مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال هفدهم،
شماره ۶ صفحه ۳۵۱-۳۴۵، ۱۳۸۳
ISSN : 1016-3255

ساخت و بررسی خواص صفحات ساندویچی لانه‌زنبوری گرمانرم

Fabrication Process and an Investigation of Properties of Thermoplastic Honeycomb Sandwich Panels

مرادعلی خطیبی، حمید رحیمی*

تهران ، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه کامپوزیت و چسب

صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت : ۸۲/۱۲/۴، پذیرش : ۸۳/۷/۲۰

چکیده

صفحات لانه‌زنبوری با توجه به وزن نسبتاً کم و خواص مکانیکی عالی کاربردهای ساختاری زیادی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. لایه میانی این ساختارها معمولاً از آلومینیم، پلاستیک‌های تقویت‌شده و مواد نسبتاً گران قیمت از قبیل Nomex که بطور عمده در صنایع هوا فضا کاربرد دارد، ساخته می‌شود. اخیراً صفحات لانه‌زنبوری جدید وارد بازار شده که از مواد نسبتاً ارزان قیمت همچون پلی پروپیلن (PP) و پلی‌کربنات (PC) تهیه می‌شوند. هدف از این پژوهش، دستیابی به فناوری طراحی و ساخت صفحات ساندویچی لانه‌زنبوری است که لایه میانی یا هسته آنها از ماده گرمانرم PP و لایه‌های خارجی از چوب یا کامپوزیت‌های طبیعی تشکیل شده است. پس از ساخت نمونه‌ها، خواص فیزیکی و مکانیکی و مکانیسم شکست این نوع کامپوزیت ها بررسی شد. نتایج نشان داد که این ساختارها در مقابل فشار همانند فنر عمل می‌کنند و برای تغییر شکل آنها انرژی نسبتاً زیادی مورد نیاز است. همچنین، پس از بررسی‌ها مشخص شد که افزایش ضخامت لایه میانی اثر چندانی روی خواص فشاری ندارد اما خواص خمشی با افزایش ضخامت به شکل قابل توجهی افزایش می یابد بدون آنکه تغییر زیادی در وزن آنها مشاهده شود.

واژه‌های کلیدی

ساختار لانه زنبوری ، کامپوزیت، گرمانرم، پلی‌پروپیلن، صفحات ساندویچی

مقدمه

ساختارهای لانه زنبوری دارای آرایشی با سلول‌های باز است که از اتصال دیوارهای بسیار نازک به وجود می‌آیند. سطح مقطع سلول ها معمولاً به شکل شش وجهی و یا اشکال هندسی دیگر است. در شکل ۱ ساختار لانه زنبوری با مقطع شش وجهی نشان داده شده است [۳-۱].

ایده ساختار لانه‌زنبوری از لانه زنبورهای عسل در طبیعت گرفته شده‌است و تاکنون بیشتر از ۵۰۰ نوع از این ساختار ساخته شده‌است. ساختار لانه‌زنبوری کاغذی ۲۰۰۰ سال قبل توسط چینی‌ها ساخته شد که

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: H.Rahimi@ippi.ac.ir

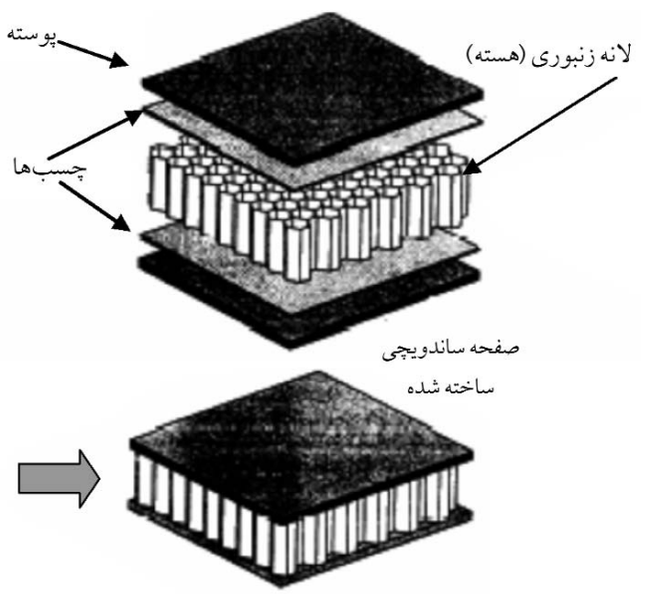
Key Words

honeycomb structure, composite, thermoplastic, polypropylene, sandwich panels

هم‌اکنون مبدأ ساختار لانه‌زنبوری‌های کاغذی است [۳].

اولین بار ساختار لانه‌زنبوری کاغذی برای بسته‌بندی مورد استفاده قرار گرفت [۳-۱]. پس از آن ساختار لانه‌زنبوری در تیرهای افقی راه آهن استفاده شد که به شکل لوله‌ای ساخته شده بودند. ویژگی منحصر بفرد ساختارهای ساندویچی لانه زنبوری استحکام خمشی زیاد و وزن کم آنهاست که سبب توجه روزافزون به این ساختارها شده است. امروزه در بسیاری از صنایع مثل صنایع هوا فضا، کشتی‌سازی و قایق‌سازی، نظامی، خودروسازی و ساختمان، ساختارهای ساندویچی کاربرد فراوانی دارند [۳].

در حال حاضر پرمصرفترین نوع لانه زنبوری با استفاده از چسب ها برای متصل کردن ورقه‌های تشکیل دهنده هسته به یکدیگر و به پوسته‌ها ساخته می‌شوند. نوع معمول لانه زنبوری، نوع فلزی با روکش مقاوم در برابر خوردگی مثل فولاد، تیتانیم و آلیاژهای بر پایه نیکل است که اصولاً هسته‌های فلزی در کاربردهای با دمای زیاد استفاده می‌شوند و پوسته های مورد نظر به روش پیوند نفوذی یا جوش برنج به این هسته‌ها متصل می‌شوند. نمونه‌ای از صفحه ساندویچی که در شکل ۱ نشان داده شده، شامل هسته لانه زنبوری و دو پوسته نازک است که به وسیله لایه های چسب به هسته اتصال یافته اند. از لانه زنبوری علاوه بر ساخت صفحات ساندویچی به عنوان جذب کننده انرژی، پوشش دهنده فرکانس های رادیویی، منافذ نوری و هدایت کننده جریان هوا نیز استفاده می شود. همان گونه که قبلاً اشاره شد مواد گوناگونی به شکل لانه زنبوری به عنوان هسته در ساختارهای ساندویچی بکار می روند [۵-۳].



شکل ۱ - نمایی از اجزای لانه زنبوری.

در سال‌های اخیر استفاده از گرمانرم‌ها برای ساخت هسته لانه زنبوری‌ها به دلیل داشتن استحکام ویژه زیاد و وزن کم به شکل رایج درآمده است. از جمله کاربردهای این نوع لانه‌زنبوری‌ها در پوشش داخلی ساختمان‌ها، قایق‌سازی و وسایل ورزشی است [۶]. پلی‌پروپیلن از پرمصرفترین، در دسترس‌ترین و ارزانترین مواد گرمانرم است که در ساخت لانه‌زنبوری‌ها استفاده می‌شود [۷]. این لانه زنبوری‌ها از چگالی نسبتاً کم، مقاومت زیاد در مقابل خوردگی مواد شیمیایی مانند اسیدها، بازها و روغن‌ها، استحکام ضربه‌ای زیاد، استحکام و مدول فشاری ویژه نسبتاً زیاد، استحکام و مدول خمشی مطلوب برخوردارند. همچنین، جاذب خوب انرژی و ارتعاش و عایقی مناسب در مقابل صدا هستند [۸]. استفاده از هسته لانه‌زنبوری گرمانرم در ساختارهای ساندویچی به دلیل توزیع بارهای اعمالی و تنش موضعی به سطح، گسترده و وسیع است. توزیع بار موضعی، تنش وارد شده به سطح را کاهش می‌دهد. بنابراین، ساختارهای ساندویچی مقاومت بسیار زیادی در مقابل خمش، پیچش و فشار دارند [۹]. این ساختارها از قابلیت ارتجاعی بسیار زیادی برخوردار بوده، در مقابل تنش‌های ضربه‌ای ایستا و پویا نیز مقاومند. خواص مهندسی ویژه این مواد باعث شده است که ساختارهای ساندویچی گرمانرم به مرور جایگزین فلزات در صنایع شوند [۸]. در این مقاله گزارشی از ساخت صفحات لانه‌زنبوری با هسته مواد گرمانرم دارای سلول‌های استوانه‌ای شکل ارائه می‌شود.

تجربی

مواد

در این پژوهش، برای تهیه ساختار لانه‌زنبوری پلی‌پروپیلن با نام تجاری PPR۶۰ تولید شرکت پتروشیمی اراک با شاخص جریان مذاب برابر ۰/۲g/۱۰min و شرایط وزنه ۲/۱۶kg و دمای ۲۳۰°C بکار رفت.

برای آماده‌سازی سطح پلی‌پروپیلن از کرومیک اسید شامل سولفوریک اسید ۹۷ درصد مرک، پتاسیم دی کرومات مرک و آب مقطراستفاده شد. برای اتصال لوله‌های پلی‌پروپیلن چسب اپوکسی دوجزئی بر پایه نوعی اپوکسی آلیفاتیک بکار گرفته شد. از الیاف پلی‌استر نبافته (که بین لایه میانی و پوسته قرار می‌گیرد) با نام تجاری Matline ۲۰۰ تولید شرکت Nida-Core آمریکا استفاده شد. همچنین، چوب سه لایه راش برای پوسته‌ها بکار رفت.

دستگاه‌ها

در این پژوهش، برای انجام آزمایش کشش از دستگاه Instron مدل

۶۰۲۵ ساخت انگلستان، برای اندازه گیری زاویه تماس از دستگاه (G۱۰ Krüss (Contact Angle Measuring System ساخت آلمان، برای تولید لوله های PP از دستگاه اکسترودر ساخت شرکت Jambo Steel تایوان و همچنین از دستگاه پرس ۲۵ ton ساخت ماشین سازی حقیقت ایران استفاده شد.

روش ها

اصلاح سطح لوله های PP با استفاده از روش ASTM D۲۰۹۳ انجام شد. برای بررسی خواص فشاری و خمشی صفحات لانه زنبوری از آزمون فشاری مطابق روش ASTM C۳۶۵-۹۴ و آزمون خمشی مطابق روش ASTM C۳۹۳ استفاده شد. ابعاد نمونه ها برای آزمون فشاری mm^2 ۷۵ × ۷۵ و برای آزمون خمشی mm^2 ۵۰ × ۲۵۰ در نظر گرفته شد و برای سه ضخامت ۱۷/۲۶، ۲۷/۶۶ و mm ۴۷/۴۶ آزمون انجام شد. سرعت دستگاه کشش برای آزمون های فشاری و خمشی mm/min ۲ بود.

روش ساخت لانه زنبوری

تهیه لوله های PP

برای تولید لوله ها از اکسترودر تایوانی مخصوص ساخت لوله های نوشیدنی استفاده شد. ناحیه های گرمایی آن از ۱۸۰ تا ۲۳۰°C تنظیم شد. برای بدست آوردن سطح مقطع دایره‌ای و قطر یکنواخت لوله ها از دستگاه خلأ بعد از اکسترودر و همچنین، حمام آب برای سرد کردن لوله ها استفاده شد.

آماده سازی سطح و اندازه گیری زاویه تماس روی سطح PP

آماده سازی سطح ورقه های PP با استفاده از محلول کرومیک اسید انجام شد. سپس، برای ارزیابی اصلاح سطح زاویه تماس اندازه گرفته شد. قابل ذکر است که سطح لوله های PP به مدت h ۴ و در دمای ۴۰°C اصلاح شده و پس از آن لوله ها در دمای ۷۰°C خشک شدند.

عملیات چسباندن لوله ها

برای چسباندن لوله ها از چسب اپوکسی رقیق شده با ۵۰ درصد حلال استفاده شد. لوله های آغشته شده در درون قالب به مدت min ۱۲ و در دمای ۱۱۰°C برای انجام عملیات پخت در گرمخانه قرار گرفتند. سپس، برای کامل شدن پخت، به مدت h ۳ دیگر در دمای ۵۰°C در گرمخانه گذاشته شدند، به این ترتیب هسته ساختار لانه زنبوری آماده شد.

برش لانه زنبوری

برش هسته به ضخامت های دلخواه به وسیله سیم داغ با منبع تغذیه برق متناوب ۲۰V با استفاده از المان گرمایی که در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران طراحی و ساخته شده است، انجام گرفت.

چسباندن پوسته ها به هسته

چسباندن هسته به پوسته یکی از مهمترین مرحله تهیه ساختار لانه زنبوری است که در این مرحله ابتدا لایه پلی استر نبافته‌ای روی چوب چند لایه با چسب اپوکسی چسبانده شد و پس از آن دو پوسته در دوطرف هسته قرار گرفته، کل مجموعه در دستگاه پرس در فشار اتمسفر قرار داده شد. این ساختار به مدت h ۲۴ در دمای محیط تحت فشار قرار گرفت تا پخت اپوکسی بطور کامل انجام گیرد. به این ترتیب ساختار لانه زنبوری با ضخامت های مختلف تهیه شد. شکل ۲ نمونه‌ای از ساختار ساندویچی لانه زنبوری نهایی را نشان می دهد.

نتایج و بحث

خواص لوله های PP

مشخصات لوله های PP تولید شده به کمک فرایند اکستروژن در جدول ۱ آمده است.

اندازه گیری زاویه تماس

نتایج اندازه گیری زاویه تماس در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان می دهد که با استفاده از کرومیک اسید سطح آبدوستی بدست می آید که نتایج بدست آمده قبل و بعد از اصلاح سطح تأییدکننده این مطلب است. کاهش زاویه تماس، نشان دهنده اکسایش سطح و آبدوست شدن آن است.

شکل ۲ - ساختار ساندویچی ساخته شده نهایی.

جدول ۱ ـ مشخصات لوله‌های تولید شده.

نوع ماده	چگالی (g/cm^3)	قطر خارجی لوله‌ها (mm)	ضخامت جداره لوله‌ها (μm)
کوپلیمر پلی پروپیلن، نوع R۶۰ پتروشیمی اراک	۰/۹	۶/۲	۱۵۰

چنانچه در این جدول دیده می‌شود با استفاده از اصلاح سطح زاویه تماس بشدت کاهش پیدا کرده و به عبارتی سطح آبدوست‌تر شده است به این ترتیب چسبندگی افزایش خواهد یافت.

مشخصات لانه‌زنبوری‌های تهیه شده

ضخامت ساختارهای ساندویچی لانه زنبوری‌های تهیه شده ۱۷/۲۶، ۲۷/۶۶ و ۴۷/۴۶ mm اندازه‌گیری شد. در جدول ۳ برخی از خصوصیات فیزیکی این نوع ساختارها آمده است.

چنانچه در این جدول دیده می‌شود، با افزایش ضخامت لایه میانی تغییر زیادی در وزن لانه‌زنبوری دیده نمی‌شود که این از مشخصات بارز لانه‌زنبوری‌هاست.

آزمون‌های مکانیکی انجام‌شده روی لانه‌زنبوری

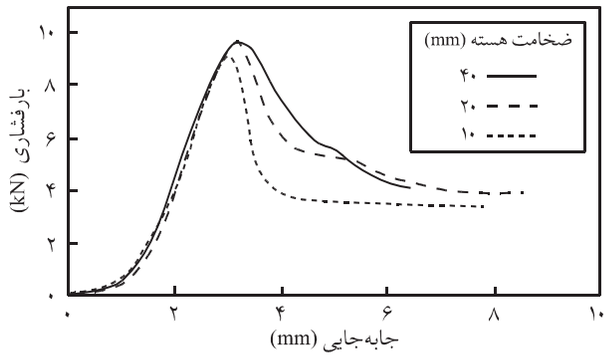
از آنجا که اهمیت ساختارهای لانه‌زنبوری در داشتن استحکام فشاری و خمشی زیاد آنهاست بنابراین، آزمون‌های فشاری و خمشی روی این ساختارها انجام گرفت.

آزمون فشاری

هدف از انجام این آزمون بدست آوردن نیروی شکست فشاری لانه‌زنبوری و میزان تغییر شکل آن بود.

جدول ۲ ـ نتایج آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس روی سطوح.

نوع اصلاح سطح / حلال	زاویه تماس	
	قبل از آماده‌سازی سطح	بعد از آماده‌سازی سطح
آب	۱۰۹/۴	۶۵/۶
فرمامید	۹۲/۷	۵۳/۳
اتیلن گلیکول	۸۲	۴۷/۵

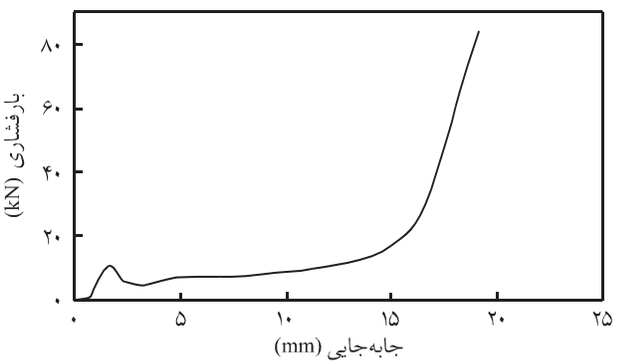


شکل ۳ - نمودار مقاومت فشاری لانه زنبوری بر حسب تغییر شکل.

بطوری که در شکل ۳ دیده می‌شود با افزایش ضخامت درصد جمع‌شدگی افزایش یافته است. همان‌طور که از شکل پیداست استحکام فشاری ساختارهای ساندویچی با ضخامت های مختلف تقریباً یکسان است. بنابراین، با افزایش ضخامت لایه میانی استحکام فشاری لانه‌زنبوری تغییر چندانی نمی‌کند. البته شایان ذکر است که این نتیجه‌گیری محدود به متغیرهایی است که در این پژوهش بررسی شده است.

مکانیسم شکست لانه‌زنبوری در برابر نیروی فشاری

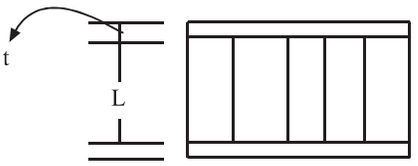
این آزمون برای بررسی مقاومت لانه‌زنبوری در تغییر شکل های زیاد انجام گرفت. لانه زنبوری با ضخامت (2L) با پوسته چوب چندلایه تا ۷۰ درصد ضخامت اولیه تحت فشار قرار گرفت. رفتار فشاری لانه زنبوری شبیه گرمانرم‌ها بود به این معنی که در نمودار نقطه تسلیم، ناحیه تخت و سخت شدن در اثر تنش به وضوح قابل مشاهده است. نتایج در شکل ۴ گزارش شده است. هدف اصلی از این آزمون بررسی میزان برگشت‌پذیری لانه زنبوری پس از برداشتن فشار اعمالی بود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. چنان که دیده می‌شود سطح زیر منحنی بسیار



شکل ۴ ـ نمودار مقاومت فشاری ساختار ساندویچی در تغییر شکل های زیاد.

جدول ۳ ـ برخی از مشخصات لانه زنبوری گرمانرم و ساختار تهیه شده از آن.

مشخصات / ضخامت اسمی هسته (mm)	لانه زنبوری گرمانرم		ساختار ساندویچی تهیه شده	
	ضخامت (mm)	وزن (kg/m^2)	ضخامت (mm)	وزن (kg/m^2)
L (۱۰)	۱۰/۶	۰/۸۳	۱۷/۲۶	۵/۵۲
۲L (۲۰)	۲۰	۱/۶۲	۲۷/۶۶	۶/۴۸
۲L (۴۰)	۴۰/۳	۳/۴۳	۴۷/۴۶	۸/۱۶

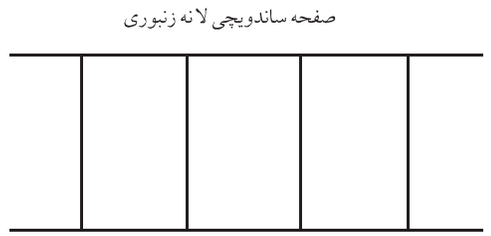


زیاد است که به دلیل جذب انرژی فوق‌العاده زیاد ساختارهای ساندویچی است.

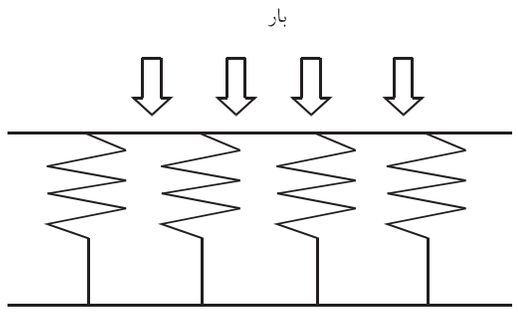
مکانیسم تغییر شکل لانه زنبوری بر اثر نیروی فشاری در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست لانه زنبوری ابتدا در مقابل فشار وارده مقاومت می‌کند. افزایش فشار باعث تغییر شکل لانه زنبوری می‌شود. این تغییر شکل بسیار کند است. هر کدام از سلول‌های استوانه‌ای شکل همانند فنر عمل کرده و شروع به جمع شدن می‌کند. جمع شدگی از محل اعمال بار آغاز و شروع به پیشرفت می‌کند.

با افزایش تغییر شکل نیروی وارد شده بشدت زیاد می‌شود و این نشان می‌دهد که برای تغییر شکل نیروی بسیار زیادی مورد نیاز است. با برداشتن نیرو، لانه زنبوری تا اندازه زیادی به حالت اول برمی‌گردد. این برگشت‌پذیری کامل نیست چون هسته گرمانرم دچار تغییر شکل دائمی و یا خزش شده، به همین دلیل نمی‌تواند به حالت اول برگردد.با این حال برگشت پذیری نسبی پس از تغییر شکل امتیاز بزرگی برای این گونه لانه زنبوری‌هاست [۱۰].

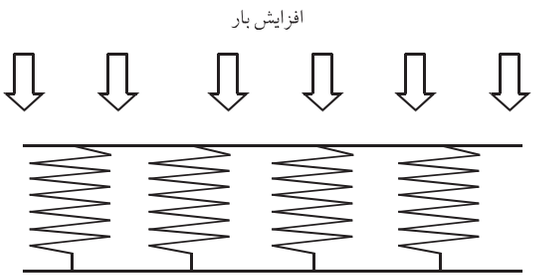
چنانچه در این شکل دیده می‌شود، عکس‌العمل هر کدام ازلوله‌ها در



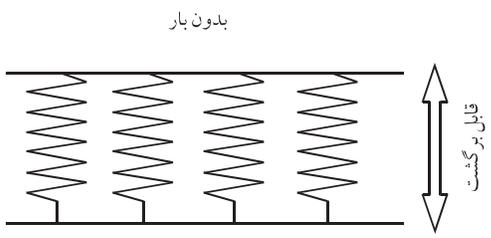
(الف) ساختار ساندویچی لانه زنبوری گرمانرم قبل از اعمال فشار.



(ب) اثر فشار بر ساختار ساندویچی لانه زنبوری گرمانرم.

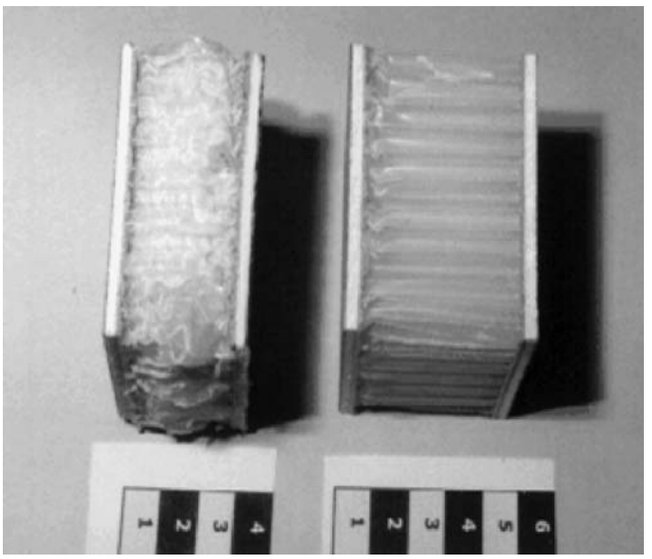


(ج) اثر افزایش فشار بر ساختار ساندویچی لانه زنبوری گرمانرم.



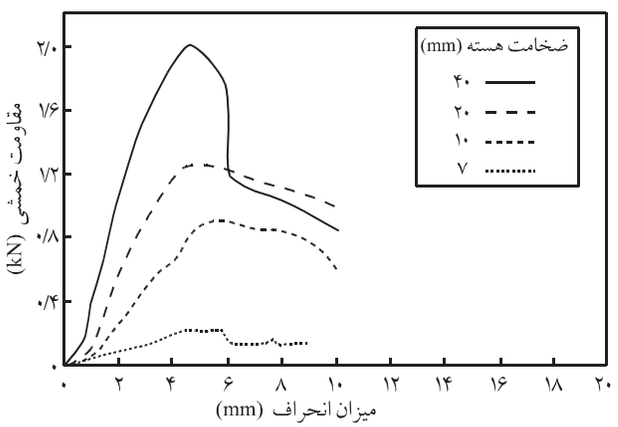
(د) پس از برداشتن فشار.

شکل ۵ ـ اثر اعمال بار فشاری بر ساختار لانه زنبوری گرمانرم.



شکل ۶ ـ برگشت‌پذیری ساختار لانه زنبوری پس از برداشتن نیروی فشاری.

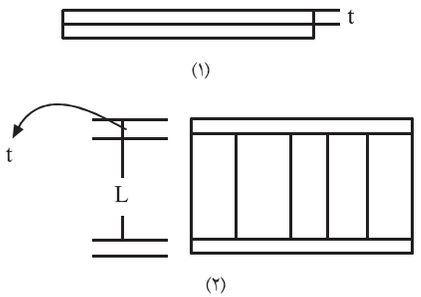
مقابل نیرو به شکل فنر است. با افزایش نیرو ساختار ساندویچی بیشتر فشرده شده، میزان تغییر شکل نیز بیشتر می‌شود. این فرایند تغییر شکل چنانچه در سطح زیر منحنی(نیرو ـ تغییر شکل) دیده می‌شود با جذب انرژی زیادی همراه است. پس از برداشتن نیرو درصدی از تغییر شکل به حالت اولیه برمی‌گردد که از خواص ذاتی گرمانرم‌هاست و امتیاز محسوب می‌شود. در شکل ۶ ساختار آکاردئونی شکل بخوبی نشان داده شده است در صورتی که برای لانه زنبوری‌های از نوع پلاستیک‌های تقویت شده این ویژگی مشاهده نمی‌شود [۱۰،۱۱]. با برشی که از کناره نمونه تغییر شکل یافته بدست آمد مشاهده شد که در لانه‌زنبوری با ضخامت اسمی ۴۰mm تعداد ۱۰ دندانه ایجاد شده است و هرچه



شکل ۷ ـ نمودار مقاومت خمشی در مقابل میزان خمش برای ساختارهای ساندویچی لانه زنبوری‌های با ضخامت‌های مختلف.

جدول ۴ ـ مقایسه استحکام برخی خواص ساختارهای ساندویچی لانه زنبوری گرمانرم.

خواص / ضخامت اسمی هسته (mm)	استحکام خمشی نسبی	مدول خمشی نسبی
دو لایه چوب به ضخامت ۶ mm	۱	۱
L (۱۰)	۴/۵	۴/۳۵
۲L (۲۰)	۶/۴	۷
۴L (۴۰)	۱۰/۵	۱۲/۸۷



(۱) نمونه دو لایه چوب به هم چسبیده، (۲) نمونه‌های لانه زنبوری L تا ۴L.

ضخامت لایه بیشتر باشد تعداد این دندانه‌ها بیشتر خواهد بود.

آزمون خمشی

برای بررسی خواص خمشی لانه زنبوری ها آزمون خمشی انجام شد. آزمون به روش خمش سه نقطه‌ای انجام شد که نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لانه‌زنبوری، میزان استحکام خمشی به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. نتیجه دیگر این است که ساختار ساندویچی لانه زنبوری در مقایسه با چوب چندلایه، از استحکام خمشی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. مقایسه استحکام خمشی چوب چند لایه با ساختارهای لانه‌زنبوری گرمانرم نسبت به استحکام خمشی چوب چند لایه در جدول ۴ آورده شده است که خود مؤید این مطلب است.

نتیجه‌گیری

نتیجه بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهدکه بطور کلی چسبندگی لوله‌های PP به همدیگر بدون اصلاح سطح امکان‌پذیر نیست. فرایند

آماده سازی سطح باعث افزایش چسبندگی و در پی آن افزایش استحکام فشاری و خمشی در ساختارهای لانه‌زنبوری می‌شود. این اثر در مکانیسم‌های شکست نمونه‌ها مشخص است. آزمون‌های انجام‌شده نشانگر چسبندگی مطلوب بین لوله‌های هسته و همچنین اتصال قوی بین پوسته و هسته است. استحکام فشاری صفحات لانه‌زنبوری با افزایش ضخامت هسته آن تقریبا ثابت است. استحکام خمشی و مدول خمشی با افزایش ضخامت هسته به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد بدون آنکه افزایش زیادی در وزن واحد سطح آن به وجود آید. لانه‌زنبوری ساخته شده در مقایسه با دیگر سازه‌های ساختمانی از سبکی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است و از لحاظ استحکام فشاری و خمشی نیز در وضعیت قابل قبولی قرار دارد.

قدردانی

بدین‌وسیله از مدیریت محترم و کارشناسان شرکت آسان نوش برای همکاری صمیمانه در تهیه لوله‌های پلی‌پروپیلن تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Gibson L.J. and Ashby M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge University, UK, 1-173, 1997.
2. *The Handbook of Sandwich Construction*, Zenkert D. (Ed.), Engineering Materials Advisory Services, UK, 1-44, 1997.
3. Bitzer T., *Honeycomb Technology, Materials, Design, Manufacturing, Application and Testing*, Chapman and Hall, New York, 1-199, 1997.
4. Dixon D.G., Walnut C., Turner P.G. and Oakley C.A., Thermally Fused Thermoplastic Honeycomb Structures, *US Pat.* 5, 635, 273, 1991.
5. Strauss H., Process for Manufacturing a Bundle of Tubes, *US Pat.* 5,032,208, 1991.
6. Corden J., Honeycomb Structure. *In: Engineered Materials Handbook*, **1** (Composites), ASM International, New York, 721-728 , 1987.
7. Brydson J. A., *Plastic Materials*, Butterworth - Heinemann, 7th ed., UK, 247-268, 1993.
8. Karlsson K. F. and Astorm B.T., Manufacturing and Application of Structural Sandwich Components, *Compos.*, **28A**, 97-111, 1997.
9. Marshall A.C., Core Composite and Sandwich Structures. *In: International Encyclopedia of Composites*, **1**, LEE S.M. (Ed.), VCH, New York, 488-506, 1990.
10. Edward X. G. and Gibson L. J., Behavior of Intact and Damaged Honeycombs: A Finite Element Study, *Int. J. Mech. Sci.*, **41**, 85-105, 1999.
11. Meraghni F., Desrumaux F. and Benzeygagh M. L., Mechanical Behavior of Cellular Core for Structural Sandwich Panels, *Compos., Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 767-779, 1999.