

## ساخت و بررسی خواص صفحات ساندویچی لانه زنبوری 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 لانه زنبوری 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 لانه زنبوری جدید وارد بازار شده که از مواد نسبتاً ارزان قیمت همچون پلی پروپیلن (PP) و پلی کربنات (PC) تهیه می‌شوند. هدف از این پژوهش، دستیابی به فناوری طراحی و ساخت صفحات ساندویچی لانه زنبوری 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 کامپوزیت‌ها 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 می‌یابد بدون آنکه تغییر زیادی در وزن آنها مشاهده شود.

### واژه‌های کلیدی

ساختار لانه زنبوری، کامپوزیت،  
گرمانرم، پلی پروپیلن،  
صفحات ساندویچی

## مقدمه

شده است [۱-۳].  
ایده ساختار لانه زنبوری از لانه زنبورهای  
عسل در طبیعت گرفته شده است و تاکنون  
بیشتر از ۵۰۰ نوع از این ساختار ساخته  
شده است. ساختار لانه زنبوری کاغذی ۲۰۰۰  
سال قبل توسط چینی‌ها ساخته شد که

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

### Key Words

honeycomb structure, composite,  
thermoplastic, polypropylene,  
sandwich panels

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 لانه زنبوری‌ها در پوشش داخلی ساختمان‌ها، قایق‌سازی و وسایل ورزشی است [۶]. پلی پروپیلن از پرمصرفترین، در دسترس‌ترین و ارزانه‌ترین مواد گرمانرم است که در ساخت لانه زنبوری‌ها 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 لانه زنبوری 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 لانه زنبوری با هسته مواد گرمانرم دارای سلول‌های استوانه‌ای شکل ارائه می‌شود.

## تجربی

### مواد

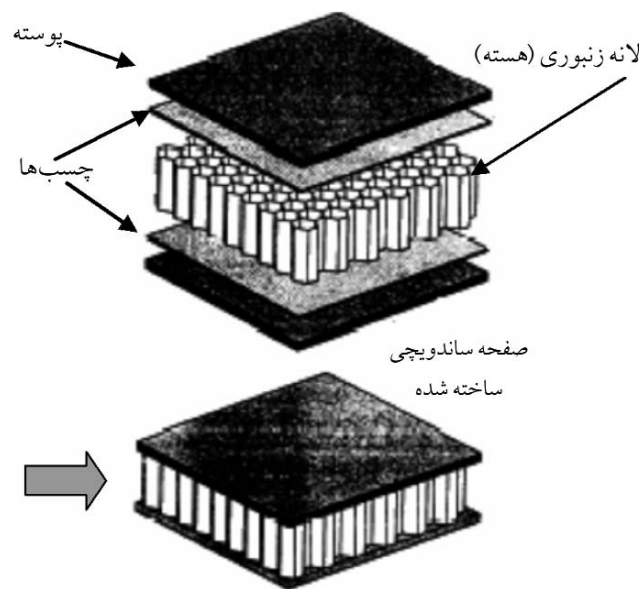
در این پژوهش، برای تهیه ساختار لانه زنبوری پلی پروپیلن با نام تجاری PPR۶۰ تولید شرکت پتروشیمی اراک با شاخص جریان مذاب برابر  $10 \text{ g}/0.2 \text{ kg}$  و شرایط وزنه  $2/16 \text{ kg}$  و دمای  $230^\circ\text{C}$  بکار رفت. برای آماده‌سازی سطح پلی پروپیلن از کرومیک اسید شامل سولفوریک اسید ۹۷ درصد مرک، پتاسیم دی کرومات مرک و آب مقطر استفاده شد. برای اتصال لوله‌های پلی پروپیلن چسب اپوکسی دوجزئی بر پایه نوعی اپوکسی آلیفاتیک بکار گرفته شد. از الیاف پلی استر نپافته (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

هم‌اکنون مبدأ ساختار لانه زنبوری‌های کاغذی است [۳]. اولین بار ساختار لانه زنبوری کاغذی برای بسته‌بندی مورد استفاده قرار گرفت [۱-۳]. پس از آن ساختار لانه زنبوری 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 چسب‌ها 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، تیتانیوم و آلیاژهای بر پایه نیکل است که اصولاً هسته‌های فلزی در کاربردهای با دمای زیاد استفاده می‌شوند و پوسته‌های 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 لایه‌های چسب به هسته اتصال یافته‌اند. از لانه زنبوری علاوه بر ساخت صفحات ساندویچی به عنوان جاذب کننده انرژی، پوشش دهنده فرکانس‌های رادیویی، منافذ نوری و هدایت کننده جریان هوانیز استفاده می‌شود. همان گونه که قبلاً اشاره شد مواد گوناگونی به شکل لانه زنبوری به عنوان هسته در ساختارهای ساندویچی بکار می‌روند [۳-۵].



شکل ۱- نمایی از اجزای لانه زنبوری.

### برش لانه زنبوری

برش هسته به ضخامت های دلخواه به وسیله سیم داغ با منبع تغذیه برق متناوب ۲۰۷ 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 نفاخته ای 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 ۲۴ h 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 نمونه ای 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.

۶۰۲۵ ساخت انگلستان، برای اندازه گیری زاویه تماس از دستگاه (G10 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 D2093 انجام شد. برای بررسی خواص فشاری و خمشی صفحات لانه زنبوری از آزمون فشاری مطابق روش ASTM C365-94 و آزمون خمشی مطابق روش ASTM C393 استفاده شد. ابعاد نمونه ها برای آزمون فشاری  $75 \times 75 \text{ mm}^2$  و برای آزمون خمشی  $250 \times 50 \text{ mm}^2$  در نظر گرفته شد و برای سه ضخامت ۱۷/۲۶، ۲۷/۶۶ و ۴۷/۴۶ mm آزمون انجام شد. سرعت دستگاه کشش برای آزمون های فشاری و خمشی ۲ mm/min بود.

### روش ساخت لانه زنبوری

#### تهیه لوله های PP

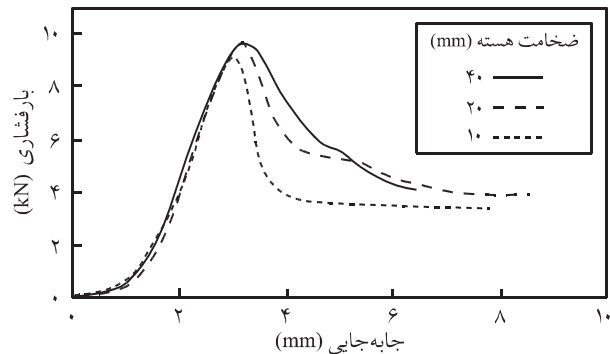
برای تولید لوله ها از اکسترودر تایوانی مخصوص ساخت لوله های نوشیدنی استفاده شد. ناحیه های گرمایی آن از ۱۸۰ تا ۲۳۰°C تنظیم شد. برای بدست آوردن سطح مقطع دایره ای و قطر یکنواخت لوله ها از دستگاه خلأ بعد از اکسترودر و همچنین، حمام آب سرد کردن لوله ها استفاده شد.

#### 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 ۴ h 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 ۱۲ min و در دمای ۱۱۰°C برای انجام عملیات پخت در گرمخانه قرار گرفتند. سپس، برای کامل شدن پخت، به مدت ۳ h دیگر در دمای ۵۰°C در گرمخانه گذاشته شدند، به این ترتیب هسته ساختار لانه زنبوری آماده شد.

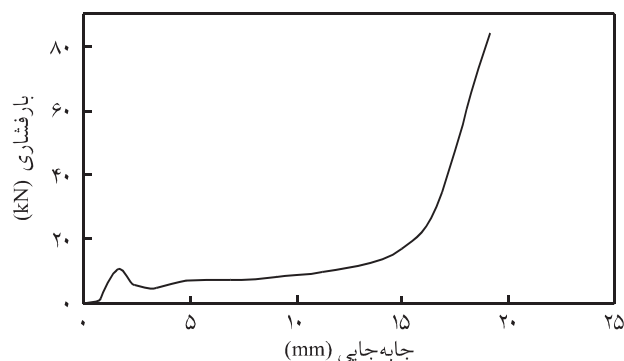


شکل ۳- نمودار مقاومت فشاری لانه زنبوری بر حسب تغییر شکل.

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 ضخامت‌های مختلف تقریباً یکسان است. بنابراین، با افزایش ضخامت لایه میانی استحکام فشاری لانه زنبوری تغییر چندانی نمی‌کند. البته شایان ذکر است که این نتیجه گیری محدود به متغیرهایی است که در این پژوهش بررسی شده است.

#### مکانیسم شکست لانه زنبوری در برابر نیروی فشاری

این آزمون برای بررسی مقاومت لانه زنبوری در تغییر شکل‌های زیاد انجام گرفت. لانه زنبوری با ضخامت (۲L) 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 برگشت پذیری 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- نمودار مقاومت فشاری ساختار ساندویچی در تغییر شکل‌های زیاد.

جدول ۱- مشخصات لوله‌های تولید شده.

نوع ماده	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	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 شدت کاهش پیدا کرده و به عبارتی سطح آبدوست تر شده است به این ترتیب چسبندگی افزایش خواهد یافت.

#### مشخصات لانه زنبوری‌های تهیه شده

ضخامت ساختارهای ساندویچی لانه زنبوری‌های تهیه شده ۱۷/۲۶ و ۲۷/۶۶ و ۴۷/۴۶ mm اندازه گیری 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 لانه زنبوری دیده نمی‌شود که این از مشخصات بارز لانه زنبوری‌هاست.

#### آزمون‌های مکانیکی انجام شده روی لانه زنبوری

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

#### آزمون فشاری

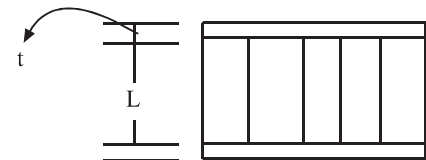
هدف از انجام این آزمون بدست آوردن نیروی شکست فشاری لانه زنبوری و میزان تغییر شکل آن بود.

جدول ۲- نتایج آزمون اندازه گیری زاویه تماس روی سطوح.

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

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

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

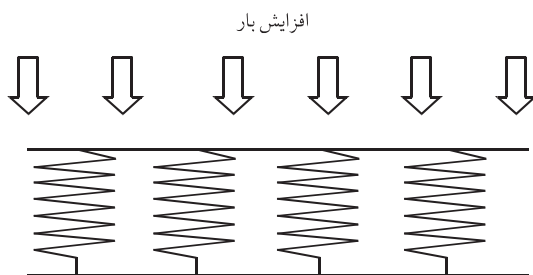


با افزایش تغییر شکل نیروی وارد شده بشدت زیاد می شود و این نشان می دهد که برای تغییر شکل نیروی بسیار زیادی مورد نیاز است. با برداشتن نیرو، لانه زنبوری تا اندازه زیادی به حالت اول برمی گردد. این برگشت پذیری کامل نیست چون هسته گرمانرم دچار تغییر شکل دائمی و یا خزش شده، به همین دلیل نمی تواند به حالت اول برگردد. با این حال برگشت پذیری نسبی پس از تغییر شکل امتیاز بزرگی برای این گونه لانه زنبوری هاست [۱۰].

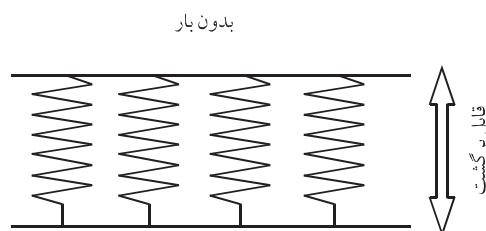
چنانچه در این شکل دیده می شود، عکس العمل هر کدام از لوله ها در

زیاد است که به دلیل جذب انرژی فوق العاده زیاد ساختارهای ساندویچی است.

مکانیسم تغییر شکل لانه زنبوری بر اثر نیروی فشاری در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیداست لانه زنبوری ابتدا در مقابل فشار وارده مقاومت می کند. افزایش فشار باعث تغییر شکل لانه زنبوری می شود. این تغییر شکل بسیار کند است. هر کدام از سلول های استوانه ای شکل همانند فنر عمل کرده و شروع به جمع شدن می کند. جمع شدگی از محل اعمال بار آغاز و شروع به پیشرفت می کند.



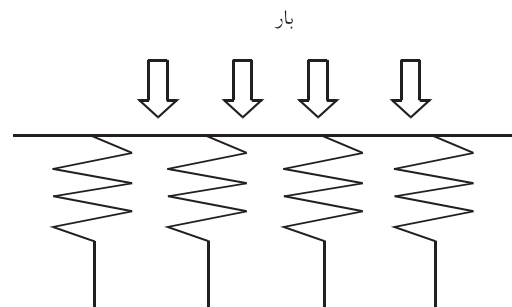
(ج) اثر افزایش فشار بر ساختار ساندویچی لانه زنبوری گرمانرم.



(د) پس از برداشتن فشار.



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



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

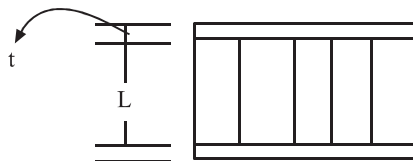
شکل ۵ - اثر اعمال بار فشاری بر ساختار لانه زنبوری گرمانرم.

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

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



(۱)



(۲)

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

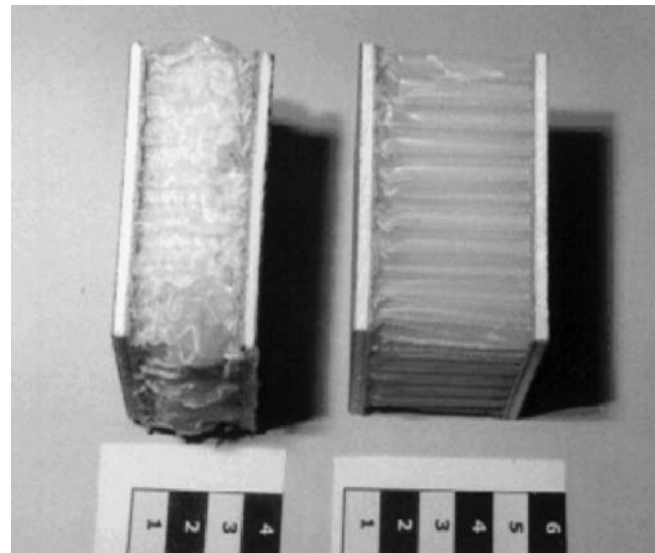
ضخامت لایه بیشتر باشد تعداد این دندان‌ها بیشتر خواهد بود.

### 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 لانه زنبوری، میزان استحکام خمشی به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. نتیجه دیگر این است که ساختار ساندویچی لانه زنبوری در مقایسه با چوب چند لایه، از استحکام خمشی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. مقایسه استحکام خمشی چوب چند لایه با ساختارهای لانه زنبوری گرمانرم نسبت به استحکام خمشی چوب چند لایه در جدول ۴ آورده شده است که خود مؤید این مطلب است.

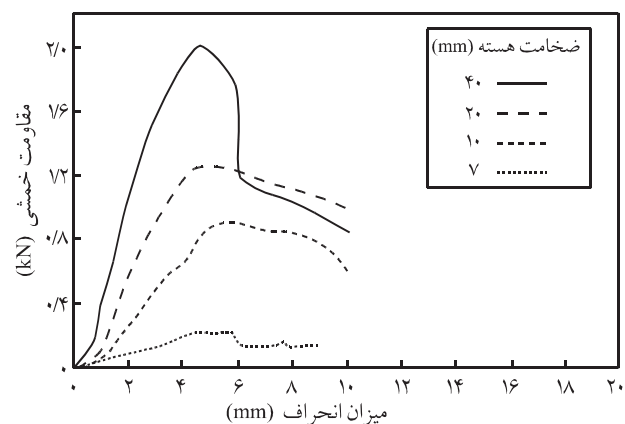
### نتیجه گیری

نتیجه بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که بطور کلی چسبندگی لوله‌های PP به همدیگر بدون اصلاح سطح امکان پذیر نیست. فرایند



شکل ۶ - برگشت پذیری 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 - تغییر شکل) دیده می‌شود با جذب انرژی زیادی همراه است. پس از برداشتن نیرو در صدی از تغییر شکل به حالت اولیه برمی‌گردد که از خواص ذاتی گرمانرم هاست 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 لانه زنبوری با ضخامت اسمی ۴۰mm تعداد ۱۰ دندان‌ها ایجاد شده است و هرچه



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

لانه زنبوری 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

بدین وسیله از مدیریت محترم و کارشناسان شرکت آسان نوش برای همکاری صمیمانه در تهیه لوله‌های پلی پروپیلن تشکر و قدردانی می‌شود.

#### مراجع

- Gibson L.J. and Ashby M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge University, UK, 1-173, 1997.
- The Handbook of Sandwich Construction*, Zenkert D. (Ed.), Engineering Materials Advisory Services, UK, 1-44, 1997.
- Bitzer T., *Honeycomb Technology, Materials, Design, Manufacturing, Application and Testing*, Chapman and Hall, New York, 1-199, 1997.
- Dixon D.G., Walnut C., Turner P.G. and Oakley C.A., Thermally Fused Thermoplastic Honeycomb Structures, *US Pat.* 5, 635, 273, 1991.
- Strauss H., Process for Manufacturing a Bundle of Tubes, *US Pat.* 5,032,208, 1991.
- Corden J., Honeycomb Structure. *In: Engineered Materials Handbook*, 1 (Composites), ASM International, New York, 721-728, 1987.
- Brydson J. A., *Plastic Materials*, Butterworth - Heinemann, 7th ed., UK, 247-268, 1993.
- Karlsson K. F. and Astorm B.T., Manufacturing and Application of Structural Sandwich Components, *Compos.*, **28A**, 97-111, 1997.
- Marshall A.C., Core Composite and Sandwich Structures. *In: International Encyclopedia of Composites*, 1, LEE S.M. (Ed.), VCH, New York, 488-506, 1990.
- 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.
- 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.