوازم خانگی نظیر ساخت میز و در کاربرد پیدا کرده اند. پژوهش هایی که تاکنون درباره لانه زنبوری های پلی پروپیلن انجام شده، بیشتر مربوط به روش های تولید این مواد [۳] و بررسی خواص مکانیکی این نوع لانه زنبوری ها و دیواره های ساندویچی ساخته شده از آنهاست [۴-۶]. درباره انتخاب چسب مناسب برای ساخت لانه زنبوری ها نیز مطالعاتی انجام شده است [۷،۸]. اما تاکنون مطالعه جامعی در خصوص شبیه سازی دیواره های ساندویچی لانه زنبوری گرمانرم در برابر نیروهای مکانیکی انجام نشده است.

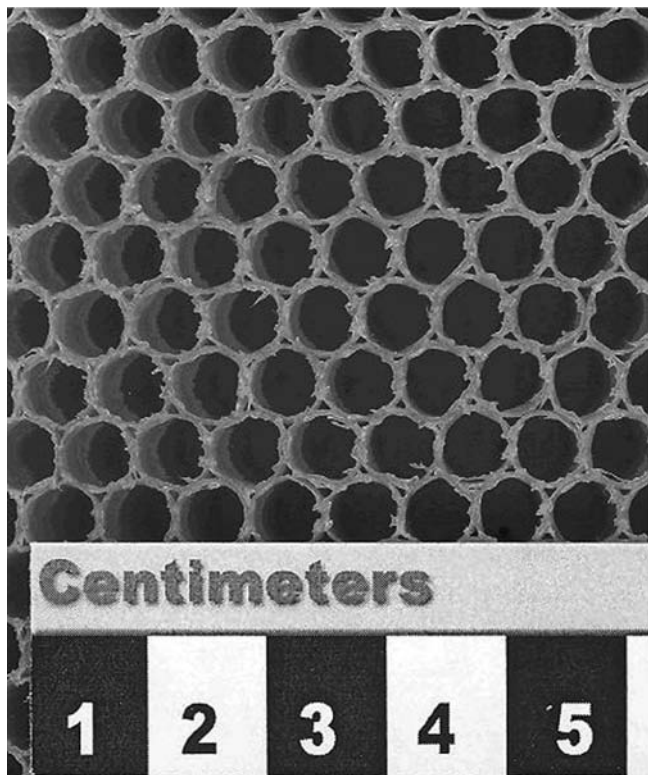
یکی از مهم ترین خواص دیواره های ساندویچی، رفتار تورفتگی (indentation) آنهاست [۹]. باید متذکر شد، دیواره های ساندویچی در کنار مزایای پیش گفته، معایبی هم دارند. برای مثال این ساختارها در جهت عرضی سفتی کمی دارند که این موضوع باعث می شود، زیر بارهای متمرکز دچار خم شدگی موضعی شده و در نتیجه ظرفیت تحمل بار آنها کاهش می یابد. چنین آسیبی همی ممکن است، در نتیجه برخورد اشیای مختلف هنگام کاربرد دیواره ساندویچی ایجاد شود. تورفتگی ساختارهای ساندویچی ممکن است، باعث له شدن هسته و جدا شدن آن از پوسته شود، بدون این که آسیب محسوسی به پوسته ها وارد شود. با وجود سالم ماندن ظاهری پوسته ها، تورفتگی باعث کاهش مقاومت فشاری یا برشی ساختار ساندویچی می شود. به دلیل شایع بودن چنین آسیبی در دیواره های ساندویچی، بررسی تورفتگی آنها یکی از موضوعاتی است که پژوهش های زیادی روی آن انجام شده است. به علاوه رفتار خم شدگی موضعی دیواره های ساندویچی را هم می توان از آزمون های تورفتگی ارزیابی کرد.

پژوهش های که درباره بررسی خواص مکانیکی دیواره های

ساندویچی حاوی اسفنج شده، نشانگر اهمیت چسبندگی بین پوسته و هسته و اثر این پارامتر در نحوه شکست دیواره های ساندویچی است [۱۰،۱۱].

در شبیه سازی دیواره های ساندویچی مشکل اصلی یافتن یک مدل موادی مناسب برای هسته است که قابلیت پیش بینی رفتار مکانیکی پیچیده آن را داشته باشد. در سال های اخیر از مدل Crushable Foam که در برخی نرم افزارهای اجزای محدود قابل دسترس است، برای شبیه سازی هسته های اسفنجی استفاده شده است [۱۲،۱۳]. اما برای شبیه سازی لانه زنبوری ها دو روش وجود دارد. در روش اول شکل هندسی ریزساختار لانه زنبوری به وسیله نرم افزارهای ویژه ای طراحی شده و خواص ماده سازنده لانه زنبوری به آن اختصاص داده می شود. این روش مشکلات زیادی دارد. مشکل اصلی روش این است که نمی توان آن را برای تمام لانه زنبوری ها به کار برد. مثلاً در لانه زنبوری های لوله ای که ناحیه تماس بین لوله ها در طول بارگذاری تغییر می کند، محاسبه ناحیه تماس بین لوله ها و نیروهای وارد شده بسیار دشوار است و نتایج هم گرایی خود را از دست می دهند. همچنین، در مواردی که بارگذاری در آنها به حالت خارج از صفحه لانه زنبوری است، شبیه سازی حتماً باید به شکل سه بعدی انجام شود. این امر باعث تعداد اجزا بسیار زیاد شده و با توجه به تغییر شکل های پیچیده ای که در لانه زنبوری ها روی می دهد، هم گرایی پاسخ ها به شدت با مشکل مواجه می شود. به دلیل مشکلات ذکر شده شبیه سازی فرایندهایی که موجب تغییر شکل زیادی در لانه زنبوری ها می شود، با این روش بسیار دشوار است. از این روش بیشتر در تحلیل های دوبعدی برای شبیه سازی از بارگذاری های درون صفحه ای استفاده شده است [۱۴،۱۵]. بعضی از پژوهشگران از این روش برای شبیه سازی رفتار لانه زنبوری های آلومینیم یا نامکس با سلول های شش ضلعی استفاده کرده اند [۱۶،۱۷]. در لانه زنبوری های دارای سلول های شش ضلعی ناحیه تماس چندان تغییر نمی کند، در ضمن مدل های مواد مناسبی برای شبیه سازی رفتار مکانیکی آلومینیم و نامکس در نرم افزارهای اجزای محدود موجود است. با توجه به این که پلی پروپیلن رفتار مکانیکی غیرخطی نسبتاً پیچیده ای دارد و مدل موادی چندان مناسبی برای پیش بینی رفتار آن وجود ندارد، استفاده از این روش برای شبیه سازی لانه زنبوری های پلی پروپیلن با سلول های دایره ای شکل بسیار دشوار است.

در روش دیگری که برای شبیه سازی استفاده می شود، لانه زنبوری مانند اسفنج ها همگن در نظر گرفته شده است. مشکل این روش آن است که در مورد لانه زنبوری ها مدل موادی که عمومیت زیادی داشته



شکل ۱ - نمایی از لانه زنبوری پلی پروپیلن با سلول های دارای مقطع دایره ای شکل.

۱۹ GPa بود (جدول ۱). برای اتصال لوله های پلی پروپیلن به یک دیگر و همچنین چسباندن هسته به پوسته ها از نوعی چسب اپوکسی دوجزیبی استفاده شد. این چسب بر پایه نوعی اپوکسی آلیفاتیک بود. به منظور جلوگیری از نفوذ چسب به داخل لوله ها از الیاف نفاخته پلی استر با وزن 60 g/m^2 تهیه شده از شرکت لایبی ساز، برای قرارگیری در بین هسته و پوسته ها استفاده شد.

دیواره های ساندویچی ساخته شده برای انجام آزمون تورفتگی به وسیله اره الماسه به شکل نمونه های مربعی با سطح مقطع $80 \times 80 \text{ mm}$ بریده شدند. در این نمونه ها ضخامت هسته 20 mm و ضخامت پوسته ها 3 mm

جدول ۱- ثوابت کشسان پوسته و هسته دیواره ساندویچی.

نسبت پواسون	مدول (MPa)	نوع ماده
۰/۳	۱۱۹۰۰۰	کامپوزیت (پلی استر تقویت شده با الیاف شیشه)
۰/۱	۲۹۴	لانه زنبوری (پلی پروپیلن لوله ای شکل)

(۱) مدول کششی [۲۴]؛ (۲) مدول فشاری [۲۵]؛

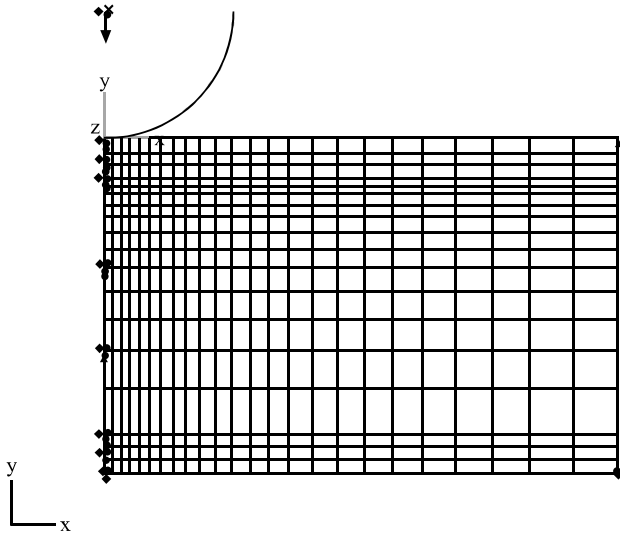
باشد، وجود ندارد. در بعضی از نرم افزارهای پیش رفته نظیر LS-DYNA که مدل های موادی فوق العاده متنوع و پرتعدادی دارند، مدل خاصی برای لانه زنبوری ها وجود دارد. البته در این جا هم محدودیت هایی وجود دارد، زیرا نرم افزار LS-DYNA نرم افزاری تخصصی برای شبیه سازی ضربه و مسایل بارگذاری با سرعت بالاست [۱۸،۱۹] و نمی توان مسایل ایستا را با آن مدل کرد. بعضی از پژوهشگران سعی کرده اند با ایجاد اصلاحاتی روی مدل های موادی موجود [۲۰] یا ایجاد مدل های مواد جدیدی [۲۱] که برای انواع خاص یا اشکال هندسی خاصی از لانه زنبوری قابل کاربرد است، رفتار لانه زنبوری ها را شبیه سازی کنند. این کار مستلزم انجام عملیات ریاضی پیچیده ای است و فقط برای نوع خاصی از لانه زنبوری کاربرد دارد و ممکن است با تغییر پارامترهای هندسی سلول ها یا نوع ماده کاربری خود را از دست بدهد.

نوآوری این پژوهش، استفاده از مدل Crushable Foam به عنوان مدل مواد برای لانه زنبوری های پلی پروپیلن است. استفاده از این مدل برای لانه زنبوری های پلی پروپیلن به دلیل شباهت رفتار مکانیکی اسفنج ها و لانه زنبوری های پلی پروپیلن است. در بخش نظری درباره شباهت رفتار لانه زنبوری ها و اسفنج ها بحث می شود. در انتها باید یادآور شد که استفاده از مدل های موادی مربوط به یک نوع ماده برای شبیه سازی ماده دیگر کار بی سابقه ای نیست و پیش از این بعضی از پژوهشگران رفتار دیواره های ساندویچی کامپوزیتی یک پارچه [۲۲] و اسفنج ها [۲۳] را با استفاده از مدل موادی Drucker-Prager که مخصوص موادی نظیر شن و ماسه است، مدل کرده اند. در این مقاله، رفتار تورفتگی دیواره های ساندویچی دارای پوسته کامپوزیت و هسته لانه زنبوری پلی پروپیلن با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS شبیه سازی شده است.

تجربی

مواد و روش ها

در بررسی حاضر از دیواره های ساندویچی دارای پوسته کامپوزیتی و هسته لانه زنبوری از جنس پلی پروپیلن استفاده شد. سلول های لانه زنبوری دارای مقطع دایره ای شکل بودند که ضخامت دیوار و قطر داخلی سلول ها به ترتیب $0/2$ و 6 mm بود. در شکل ۱ مقطع لانه زنبوری نشان داده شده است. برای ساخت پوسته از 6 لایه الیاف شیشه بافته شده 200 گرمی از نوع E و رزین پلی استر نوع ایزو (۷۵۱۱۲۹) تولید شرکت صنایع شیمیایی بوشهر استفاده شد. کامپوزیت ساخته شده دارای مدول



شکل ۳- نحوه شبکه ای کردن و اعمال شرط مرزی در شبیه سازی.

شده اند. ۳ جزء در جهت ضخامت پوسته ها و ۱۲ جزء در جهت ضخامت هسته در نظر گرفته شد که اجزای نزدیک به ناحیه تماس، مترکم تر در نظر گرفته شدند. در کل ۳۶۰ جزء در این مدل ایجاد شد. با توجه به این که نمونه ها روی یک حفره دایره ای به قطر ۷۶ mm قرار می گرفتند، بنابراین تمام انواع جا به جایی ها در گوشه پایین در سمت راست محدود شده است. حرکت گره های قرار گرفته روی محور تقارن در جهت (x) محدود شد. همچنین، برای در نظر گرفتن صفحه ای که هنگام انجام آزمون روی نمونه ها قرار می گیرد، فرض شده است که گره واقع در گوشه سمت راست، در بالای نمونه نمی تواند در جهت (y) حرکت کند. استوانه اعمال کننده بار به عنوان جسم سخت در نظر گرفته شد و فرض شده است که این جسم تنها در جهت (y) جابه جا می شود. به جای اعمال نیرو، بار به وسیله جابه جایی استوانه در جهت (y) اعمال شد.

پوسته های کامپوزیتی به عنوان ماده کشسان در نظر گرفته شده و با مدل کشسان خطی مدل شدند که ثوابت کشسان آنها در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به کم بودن جا به جایی اعمالی در نمونه ها هیچ ساز و کار آسیب و گسیختگی برای پوسته ها در نظر گرفته نشد.

رفتار مکانیکی هسته شامل دو بخش کشسان و پلاستیک است. بخش کشسان این رفتار با مدل کشسان خطی مدل شد. داده های ورودی استفاده شده در جدول ۱ آمده است. بخش پلاستیک رفتار لانه زنبوری با استفاده از مدل Crushable Foam مدل شد. این مدل در اصل برای شبیه سازی رفتار اسفنج های آلومینیمی ایجاد شد [۲۶]. اما، برخی پژوهشگران از آن برای شبیه سازی اسفنج ها نیز استفاده کرده اند. در این جا باید یادآور شد که ساختارهای متخلخل به طور کلی رفتار مکانیکی

بود. سرعت دستگاه Instron برای انجام آزمون تورفتگی ۲ mm/min تنظیم شد و منحنی نیرو - جا به جایی حاصل ثبت شد. تورفتگی به وسیله استوانه ای فولادی اعمال شد که نوک آن نیم کره ای به شعاع ۱۰ mm بود. نمایی از نحوه قرارگیری نمونه ها و اعمال بار به طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. ابتدا، نمونه ها روی صفحه ای قرار داده شدند که دارای حفره ای به شعاع ۷۶ mm بود. نمونه ها طوری روی این حفره قرار گرفتند که مرکز آنها بر مرکز حفره منطبق باشد. همچنین، صفحه فلزی دیگری روی نمونه ها قرار گرفت که آن هم دارای حفره ای به شعاع ۷۶ mm بود و به وسیله پیچ هایی به صفحه پایینی متصل می شد.

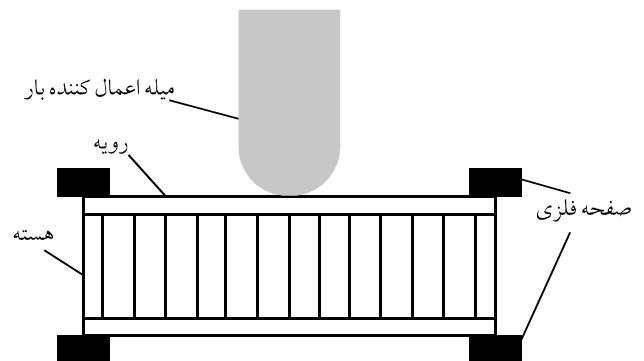
دستگاه ها

برای انجام آزمون تورفتگی از دستگاه Instron مدل ۶۰۲۵ ساخت کشور انگلستان با ظرفیت اعمال نیروی ۱۰۰ kN استفاده شد. مقادیر نیرو و جابه جایی هنگام آزمایش به کمک رایانه دستگاه ثبت شد.

نظری

برای شبیه سازی تورفتگی دیواره های ساندویچی لانه زنبوری پلی پروپیلن با پوسته کامپوزیتی از نرم افزار ABAQUS v 6/6 استفاده شد. این نرم افزار دارای چند مدل موادی است و قابلیت انجام تحلیل های ایستا و پویا را دارد.

با توجه به تقارن موجود در شکل هندسی نمونه ها و میله اعمال کننده بار، شبیه سازی عددی به کمک مدل متقارن محوری انجام شد و تنها نیمی از نمونه ها برای شبیه سازی در نظر گرفته شدند. در شکل ۳ نحوه اعمال بار، تعداد اجزا و نحوه اعمال شرایط مرزی نشان داده شده است. برای شبکه کردن مدل از اجزای متقارن محوری چهار گره ای (CAX4) استفاده شده است. ۲۴ جزء در جهت طول نمونه ها در نظر گرفته شده است که اجزا به طرف ناحیه تماس با میله اعمال کننده نیرو مترکم تر



شکل ۲- نمایی از نحوه انجام آزمون تورفتگی.

اسفنج ها، کاربرد مدل Crushable Foam را برای لانه زنبوری های پلی پروپیلن مناسب تر می کند.

داده های ورودی برای بخش پلاستیک لانه زنبوری باید به شکل جدولی از تنش واقعی بر حسب کرنش پلاستیک لگاریتمی وارد شود. این داده ها را می توان از یک آزمون فشاری تک محوری به دست آورد که روی لانه زنبوری انجام می شود. منحنی تنش - کرنش به دست آمده از آزمون فشاری برای لانه زنبوری پلی پروپیلن با ضخامت 20 mm در شکل (۵) نشان داده شده است. داده هایی که از دستگاه های انجام دهنده آزمون به دست می آید به شکل تنش مهندسی بر حسب کرنش مهندسی است. برای تبدیل تنش مهندسی به تنش واقعی از معادله (۱) استفاده می شود:

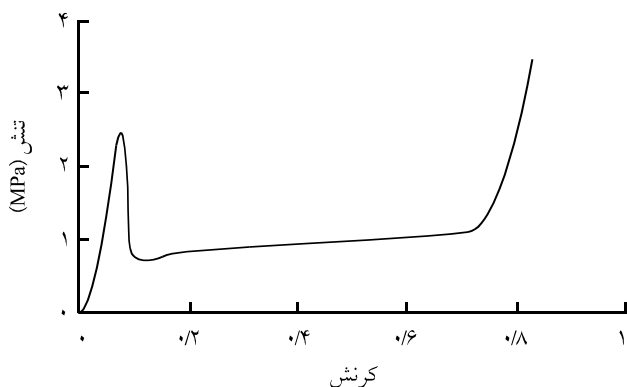
$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \epsilon_e) \quad (1)$$

که در آن σ_t تنش واقعی، σ_e تنش مهندسی و ϵ_e کرنش مهندسی را نشان می دهد. برای تبدیل کرنش مهندسی به کرنش پلاستیک لگاریتمی ابتدا کرنش مهندسی با معادله (۲) به کرنش واقعی (لگاریتمی) تبدیل می شود:

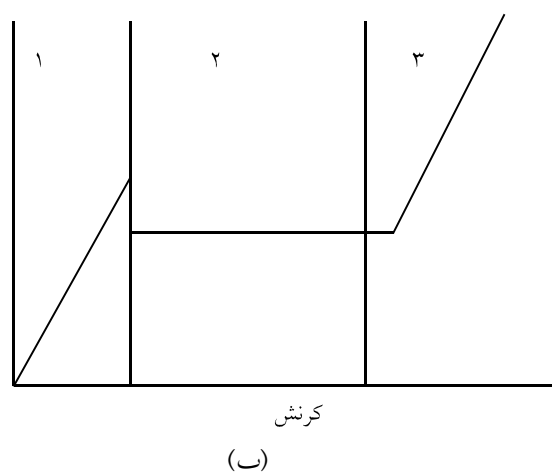
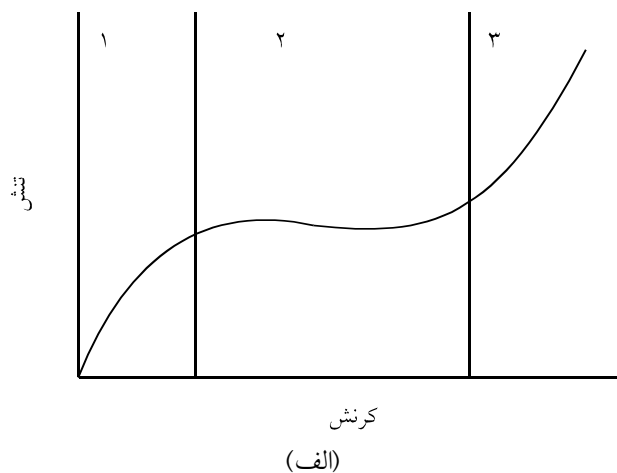
$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (2)$$

که در این معادله ϵ_t کرنش واقعی و ϵ_e کرنش مهندسی است. کرنش لگاریتمی پلاستیک به کمک معادله (۳) به دست می آید:

$$\epsilon_p = \epsilon_t - \frac{\sigma_t}{E} \quad (3)$$

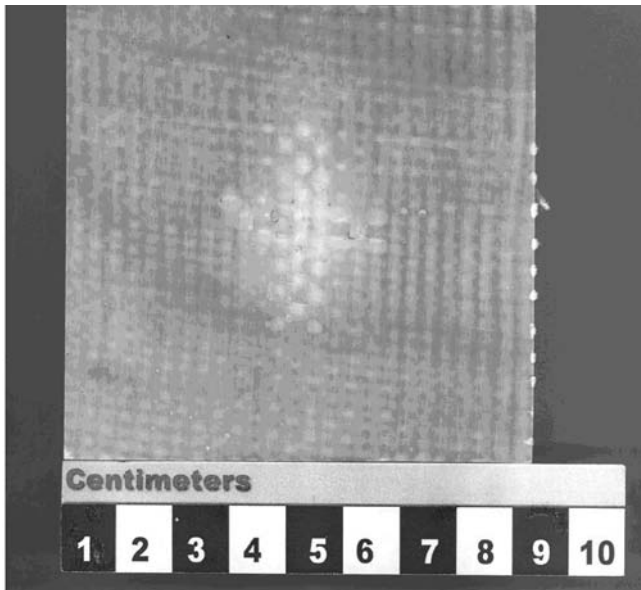


شکل ۵ - منحنی تنش - کرنش برای لانه زنبوری پلی پروپیلن با ضخامت 20 mm.



شکل ۴ - مقایسه رفتار مکانیکی یک اسفنج: (الف) با یک لانه زنبوری و (ب) زیر نیروی فشاری.

بسیار مشابهی دارند. در شکل ۴ منحنی تنش - کرنش حاصل از آزمون فشاری یک اسفنج (۴ الف) و یک لانه زنبوری (۴ ب) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در هر دو مورد ابتدا یک ناحیه کشسان خطی مشاهده می شود که مقدار مدول در آن ثابت است. بعد از نقطه تسلیم یک ناحیه مسطح که در آن مقدار تنش ثابت است، مشاهده می شود. در اسفنج ها وجود این ناحیه به دلیل شکست تدریجی سلول های آن است. اما، در لانه زنبوری دلیل مشاهده این ناحیه تاخوردگی تدریجی سلول های لانه زنبوری است. در هر دو مورد، در ماده تغییر شکل پلاستیک مشاهده می شود. در مرحله پایانی ناحیه متراکم شدن مشاهده می شود که در این ناحیه تنش به مقدار قابل توجهی افزایش نشان می دهد. علاوه بر شباهت کلی رفتار مکانیکی لانه زنبوری ها و اسفنج ها، نزدیک بودن مقدار عددی مدول (49 MPa) و مقدار تنش ناحیه مسطح (0/9 MPa) به مدول و تنش ناحیه مسطح



شکل ۶ - ناحیه آسیب دیده در پوسته کامپوزیتی در اثر اعمال ۶ mm جا به جایی پس از برداشتن بار.

فرض شده که رویه کامپوزیتی بدون آسیب می ماند، که در عمل امکان آسیب رویه کامپوزیتی و در نتیجه کاهش مقدار تحمل بار در آن وجود دارد، در نتیجه معمولاً نتایج حاصل از شبیه سازی بالاتر از نتایج تجربی به دست می آید.

در شکل ۷ ناحیه ظاهری آسیب در پوسته کامپوزیتی نشان داده شده است. ناحیه سفید مشاهده شده در مرکز نمونه مربوط به آسیب ایجاد شده در پوسته است. بنابراین، برای جابه جایی های بزرگ باید آسیب پوسته ها هم در شبیه سازی در نظر گرفته شود. در مجموع علاوه بر نزدیکی نتایج تجربی و نظری، روند منحنی (وجود تغییر شیب در هر منحنی) هم به طور نسبتاً خوب پیش بینی شده است. تغییر شیب در هر دو حالت آزمون تجربی و در تحلیل عددی دیده شد، که به دلیل آغاز رفتار پلاستیک هسته است.

همان طور که در شکل ۶ دیده می شود در جا به جایی های کم منحنی بار - جابه جایی خطی است که این رفتار تا زمان آغاز تغییر شکل پلاستیک هسته ادامه می یابد. بعد از آغاز تغییر شکل پلاستیک هسته منحنی بار - جابه جایی غیرخطی می شود و مقدار سختی سازه به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. حاصل این رفتار غیرخطی له شدن هسته در زیر پوسته است. در شکل ۸ برشی از مقطع دیواره ساندویچی بعد از ۶ mm اعمال جابه جایی نشان داده شده که می توان نحوه له شدن هسته در زیر پوسته را مشاهده کرد.

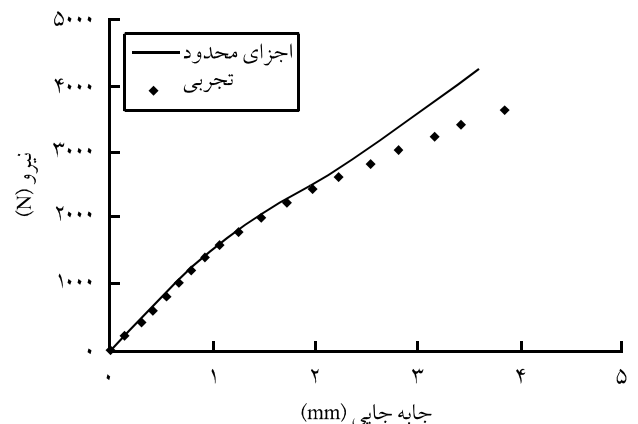
شکل ۹ توزیع مقدار جابه جایی پیش بینی شده را در اجزای دیواره ساندویچی بعد از ۳/۶ mm تورفتگی نشان می دهد. مشاهده می شود که

در این معادله ϵ_p کرنش پلاستیک و E مدول کشسان ماده است. شرایط مرزی حاکم برای حل مسئله مزبور در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این که در ناحیه تماس نمونه و استوانه اعمال کننده بار جا به جایی زیادی در دیواره ساندویچی ایجاد می شود، در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی ضروری است. به این منظور از قابلیت شبیه سازی غیرخطی هندسی استفاده شد. این مهم با انتخاب گزینه NLGEOM از نرم افزار انجام شد.

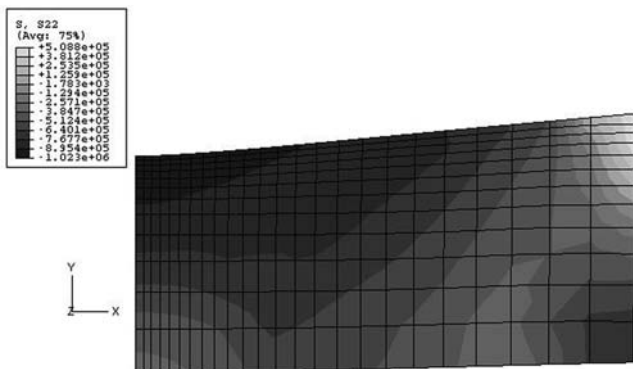
نتایج و بحث

ساختار ساندویچی نشان داده شده در شکل ۶ به وسیله نرم افزار زیر بار عمودی اعمال شده به آن شبیه سازی شد. به جای اعمال بار در شبیه سازی مقدار ۳/۶ mm جا به جایی برای میله اعمال کننده بار در نظر گرفته شد. تحلیل به شکل دو بعدی انجام شد. برای حل مسئله سطح تماس بین جسم سخت فرورونده و سطح دیواره ساندویچی از گزینه Interaction نرم افزار استفاده شد. کل زمان اجرای تحلیل با مشخصات ذکر شده ۲۵۰ s بود. در نخستین گام برای تشخیص میزان دقت و صحت شبیه سازی انجام شده نمودار بار - جابه جایی به دست آمده از نرم افزار با داده های حاصل از آزمون تجربی مقایسه شدند (شکل ۶).

همان طور که مشاهده می شود، نتایج شبیه سازی با داده های تجربی انطباق نسبتاً خوبی دارد که حاکی از قابلیت مدل در پیش بینی رفتار کلی سامانه است. عمده ترین دلیلی که می توان از آن به عنوان عامل اختلاف بین مدل و داده های تجربی از آن یاد کرد، وجود نقص های ساختاری است که در مواد مورد استفاده وجود دارد. همچنین، در این شبیه سازی

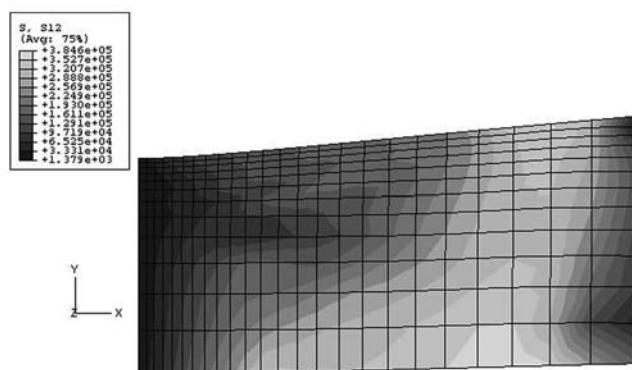


شکل ۶ - مقایسه منحنی بار - جابه جایی حاصل از نتایج تجربی و عددی تورفتگی دیواره ساندویچی.

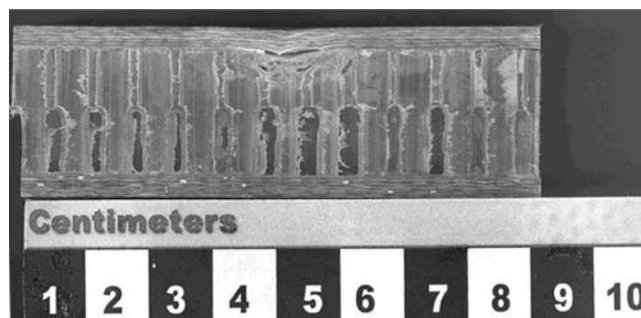


شکل ۱۰ - میزان تنش مستقیم S_{22} پیش‌بینی شده در هسته برحسب پاسکال.

مطابق انتظار بیشترین مقدار تنش برشی در دیواره ساندویچی در ناحیه تماس بین میله اعمال‌کننده بار و پوسته ایجاد می‌شود. شکل ۱۱ تغییرات تنش برشی (S_{12}) پیش‌بینی شده را در هسته نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که کمترین مقدار تنش برشی در نواحی زیر استوانه اعمال‌کننده بار ایجاد می‌شود و بیشترین مقدار تنش برشی در نواحی مرکزی این شکل مشاهده می‌شود و با نزدیک شدن از مرکز نمونه به کناره‌ها تنش برشی ایجاد شده کاهش می‌یابد. این امر به آن دلیل است که نیرویی از بالا اعمال شده و سمت چپ هسته را حرکت می‌دهد، در حالی که ضلع سمت راست تقریباً ثابت نگه داشته می‌شود. بدین ترتیب اجزای واقع در مرکز این شکل از سمت چپ به طرف پایین کشیده شده و از سمت راست نیرویی به آنها وارد می‌شود تا ثابت باقی بمانند. در نتیجه نیروی برشی شدیدی در مرکز شکل ایجاد می‌شود. مقدار بیشینه تنش برشی ایجاد شده در هسته 0.438 MPa و کمترین مقدار تنش برشی در هسته 13 kPa است.



شکل ۱۱ - میزان تنش برشی S_{12} پیش‌بینی شده در اجزای هسته برحسب پاسکال.

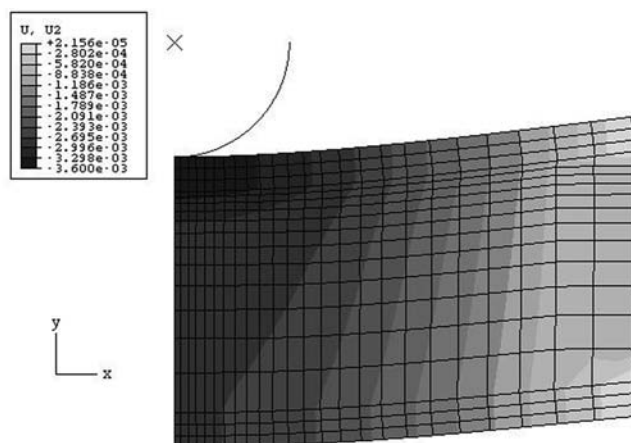


شکل ۸ - ناحیه آسیب دیده در هسته در اثر اعمال 6 mm جابه‌جایی.

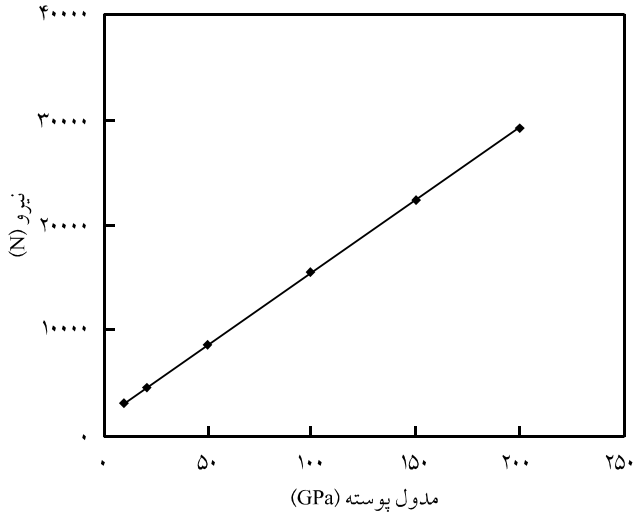
به جز نواحی که با رنگ روشن نشان داده شده و به مقدار بسیار کشیده شده‌اند، سایر نقاط مدل فشرده شده‌اند.

مطالعه توزیع تنش در سازه‌ها می‌تواند به درک بهتر سازه و کار تغییر شکل آنها کمک شایانی کند. شکل ۱۰ تنش مستقیم را در جهت عمودی (S_{22}) ایجاد شده در دیواره ساندویچی نشان می‌دهد.

به دلیل اختلاف تنش زیاد بین رویه و هسته تفاوت تنش در نقاط مختلف هسته را نمی‌توان در شکل کامل مشاهده کرد. از این رو، برای ایجاد وضوح بیشتر در شکل فقط اجزای مربوط به هسته نشان داده شده است. به جز ناحیه بالای سمت راست نمونه که مقدار تنش مثبت است، یعنی کشش وارد می‌شود، در سایر بخش‌ها مشاهده می‌شود که هسته تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد. بیشترین مقدار تنش فشاری، 0.51 MPa در ناحیه‌ای است که بیشترین جابه‌جایی عمودی اعمال می‌شود و با فاصله گرفتن از این ناحیه مقدار آن تا 0.13 MPa کاهش می‌یابد.



شکل ۹ - میزان جابه‌جایی پیش‌بینی شده برحسب میلی‌متر در جهت عمودی در نقاط مختلف دیواره ساندویچی.

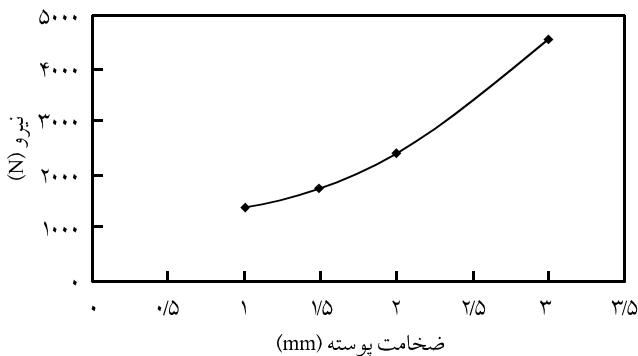


شکل ۱۴ - منحنی تغییرات نیروی واکنش با مدول پوسته.

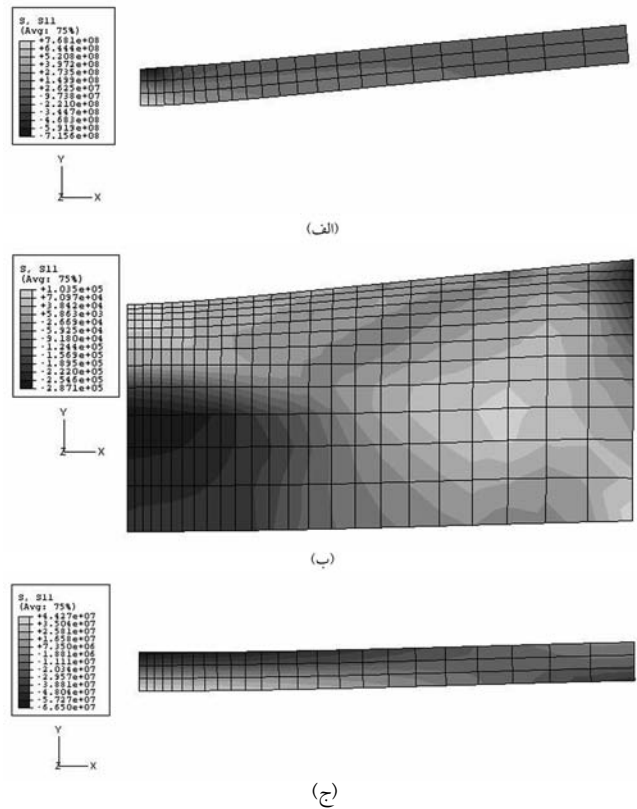
همین مورد در پوسته پایین هم دیده می شود، یعنی سطح رویی پوسته پایین دچار تنش فشاری شده و سطح زیری آن دچار تنش کششی شده است. اما، در هسته عکس این حالت مشاهده می شود. یعنی سطح رویی آن دچار تنش کششی و سطح زیرین آن تحت تنش فشاری قرار گرفته است. به نظر می رسد، این حالت به دلیل اثر پوسته باشد.

در نقاطی که هسته با پوسته در تماس است، کاملاً از پوسته تبعیت می کند. یعنی اگر در فصل مشترک پوسته کشیده شود، هسته هم در زیر آن کشیده می شود و اگر پوسته فشرده شده باشد، هسته هم در نقاط تماس با پوسته فشرده می شود.

در شکل ۱۳ مقدار کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده در دیواره ساندویچی نشان داده شده است. این کمیت حاصل جمع مؤلفه های کرنش پلاستیک ایجاد شده در جهات مختلف است. مشاهده می شود که کرنش پلاستیک ایجاد شده در هسته در جهت (x) گسترش

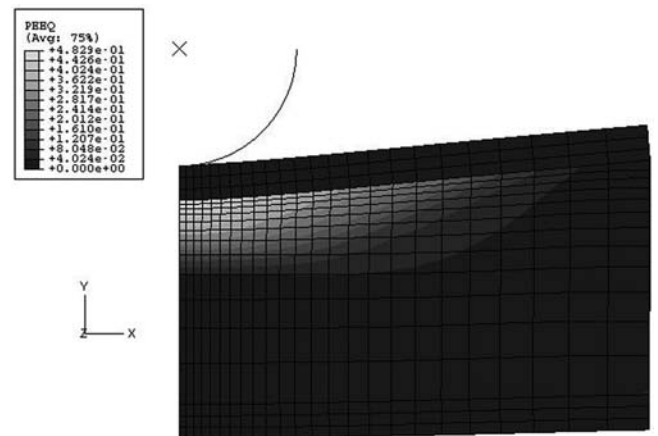


شکل ۱۵ - منحنی تغییرات نیروی واکنش با ضخامت پوسته.



شکل ۱۲ - میزان تنش مستقیم S_{11} پیش بینی شده: (الف) در پوسته بالا، (ب) در هسته و (ج) در پوسته پایین بر حسب پاسکال.

در شکل ۱۲ تنش مستقیم پیش بینی شده در جهت افقی (S_{11}) در پوسته بالایی (الف)، هسته (ب) و پوسته پایینی (ج) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که سطح بالایی پوسته بالا فشرده شده است و سطح زیرین آن تحت کشش قرار گرفته است. نظیر



شکل ۱۳ - میزان کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در دیواره ساندویچ.

نتیجه‌گیری

بررسی رفتار ساختارهای ساندویچی در برابر بارهای متمرکز اهمیت زیادی دارد. در این مقاله سعی شد، رفتار تورفتگی دیواره ساندویچی لانه زنبوری گرمانرم شبیه‌سازی شوند. به دلیل عدم وجود مدل موادی مناسب برای لانه زنبوری‌ها سعی شد، با توجه به شباهت‌های زیادی که میان رفتار اسفنج‌ها و لانه زنبوری‌ها وجود دارد، از مدل موادی ویژه اسفنج‌ها برای لانه زنبوری استفاده شود. در مقادیر کم جابه‌جایی نتایج حاصل از تحلیل عددی انطباق خوبی با نتایج تجربی نشان دادند. به دلیل ایجاد آسیب در پوسته و همچنین نقص‌های موجود در نمونه‌های واقعی، در جابه‌جایی‌های نسبتاً بالا انطباق نتایج تجربی و عددی به تدریج کمتر می‌شود که این امر در شبیه‌سازی دیواره‌های ساندویچی دارای هسته اسفنجی نیز مشاهده می‌شود.

در نتیجه به نظر می‌رسد مدل Crushable Foam در جابه‌جایی‌های نسبتاً کم (حدود ۱۵ درصد ضخامت نمونه) قابلیت شبیه‌سازی رفتار مکانیکی لانه زنبوری‌های گرمانرم را دارد و در تحلیل‌های ساده نیازی به استفاده از مدل‌های موادی پیچیده برای لانه زنبوری‌های گرمانرم نیست. در نهایت اثر پارامترهایی نظیر ضخامت و مدول پوسته بر نیروی واکنش ایجاد شده بر اثر ۳/۶ mm جابه‌جایی میله اعمال‌کننده بار بررسی و معلوم شد که ضخامت پوسته بیش از مدول آن بر نیروی واکنش ایجاد شده به وسیله دیواره ساندویچی اثر دارد.

قدردانی

بدین وسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران کشور به دلیل حمایت مالی از طرح پژوهشی لانه زنبوری‌های گرمانرم با کد پروژه ۸۴۰۴۶ صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- Gibson L.J. and Ashby M.F., Cellular Solids Structure and Properties, Pergamon, 1-174, 1998.
- Bitzer T., Honeycomb Technology - Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing, Chapman and Hall, 1-199, 1997.
- Passaro A., Corvaglia P., Manni O. and Barone L., Processing-properties Relationship of Sandwich Panels with Polypropylene-core and Polypropylene-matrix Composite Skins, Polym. Compos., 25, 307-318, 2004.
- Ning H., Janowski G.M., Vaidia U.K. and Husman G., Thermoplastic Sandwich Structure Design and Manufacturing for the Body Panel of Mass Transit Vehicle, Compos. Struct., 80, 82-91, 2007.
- Khatibi M.A. and Rahimi H., Fabrication Process and Investigation of Properties of Thermoplastic Honeycomb Sandwich Panels, J. Polym. Sci. Technol. (Persian), 6, 345-381, 2005.
- Meraghni F., Desrumaux F. and Benzeggagh M.L., Mechanical Behaviour of Cellular Core for Structural Sandwich, Compos-

یافته است و ناحیه نسبتاً بزرگی دچار کرنش پلاستیک شده است. این امر به این دلیل است که رویه‌ها باعث توزیع تنش در جهت (x) شده و کرنش پلاستیک در جهت (x) گسترش یافته و در جهت (y) محدود می‌شود. در این شکل هم مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار کرنش پلاستیک در ناحیه زیر جسم فرورونده ایجاد می‌شود.

در ادامه اثر مدول پوسته و ضخامت پوسته بر مقدار نیروی لازم برای ایجاد مقدار معینی جابه‌جایی خاص بررسی شد. به این منظور ابتدا پوسته‌هایی با مدول‌های متفاوت در مدل در نظر گرفته شده و مقدار نیروی واکنش ایجاد شده محاسبه شد.

نتایج به دست آمده در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مدول پوسته از ۱۰ تا ۲۰۰ GPa نیروی واکنش ایجاد شده در محل اعمال نیرو به پوسته تقریباً به طور خطی از ۳/۱ تا ۲۹/۴ kN افزایش می‌یابد.

همچنین، اثر ضخامت پوسته بر نیروی واکنش بررسی شد. چهار پوسته با ضخامت متفاوت اما با مدول یکسان (۱۹ GPa) در نظر گرفته شد و مقدار نیروی واکنش ایجاد شده در نتیجه اعمال ۳/۶ mm جابه‌جایی محاسبه شد.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت پوسته نیروی واکنش افزایش می‌یابد، اما برخلاف مورد قبل این افزایش به شکل خطی نیست.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که چنانچه مدول پوسته نصف شود، یعنی از ۲۰ به ۱۰ GPa کاهش یابد، نیروی واکنش از ۴۵۶۴ به ۳۰۷۴ N می‌رسد، اما چنانچه مدول پوسته ثابت نگه داشته شود و ضخامت پوسته نصف شود، یعنی از ۳ به ۱/۵ mm کاهش یابد، نیروی واکنش از ۴۵۶۴ به ۱۷۸۷ N کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که ضخامت بیش از مدول پوسته بر مقدار نیرویی که دیواره ساندویچی قادر است، تحمل کند اثر دارد.

- ites, **30A**, 767-779, 1999.
7. Barikani M. and Omidian H., Honeycombs, *J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **1**, 4-10, 1991.
 8. Barikani M. and Omidian H., Effective Parameters in Selection of Adhesive for Sandwich Panels and Honeycombs, *J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **4**, 236-246, 1992.
 9. Zenkert D., Shipsha A. and Persson K., Static Indentation and Unloading Response of Sandwich Beams, *Composites*, **35B**, 511-522, 2004.
 10. Mirzapour A., Beheshty M.H. and Vafayan M., The Response of Sandwich Panels with Rigid Polyurethane Foam Cores under Flexural Loading, *Iran. Polym. J.*, **14**, 1082-1088, 2005.
 11. Beheshty M.H., Kadkhodaieyan M.A. and Vafayan M., Effect of Simultaneous and Single Curing Processes on Properties of Phenolic Sandwich Structures, *J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **14**, 151-157, 2005.
 12. Rizov V.I., Non-linear Indentation Behavior of Foam Core Sandwich Composite Materials-A 2D Approach, *Computational Mater. Sci.*, **35**, 107-115, 2006.
 13. Koissin V., Shipsha A. and Rizov., The Inelastic Quasi-static Response of Sandwich Structures to Local loading, *Compos. Struct.*, **64**, 129-138, 2004.
 14. Chung J. and Waas A.M., Compressive Response of Circular Cell Polycarbonate Honeycombs under In-plane Biaxial Static and Dynamic Loading. Part II: Simulation, *Int. J. Impact Eng.*, **27**, 729-754, 2002.
 15. Papka S.D. and Kyriakides S., In-plane Biaxial Crushing of Honeycombs, Part II: Analysis, *Int. J. Solid. Struct.*, **36**, 4379-4423, 1999.
 16. Nguyen M.Q., Jacombs S.S., Thomson R.S., Hachenberg D. and Scott M.L., Simulation of Impact on Sandwich Structures, *Compos. Struct.*, **67**, 217-227, 2005.
 17. Aktai L., Johnson A.F. and Kroplin B.H., Numerical Modelling of Honeycomb Core Crush Behavior, *Eng. Fracture Mech.*, In Press, 2007.
 18. Meo M., Morris A.J., Vignievic R. and Marengo G., Numerical Simulation of Low-velocity Impact on an Aircraft Sandwich Panel, *Compos. Struct.*, **62**, 353-360, 2003.
 19. Qiao P. and Yang M., Impact Analysis of Fiber Reinforced Polymer Honeycomb Composite Sandwich Beams, *Composites*, **38B**, 739-750, 2007.
 20. Xie Z. and Vizini A.J., A Feasible Methodology for Engineering Application in Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures, *J. Compos. Mater.*, **38**, 891-914, 2004.
 21. Zhenyu X. and Hutchinson J.W., Constitutive Model for Quasi-static Deformation of Metallic Sandwich Cores, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **61**, 2205-2238, 2004.
 22. Zhou D.W. and Stronge W.J., Dynamic Indentation of Lightweight Sandwich Panels, [http:// www.msm.cam.ac.uk](http://www.msm.cam.ac.uk), available on 15 July 2007.
 23. Rizzi E., Papa E. and Corigliano A., Mechanical Behavior of a Syntactic Foam: Experiments and Modeling, *Int. J. Solid. Struct.*, **37**, 5773-5794, 2000.
 24. Quinn J.A., Composite Design Manual, James Quinn Associate Ltd, 2002.
 25. Khalili V., *Experimental and Numerical Study of Processing and Geometrical Variables on Mechanical Properties of Thermoplastic Honeycombs*, MSc Thesis, Iran Polymer and Petrochemical Institute, March 2008.
 26. Deshpande V.S. and Fleck N.A., Isotropic Constitutive Models for Metallic Foams, *J. Mech. Phys. Solid.*, **48**, 1253-1283, 2000.