JMRA
مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک
ISSN: 2251-7383, eISSN: 2251-7391

مروری بر رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک تحت بار ضربه

جوانشیر لطفی[۱]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک ،دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
(Email: javanshirlotfi14@gmail.com)

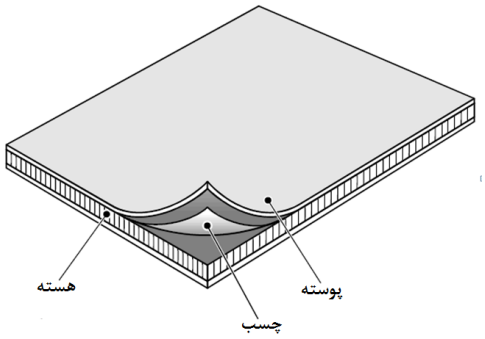
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹-۰۵-۱۷ **تاریخ پذیرش:** ۱۳۹۹-۰۵-۳۰

چکیده: پانل‌های ساندویچی به علت ساختار منحصر به فرد خود، دارای ویژگی‌های خاصی هستند، که مهمترین ویژگی آن‌ها نسبت استحکام به وزن و همچنین نسبت سفتی به وزن بالا می‌باشد. بنابراین با توجه به کاربرد زیاد و روزافزون پانل‌های ساندویچی در جهان امروز از کاربرد در صنایع نظامی تا کاربردهای معماری و ساختمان، شناخت خواص مکانیکی آن‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. پانل‌های ساندویچی از یک هسته و دو پوسته به همراه چسب برای اتصال پوسته و هسته تشکیل شده اند. یکی از موادی که اخیرا در پانل‌های ساندویچی به عنوان هسته استفاده می‌شود مواد با ضریب پوآسون منفی یا همان آگزتیک‌هاست. آگزتیک‌ها موادی هستند که بر خلاف مواد معمول در هنگام کشش دچار افزایش طول در راستای عمود بر امتداد کشش می شوند از این رو استفاده از آنان باعث تغییر خواص و رفتار پانل‌های ساندویچی می‌گردد. در این مقاله مروری تحقیقات انجام شده بر روی رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک تحت بار ضربه در سال‌های اخیر بررسی و نتایج پژوهش‌های مهم و کاربردی آن‌ها ذکر شده‌است. به طور خلاصه در این مقاله مروری استنباط شده است که مواد آگزتیک مقاومت به ضربه بهتری نسبت به مواد معمولی دارند در نتیجه پانل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک نسبت به پانل‌های ساندویچی معمولی مقاومت ضربه بالاتری دارد.

واژه‌های کلیدی: پانل ساندویچی، آگزتیک، ضربه، هسته آگزتیک، مواد با ضریب پوآسون منفی

۱- مقدمه

بنا به تعریف پانل‌های ساندویچی عبارتند از پانل‌های کامپوزیتی که در ساخت آن‌ها برحسب مورد از یک ماده و یا مواد مختلف با شکل‌های گوناگون استفاده می‌گردد. به نحوی که دارای وزن کم، مقاومت بالا و خواص دینامیکی خوب باشند. به طور کلی ساختار یک پانل ساندویچی از سه بخش تشکیل شده است که در شکل ۱ قابل مشاهده است.



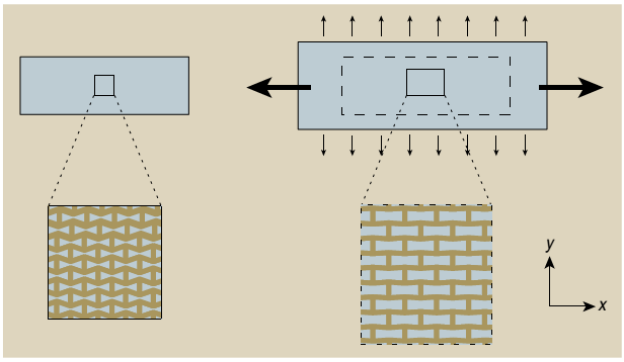
شکل ۱) اجزا تشکیل دهنده یک پانل ساندویچی [۱]

بخش های تشکیل دهنده یک پانل ساندویچی به شرح زیر می باشد:

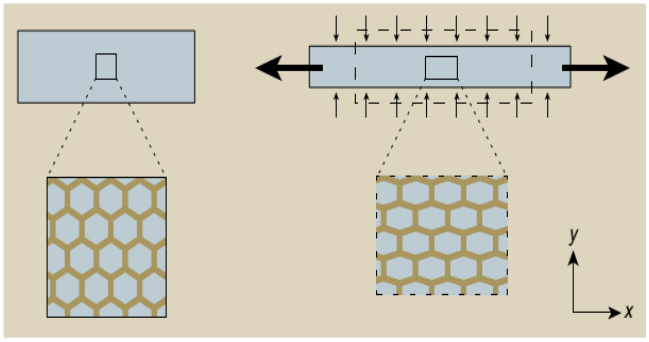
- یک جفت صفحه سفت و نازک به عنوان پوسته
- یک هستهبا ضخامت زیاد و وزن کم که نیروها را از یک پوسته به پوسته دیگر منتقل می‌کند.
- یک ماده چسبنده که هسته و رویه‌ها را به هم متصل می‌کند.

پانل‌های ساندویچی به علت ساختار منحصر به فرد خود، دارای ویژگی‌های خاصی هستند، که مهمترین ویژگی آن‌ها نسبت استحکام به وزن و همچنین نسبت سفتی به وزن بالا می‌باشد. بنابراین با توجه به کاربرد زیاد و روزافزون پانل‌های ساندویچی در جهان امروز مثل شاتل‌های فضایی، هواپیما، خودرو، کشتی‌های تندرو و کشتی‌های نظامی و همچنین در سیستم انرژی بادی و پل‌ها و حتی استفاده از پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته در معماری و صنعت ساختمان و صدها کاربرد دیگر شناخت خواص مکانیکی آن‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از خواص مهم مکانیکی مقاومت به ضربه (در سرعت‌های مختلف) این پانل‌هاست که در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در این مورد انجام شده است.

به طور تجربی ثابت شده است که مقاومت به ضربه در پانل‌های ساندویچی بیشتر به هسته پانل ارتباط دارد تا پوسته از این رو مطالعات زیادی در باب مقاومت ضربه‌ای هسته پانل‌های ساندویچی انجام شده است. هسته پانل‌های ساندویچی را به شکل‌های مختلف من جمله لانه زنبوری، موج‌دار، فوم، خرپایی و... و روش‌های گوناگونی تولید می‌کنند. Wetzel در پایان نامه خود در سال ۲۰۰۹ اطلاعات جامعی درباره انواع و روش‌های ساخت هسته جمع آوری کرده است [۲]. طبعا جنس هسته نیز در خواص مکانیکی من جمله مقاومت ضربه پانل دخیل است. همین باعث شده تا محققان دست به استفاده از مواد مختلف زده و مقاومت ضربه آنان را با هم مقایسه کنند. یکی از مواد جدید مورد بررسی در سال‌های اخیر که در این مطالعه نیز مرور شده‌است مواد با ضریب پوآسون منفی (اگزتیک‌ها) می‌باشند. این کلمه ریشه‌ی یونانی دارد، به معنای"آن چیزی که تبدیل به بزرگتر می‌شود ."مواد اگزتیک دارای ضریب پواسون منفی هستند و این بدان معناست که این مواد بر خلاف مواد معمول در هنگام کشش دچار افزایش طول در راستای عمود بر امتداد کشش می شوند. شکل ۲ و۳ به ترتیب یک ماده آگزتیک و معمولی (ضریب پوآسون مثبت) را تحت کشش نشان می‌دهد.



شکل ۲) یک ماده (فوم) آگزتیک تحت کشش[۳]



شکل ۳) یک ماده (فوم) معمولی تحت کشش[۳]

همانطور که در اشکال بالا مشخص است کشش در ماده آگزتیک باعث افزایش طول در راستای عمود بر امتداد کشش می‌شود در صورتی که در یک ماده معمولی (شکل۳) کشش باعث کاهش طول در راستای عمود بر امتداد کشش و در نتیجه شکست یا در مواد نرم گلویی شدن می‌شود. تحقیقات نشان داده که ضریب پوآسون منفی باعث تقویت خواص مکانیکی می‌شود. لازم به ذکر است که ضریب پوآسون منفی از لحاظ ترمودینامیکی امکان پذیر است، اما در مواد معمولی(به جز چند استثنا)، ضریب پوآسون منفی دیده نمی شود از این‌رو روش‌های مختلفی از جمله تراکم‌سازی؛ حرارت دهی؛ سردکاری و... برای ساخت مواد آگزتیک از مواد معمولی وجود دارد. برای مثال اولین بار Lakes در سال ۱۹۸۷ برای اولین بار با استفاده از حرارت‌دهی، سردکاری؛ متراکم سازی و همچنین دادن زمان به منظور بازسازی یک فوم معمولی را به آگزتیک تبدیل کرد [۴].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی بر روی مواد آگزتیک انجام شده است. در این مطالعه به بررسی و مرور مهمترین پژوهش‌های صورت گرفته حول پانل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک تحت ضربه پرداخته شده است.

۲- روش بررسی

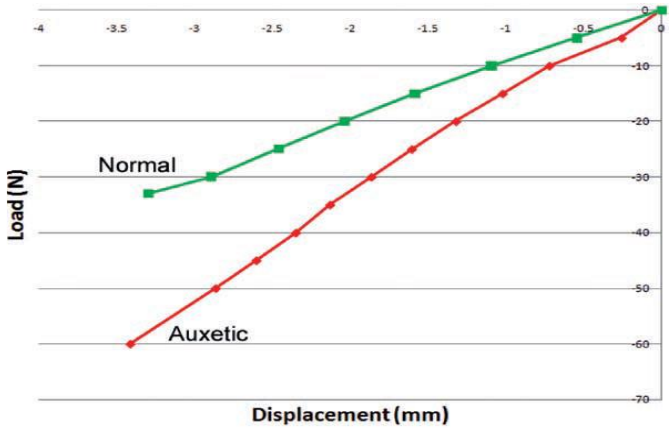
به منظور دستیابی به مقالات مرتبط به موضوع مقاله مروری حاضر، از موتور جستجوگر Google Scholar و همچنین سایت Iran paper استفاده شده است. جستجو با استفاده از کلید واژه‌های پانل ساندویچی، آگزتیک، ضربه، هسته آگزتیک، مواد با ضریب پوآسون منفی به صورت فارسی و انگلیسی صورت گرفته‌است. بازه زمانی مقالات استخراج شده و مورد استفاده بین سال2007 تا ۲۰۲۰ می‌باشد. در نگارش این مقاله مروری سعی شده است مهمترین کارهای صورت گرفته بر روی رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک تحت

ضربه و همچنین تاثیر ضریب پوآسون منفی بر روی مقاومت ضربه پانل در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۲۰ به همراه نتایج آن‌ها ذکر شود.

۳- یافته‌ها

همانطور که پیشتر نیز ذکر شد مواد آگزتیک موادی با ضریب پوآسون منفی هستند. در سال ۲۰۰۷ در دانشگاه استونی بروک جمعی از دانشمندان با استفاده از روش فشرده سازی سلول ها و اعمال حرارت به میزان کم، موفق به ساخت نمونه فوم اگزتیک شدند. دانسیته نمونه فرآوری شده در حدود kg/m^3 ۱۰۲٫۵ به دست آمد. نمونه از قسمت میانی و دو بخش کناری آن برش داده شد. به منظور نشان دادن رفتار ماکروسکوپی اگزتیک، یک تست کشش ساده بر روی نمونه انجام شد. رفتار نمونه تحت اعمال بار کششی توسط یک دوربین CCD۲۰۲۴×۲۰۲۴ پیکسل ضبط و الگوریتم نقطه به نقطه آن تجزیه و تحلیل شد. با توجه به نتایج حاصل از این تجزیه و تحلیل، نسبت پواسون فوم اگزتیک تقریبا بین ۰٫۱۳- تا ۰٫۲- به دست آمد [۵].

در سال ۲۰۰۹ Fu-pen [۶] در تحقیقی جامع مودهای شکست و تغییر شکل فوم‌های معمولی و اگزتیک مورد استفاده در هسته پانل‌های ساندویچی را باهم مقایسه کرد. او در ابتدا اثر ابعاد بر خواص مکانیکی فوم پلی اورتان با و بدون نانوذرات؛ تغییر شکل نوک ترک و خصوصیات انتشار ترک را بررسی و سپس همین کار را برای فوم آگزتیک نیز تکرار کرد. Fu-pen در تحقیق خود آزمایشات زیادی از جمله ضربه کم سرعت و برش را انجام داد. شکل ۴ نتایج تحقیق او را در غالب نمودار نیرو جا به جایی فوم آگزتیک و فوم معمولی پلی اورتان نشان می‌دهد [۶].



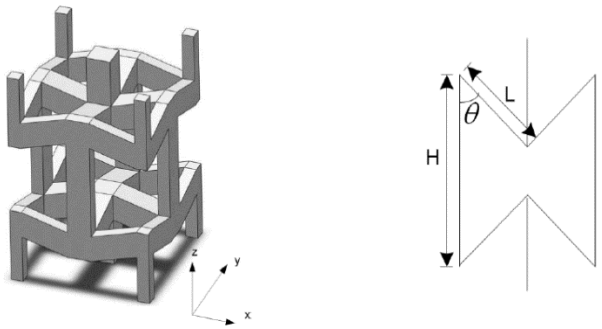
شکل ۴) نمودار نیرو جا به جایی فوم آگزتیک و فوم معمولی پلی اورتان [۶]

همانطور که شکل ۴ مشاهده می شود، فوم آگزتیک با افزایش بار سفت تر می‌شود و این نشان می‌دهد که فوم های آگزتیک مقاومت به ضربه بهتری دارند. Fu-pen معتقد بود این امر تا حد زیادی به این دلیل است که در زیر بار نسبت منفی پواسون (که در مواد آگزتیک است) باعث جمع شدن فوم می شود، بنابراین مقاومت بیشتری را ارائه می دهد [۶].

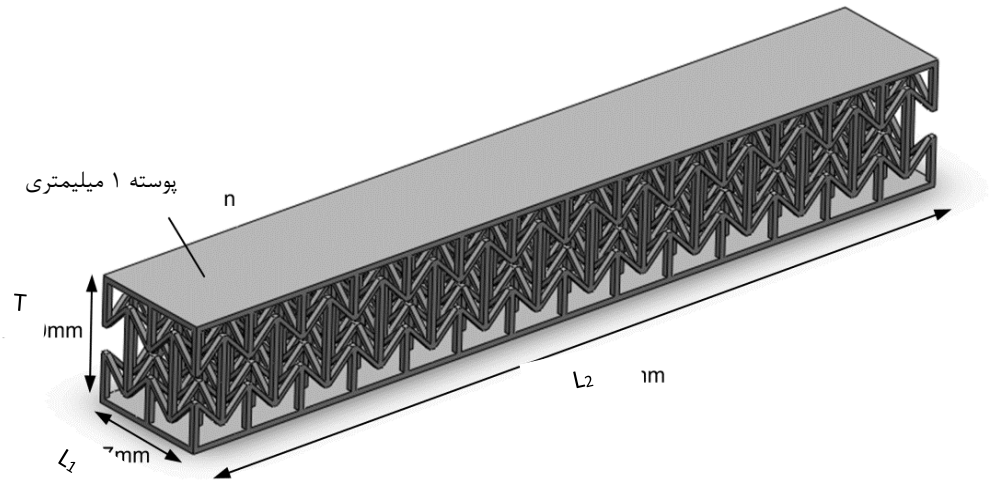
Shu yang و همکاران نیز [۷] بر روی مقاومت یک پانل ساندویچی با هسته آگزتیک تحت ضربه عمودی کارکردند. در پژوهش آنان یک پانل ساندویچی با هسته فوم آلومنیوم و لانه زنبوری آگزتیک تحت ضربه عمودی؛ ابتدا به صورت عددی (به کمک المان محدود) مدل و سپس به صورت تجربی تست (ضربه) و در ادامه نیز نتایج کار با نتایج تحلیل عددی یک پانل ساندویچی با هسته فوم آلومنیومی با همان ابعاد و شرایط مقایسه شد. آنان نیز مانند پژوهشگران پیشین نتیجه گرفتند که مواد اگزتیک مقاومت بهتری در برابر ضربه دارند. Shu yang و همکاران در این پژوهش اثر ضخامت هسته (ضخامت فوم آلومنیوم به همراه ضخامت لانه زنبوری آگزتیک) و ضخامت

پوسته‌ها را نیز مطالعه کردند. و به این نتیجه رسیدند که هرچه ضخامت پانل (پوسته و هسته) بیشتر باشد حد بالستیک پانل بالاتر می‌رود. به طور کلی پژوهش آنان نشان داد که استفاده از لانه زنبوری اگزتیک با تراکم بالا در هسته کمک بسیاری به بالا بردن حد بالستیک پانل می‌کند[۷].

در ادامه نیز در سال ۲۰۱۳ Li Yang و همکارانش [۸] در پژوهشی به صورت تحلیلی و تجربی اثرات خمش و ضربه با انرژی جنبشی کم، که باعث ایجاد آسیب در زیرسطح بدون تغییر شکل و نفوذ در مواد کامپوزیت می‌شود را بر روی پانل ساندویچی با هسته آگزتیک بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش هسته آگزتیکی خود را به دو روش ذوب پرتو الکترونی و سخت شدن لیزر ساختند. و با سایر ساختارهای سلولی پانل‌های ساندویچی معمولی از طریق تست‌های مختلف ضربه و خمش مقایسه کردند. ابعاد واحد آگزتیکی هسته از پارامترهای مورد مطالعه در پژوهش Li Yang و همکارانش بود. شکل ۵ آ و ب به ترتیب یک واحد از هسته آگزتیکی و پارامترهای طراحی آن و شکل ۶ نیز نمایی از پانل ساندویچی ساخته شده و تحلیل شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۵) آ: یک واحد از هسته آگزتیکی پژوهش Li Yang و همکارانش ب: پارامترهای طراحی پژوهش Li Yang و همکارانش در هسته آگزتیکی که برای هر یک از تست‌های خمش و ضربه با انرژی جنبشی کم انتخاب می‌شوند [۸]



شکل ۶) پانل ساندویچی تحلیل شده و تست شده بر حسب پارامترهای ابعادی در پژوهش Li Yang و همکارانش [۸]

یکی از موارد قابل توجه و استناد در این پژوهش نحوه ساخت هسته آگزتیکی آن‌ها بود. آنان دو مدل طراحی را برای هریک از تست های خمش و ضربه با انرژی جنبشی کم انتخاب کردند. مدل‌های انتخابی آنان برای تست های خمش و ضربه با انرژی جنبشی کم به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده‌اند.

جدول۱) ابعاد پانل تست خمش ابعادی در پژوهش Li Yang و همکارانش [۸]

نام نمونه	L_1(mm)	L_2(mm)	T(mm)
A1	20.405±0.259	148.675±0.155	22.538±0.125
A2	19.829±0.153	150.334±0.140	16.222±0.029

جدول۲) ابعاد پانل تست ضربه با انرژی جنبشی کم در پژوهش Li Yang و همکارانش [۸]

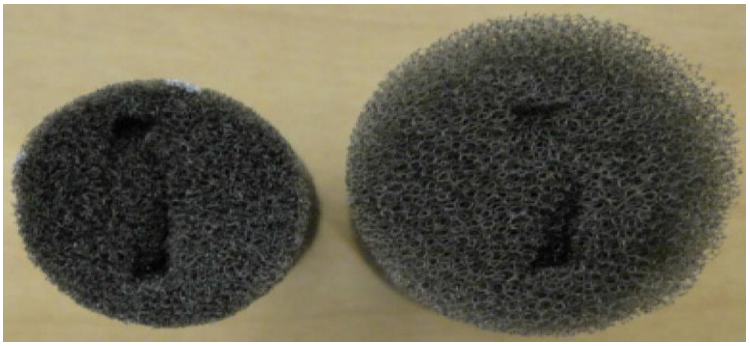
نام نمونه	L_1(mm)	L_2(mm)	T(mm)
A3	68.449±0.057	68.457±0.025	26.467±0.051
A4	53.971±0.054	53.962±0.035	30.709±0.016

به طور خلاصه نتایج پژوهش Li Yang ۲۰۱۳ و همکارانش به صورت زیر است [۸]:

- تست خمش: نمونه A2 (نمونه با ضخامت و عرض کمتر اما طول زیاد) خیز کمتر (در حدود 5.96±0.27) و سفتی خمشی بیشتری دارد. ($17.93\pm0.80\ N.M^2$).
- تست ضربه با انرژی جنبشی کم: میزان کل انرژی جذب شده در نمونه A3 (4.21J) از نمونه A4 (3.11J) بیشتر است [۸]

همچنین در این مقاله کارآمدی روش ساخت پانل آگزتیکی Li Yang و همکارانش مشخص شد.

در ادامه در همان سال ۲۰۱۳ نیز T. C. Lim و همکارانش [۹] در مطالعه‌ای اثر ضربه بر فوم آگزتیک و معمولی پلی اورتان به کار رفته به عنوان هسته پانل‌های ساندویچی را به صورت تجربی بررسی و با هم مقایسه کردند. آنان در پژوهش خود نتیجه Fu-pen [۶] را که منفی بودن ضریب پوآسون باعث مقاومت بهتر فوم آگزتیک در برابر ضربه می‌شود؛ تایید کردند اما نشان دادند که این برتری فوم آگزتیک در ضربه با سرعت بالا خیلی محسوس نمی‌باشد. به عبارت بهتر T. C. Lim و همکارانش در پژوهش خود نشان دادند که در ضربه با سرعت بالا فوم‌های آگزتیکی با هندسه ساده استوانه‌ای (شکل ۷) مقاومت بالاتری نسبت به فوم معمولی PU ندارند [۹].



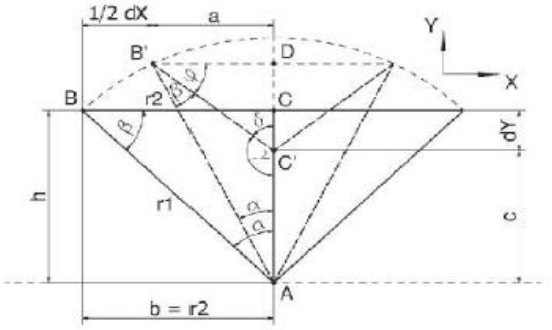
شکل ۷) مقایسه فوم معمولی (سمت راست) و فوم آگزتیک (سمت چپ) تحت ضربه سرعت بالا [۹].

نظر ما نتایج T. C. Lim و همکارانش [۹] نیاز به صحت سنجی بیشتری دارند و در مقاله آن‌ها دلایل قانع کننده‌ای برای کم شدن مقاومت فوم آگزتیکی در ضربه سرعت بالا وجود ندار در نتیجه صحت سنجی این مطلب که آیا سرعت ضربه در مقاومت آن تاثیر می‌گذارد خود می‌تواند موضوع پژوهشی آتی باشد.

در سال ۲۰۱۴ Somayeh Moharrami [۴] در پایان نامه خود در دانشگاه K. N. TOOSI یک پانل ساندویچی با هسته‌ای از جنس فوم اگزتیک ساخته و با استفاده از تست‌های مختلف از جمله ضربه افتادن خواص مختلف این فوم را بررسی کرده است. او در پایان نامه خود بعد از انجام تست ضربه نتیجه گرفت که مقاومت به ضربه در پانل ساندویچی با هسته آگزتیک به میزان ۲۳,۶۱ درصد نسبت به پانل ساندویچی با فوم معمولی افزایش یافته است [۴]. که این نتیجه کاملا منطبق بر نتایج کارهای گذشته است.

در سال ۲۰۱۵ T. Allen و همکاران [۱۰] پژوهشی تجربی بر روی فوم آگزتیک سلول باز و فوم معمولی PU تحت ضربه شبه استاتیکی و ضربه با انرژی جبشی کم انجام دادند. تفاوت پژوهش آنان با پژوهش Li Yang و همکارانش [۸] در باز بودن سلول‌های اگزتیک بود. پژوهش T. Allenو همکاران بیشتر به صورت کاربردی و برای پیدا کردن کاربردهای فوم و پانل‌های ساندویچیکه هسته آن‌ها فوم آگزتیک سلول باز باشد؛ بود. آن‌ها در پژوهش خود استفاده از فوم آگزتیک را به عنوان محافظ بدنی برای وسایل ورزشی پیشنهاد کردند. T. Allenو همکاران به صورت تجربی نشان دادند که فوم اگزتیک سلول باز نزدیک ۶ برابر جذب انرژی بیشتری نسبت به فوم معمولی در ضربه‌های با انرژی جنبشی کم و یا شبه استاتیکی دارد. از این رو می‌تواند به عنوان محافظ برای وسایل ورزشی در باشگاه‌ها استفاده شود تا از خسارت احتمالی برخورد انسان یا اشیا به دستگاه‌ها (که در این پژوهش به صورت ضربه با انرژی جنبشی کم مدل شده) جلوگیری کند [۱۰]. نتیجه پژوهش T.Allen و همکاران با نتیجه پژوهش Fu-pen [۶] مغایرتی نداشته و به نظر ما کاربرد معرفی شده توسط آنان قابلیت اجرا و ساخت را دارد.

در اواخر سال ۲۰۱۴ و اوایل ۲۰۱۵؛ SMARDZEWSKI Jerzy و همکارش [۱۱] در لهستان به صورت تحلیلی و کاملا ریاضی پژوهشی را بر روی خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک به صورت لانه زنبوری و با هندسه مثلثی انجام دادند. شماتیک هندسه مورد بررسی آنان در شکل ۸ قابل مشاهده است.

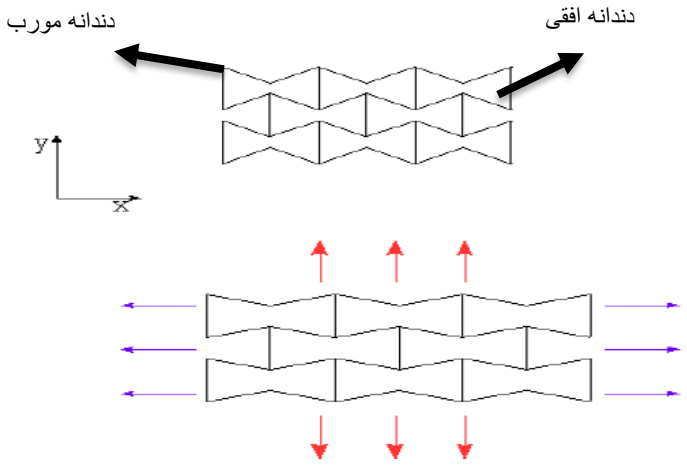


شکل ۸) مدل تحلیلی هسته آگزتیک SMARDZEWSKI Jerzy و همکارش [۱۱]

نتایج حاصل شده از مدل‌سازی ریاضی پژوهشSMARDZEWSKI Jerzy و همکارش [۱۱] با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی داشت. آنان دریافتند که با افزایش زوایای داخلی مثلث (شکل ۸) ضریب پوآسون منفی‌تر و در نتیجه مقاومت آن بیشتر می‌شود [۱۱].

در ماه June از سال ۲۰۱۵ MOZAFAR SHOKRI RAD [۱۲] در تز دکتری خود در دانشگاه Malaysia بر روی کاربردها و جذب انرژی مواد آگزتیک کار کرد. او نیز به همان نتایج Fu-pen [۶] (که منفی بودن ضریب پوآسون باعث مقاومت بهتر فوم آگزتیک در برابر ضربه می‌شود.) رسید. و از این جهت مواد آگزتیک را موادی مناسب برای جذب انرژی معرفی کرد [۱۲].

Ramadan Abdelhamid Yousef Mohamed [۱۳] در همان سال ۲۰۱۵ در تز دکتری خود به بررسی تاثیر ابعاد هندسی بر روی ساختارهای لانه زنبوری آگزتیک که به عنوان هسته در پانل‌های ساندویچی استفاده می‌شوند در دانشگاه Helwan پرداخت. هندسه لانه زنبوری درون رو آگزتیک مورد بحث Ramadan Abdelhamid Yousef Mohamed در تز شامل شش ضلعی‌هایی منتظم بود که اضلاع افقی را دندانه‌های افقی و اضلاع مورب را دندانه‌های مورب نامید. هندسه رفتار این لانه زنبوری آگزتیک به صورت شماتیک در شکل زیر نمایان است [۱۳].



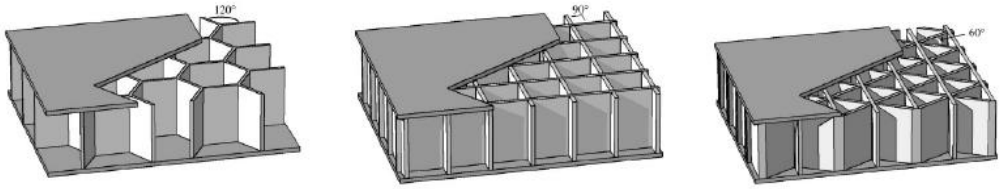
شکل ۹) هندسه رفتار این لانه زنبوری آگزتیک به صورت شماتیک[۱۳]

Ramadan Abdelhamid Yousef Mohamed با بررسی و پژوهش در هر سه روش تحلیلی، عددی و تجربی نتیجه گرفت که روش عددی المان محدود نسبت به روش‌های تحلیلی مانند روش SMARDZEWSKI Jerzy و همکارش [۱۱] از دقت بالاتر برخوردار است و تطابق بهتری با نتایج تجربی حاصل از تست دارد. همچنین او علاوه بر زوایای داخلی؛ طول و ضخامت هندسی لانه زنبورها را از پارامترهای مهم در تعیین مقاومت و استحکام ساختار لانه زنبوری آگزتیک می‌دانست. او نتیجه گرفت که افزایش طول دندانه مورب

لانه‌های زنبور باعث افزایش مدول الاستیسیته و ضریب پوآسون در جهت y و همچنین کاهش این پارامتر ها در جهت x می‌شود. همچنین کاهش زاویه بین دنده های مورب و افقی داخلی به طور کلی باعث افزایش ضریب پوآسون در هر دوجهت x وy می‌شود.که این با نتیجه پژوهش SMARDZEWSKI Jerzy و همکارش [۱۱] (که بر روی آگزتیک لانه زنبوری با هندسه مثلثی بود) منطبق است. همچنین افزایش ضخامت دندانه افقی و حفظ ضخامت دندانه مورب، باعث افزایش مدول الاستیسیته و نسبت پواسون در جهت x شده اما آن‌ها را در جهت y ثابت نگه می‌دارد [۱۱].

در انتها نیز Ramadan Abdelhamid Yousef Mohamed به عنوان یک کاربرد استفاده از ساختارهای آگزتیک را در بانداژهای پزشکی به علت قابلیت جذب انرژی بالای این مواد پیشنهاد داد [۱۱] که از نظر ما پیشنهاد خوب و قابل اجرایی است.

در سال ۲۰۱۶ نیز Serge Abrate [۱۴] در پژوهشی درباره پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری آگزتیک در هر سه حالت معمول شش ضلعی، مربعی و مثلثی (مطابق شکل ۱۰)، جذب انرژی بالای این پانل‌های ساندویچی را نشان داد [۱۴].



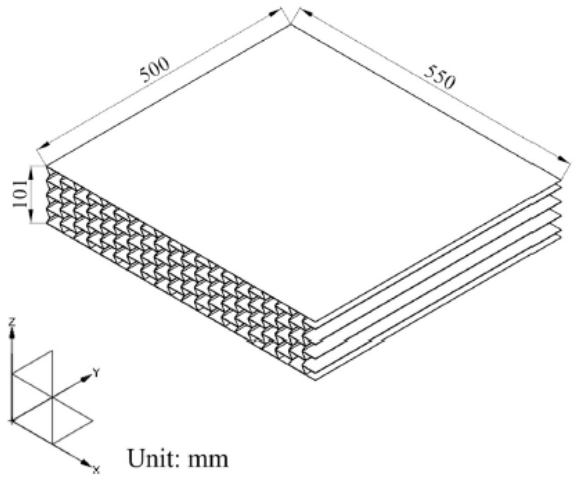
شکل ۱۰) سه حالت معمول پانل‌های ساندویچی لانه زنبوری به ترتیب از چپ شش ضلعی، مربعی و مثلثی [۱۴]

همانطور که پیشتر هم ذکر شد Ramadan Abdelhamid Yousef Mohamed و SMARDZEWSKI Jerzy و همکارش به ترتیب بر روی لانه زنبوری شش ضلعی و مثلثی پژوهش انجام دادند.

همچنین در ادامه در همان سال ۲۰۱۶ Novak و همکارانش [۱۵] در مقاله‌ای مروری به مرور و بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه مواد آگزتیک پرداختند.

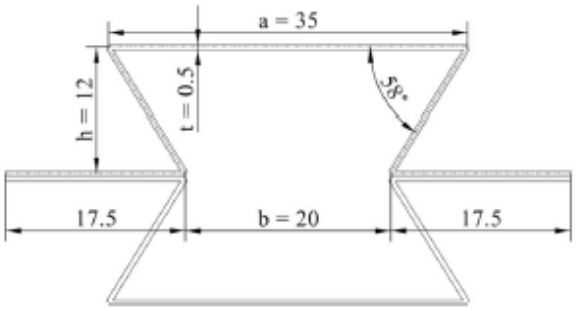
R. A.Mohamed و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۶ [۱۶] در پژوهشی عددی به مطالعه ضربه با سرعت بالا روی پانل ساندویچی با پوسته‌های آلومنیومی و هسته لانه زنبوری آگزتیکی به روش المان محدود سه بعدی پرداختند. آن‌ها برای صحت سنجی کار خود از نتایج تجربی موجود استفاده کردند. نتایج آن‌ها تطابق خوبی با نتایج آزمایشات تجربی داشت. پژوهش آنان علاوه بر تایید نتیجه پژوهش Ramadan Abdelhamid Yousef Mohamed [۱۱] مبنی بر جذب انرژی بالای پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری آگزتیک؛ نشان داد که نوع درون‌رو لانه زنبوری آگزتیک [۱۱] از سایر انواع لانه زنبوری آگزتیک مقاومت بهتری دربرابر ضربه با سرعت بالا دارد همچنین مکانیزم جذب انرژی در هسته ارتباط مستقیم با تغییر شکل پلاستیک پوسته آلومنیوم دارد [۱۶].

در سال ۲۰۱۷ نیز Chang Qi و همکارانش [۱۷] در پژوهشی به بررسی تجربی و عددی پانل‌های ساندویچی با پوسته آلومنیومی و هسته لانه زنبوری درون‌رو آگزتیکی تحت ضربه پرداختند. ابعاد پانل ساندویچی آن‌ها ثابت و مطابق شکل زیر و همچنین ضخامت پوسته بالایی و پایینی هر کدام ۱میلیمتر تعریف شده بود [۱۷].



شکل ۱۱) پانل ساندویچی Chang Qi و همکارانش [۱۷]

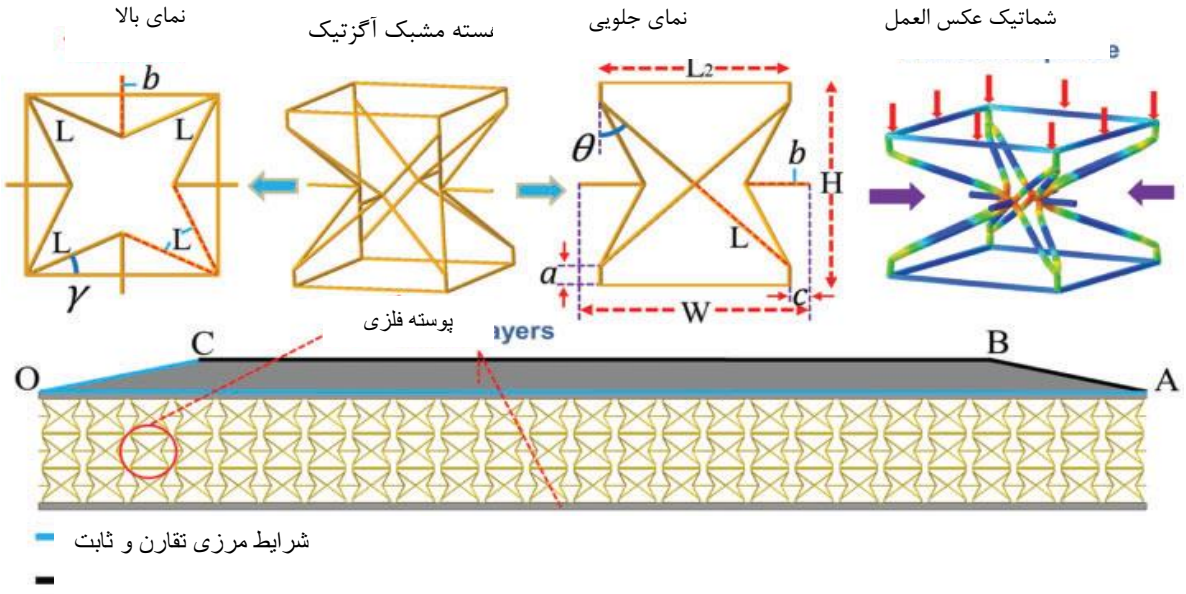
همچنین شکل ۱۲ ابعاد یک واحد از هسته لانه زنبوری درون‌رو آگزتیکی مورد بحث آنان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲) یک واحد هسته لانه زنبوری درون‌رو اگزتیکی Chang Qi و همکارانش [۱۷]

نتایج تجربی و عددی حاصل از پژوهش آنان از انطباق خوبی برخوردار بود. همچنین آنان نیز مانند R. A.Mohamed و همکارانش [۱۶] به این نتیجه رسیدند که لانه زنبوری درون رو آگزتیکی از سایر انواع لانه زنبوری آگزتیک مقاومت بهتری دربرابر ضربه دارد. همچنین هسته آگزتیکی در این حالت نزدیک به ۱۹,۱ درصد جذب انرژی بیشتری نسبت به هسته معمولی دارد [۱۷].

Gabriele Imbalzano و همکاران نیز [۱۸] در همان سال ۲۰۱۷ در پژوهشی عددی و با روش المان محدود؛ ضربه بر روی یک پانل ساندویچی با پوسته فلزی و هسته آگزتیک به صورت مشبک را بررسی کردند. شکل ۱۳شماتیک پانل آن‌ها را نشان می‌دهد [۱۸].



شکل ۱۳) شماتیک پانل Gabriele Imbalzano و همکاران نیز [۱۸]

تجزیه و تحلیل Gabriele Imbalzano و همکاران نشان داد که پانل ساندویچی با هسته آگزتیک به صورت مشبک از مقاومت خوبی دربرابر ضربه برخوردار است و می‌تواند به عنوان محافظ در صنایع مختلف استفاده شود[۱۸].

در سال ۲۰۱۸ نیز Amer Beharic و همکاران [۱۹] در پژوهشی میزان جذب انرژی حاصل از تست ضربه drop-weight (به صورت شبه استاتیک) چند پانل ساندویچی با هسته لانه زنبوری آگزتیک از جمله مشبک، درون رو و خرپایی را مطالعه کردند. شکل ۲ مرجع [۱۹] نمایی شماتیک از هسته‌های مورد مطالعه Amer Beharic و همکارانش را نشان می‌دهد.

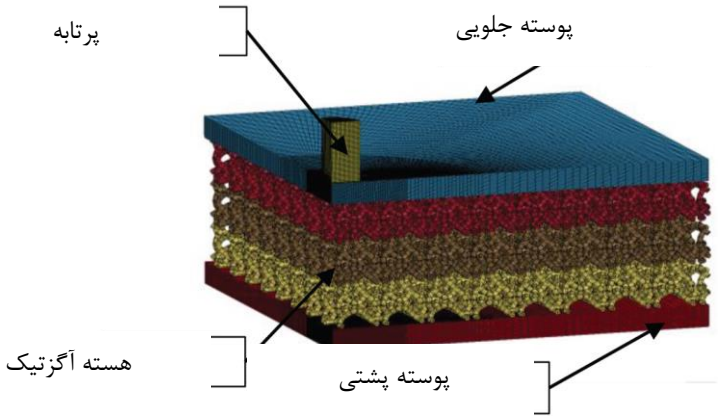
Amer Beharic و همکاران تست‌های ضربه را در دو درجه دمایی ۹۳ و ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد انجام دادند. از پژوهش Amer Beharic و همکاران مشخص شد که در کنار تراکم نسبی ، طراحی هندسی هسته های سلولی نیز می تواند به میزان قابل توجهی بر عملکرد جذب انرژی تأثیرگذاری ساختارهای ساندویچ تأثیر بگذارد. همچنین مشخص شد که میزان جذب انرژی در ساختارهای سلولی مورد بررسی در این تحقیق ارتباطی با خصوصیات مکانیکی شبه استاتیک یا دما ندارد. در انتها نیز پژوهش آنان نشان داد که پانل ساندویچی با هسته لانه زنبوری درون‌رو آگزتیک پاسخ بهتر و بهینه‌تری نسبت به دو حالت دیگر یعنی مشبک و خرپایی دارد [۱۹].

با ترکیب نتایج Amer Beharic و همکاران [۱۹] و R. A.Mohamed و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۶ [۱۶] می‌توان نتیجه گرفت پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری درون‌رو آگزتیک بهینه‌ترین مقاومت را در برابر ضربه دارند.

در ادامه در سال ۲۰۱۹ نیز Ataalp و همکارانش [۲۰] در پژوهشی تجربی و عددی به بررسی رفتار یک پانل ساندویچی با هسته درون‌رو لانه زنبوری و هندسه های ضد چهارخانه پرداختند. آن‌ها برای ساخت هسته لانه زنبوری از تکنولوژی پرینت سه بعدی استفاده کردند. همچنین پوسته پانل‌های ساندویچی آنان از جنس آلومینیوم بود. تحلیل عددی Ataalp و همکارانش بر اساس تئوری المان محدود بود که انطباق خوبی با نتایج تجربی حاصل از تست آن‌ها داشت. در این پژوهش آن‌ها نیز نتایج گذشتگان را مبنی بر مقاومت بالای پانل‌های ساندویچی با هسته درون‌رو لانه زنبوری در برابر ضربه، تایید کردند. همچینین نتیجه گرفتند که هرچه پانل ساندویچی کوچکتر باشد کیفیت و مقاومت آن نسبت به ضربه بهتر می‌شود[۲۰]. هرچند در مقاله Ataalp و همکارانش مشخص نیست منظور از

کوچک شدن پانل کاهش زاویه یا ابعاد یا هر دو می‌باشد. در زمینه ابعاد پانل‌های ساندویچی همچنان پژوهش Ramadan Abdelhamid Yousef Mohamed [۱۳] جامع ترین پژوهش انجام شده است که پیشتر ذکر شد.

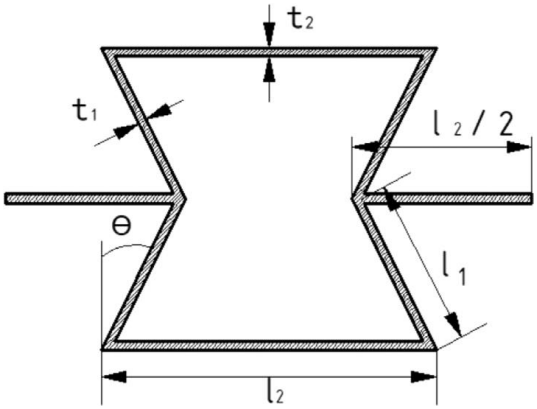
در همان سال ۲۰۱۹ نیز Nejc Novak و همکاران [۲۱] در پژوهشی ضربه با سرعت بالا بر روی یک پانل ساندویچی با هسته آگزتیک دست‌سان[1]را بررسی کردند. شماتیک پانل مورد بررسی آنان مطابق شکل زیر بود.



شکل ۱۴) . شماتیک پانل مورد بررسیNejc Novak و همکاران [۲۱]

پوسته پانل آن‌ها از جنس آلومنیوم بود. نتایج حاصل شده از پژوهش عددی آن‌ها تطابق خوبی با نتایج تست تجربی داشت. نتایج آنان نیز نشان داد که استفاده از هسته آگزتیکی مقاومت به ضربه پانل را افزایش می‌دهد [۲۱]. که پیشینیان نیز در حالت‌های مختلف به این نتیجه رسیده بودند، بجز T. C. Lim و همکارانش [۹] که به نتیجه عکس رسیده بودند.

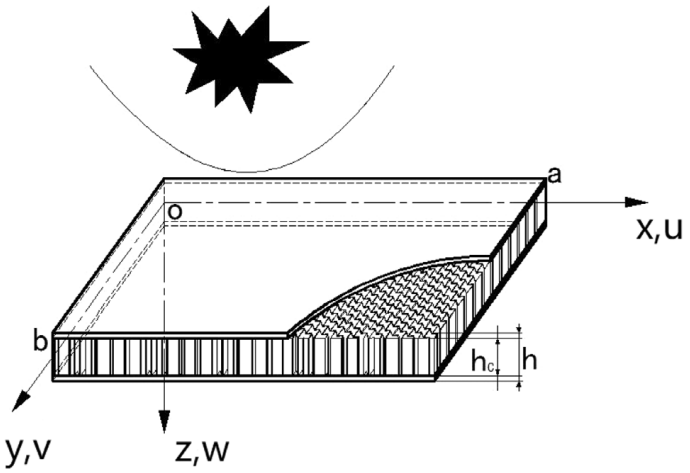
در ادامه در همان سال Junhua Zhang و همکارانش [۲۲] در پژوهشی عددی پاسخ های زودگذر غیرخطی یک پانل ساندویچی با پوسته آلومنیومی و هسته لانه زنبوری آگزتیکی را تحت بارهای ضربه بررسی کردند. یک واحد از هسته پانل مورد مطالعه Junhua Zhang و همکارانش در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.



شکل ۱۵) یک واحد هسته لانه زنبوری اگزتیکی Junhua Zhang و همکارانش [۲۲]

همچنین شماتیک پانل ساندویچی Junhua Zhang و همکارانش و محل برخورد گلوله در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.

[1] Chiral



شکل ۱۶) شماتیک پانل ساندویچی Junhua Zhang و همکارانش[۲۲]

Junhua Zhang و همکارانش معادلات پژوهش خود را به استفاده از تئوری برشی مرتبه بالا توسعه داده و سپس به صورت عددی و با استفاده از تئوری همیلتون و روش گلرکین معادلات را حل و پاسخ‌ها را با مقایسه با کارهای قبلی اعتبار سنجی کردند. پژوهش آنان نشان داد که پانل ساندویچی با هسته لانه زنبوری اگزتیکی علاوه بر جذب انرژی بالاتر نسبت به پانل‌های ساندویچی با هسته‌های معمولی (که در پژوهش‌های پیشین هم نتیجه شده بود)، جذب ارتعاش بیشتری نیز دارد [۲۲].

در اوایل سال ۲۰۲۰ نیز Shahrjerdi A [۲۳] مطالعه‌ای تجربی بر روی خواص مکانیکی پانل ساندویچی با رویه الیاف کربن و هسته فوم آگزتیک انجام داد. او در پژوهش خود روشی بهینه را برای ساخت فوم اگزتیک پیشنهاد کرد. همچنین تست‌های زیادی من جمله تست افتادن ضربه را روی نمونه خود انجام داد. Shahrjerdi A نتیجه گرفت که ساخت یک نمونه کوچک اگستیک نیازمند زمان حرارتدهی کوتاه و نیروی متراکم‌سازی کم بوده در حالی که برای ساخت بلوک‌های فوم بزرگتر نیاز به زمان حرارتدهی بیشتر و نیروی متراکم‌سازی زیادتر است. همچنین نتایج حاصل از آزمایش ضربه افتان نشان داد که مقاومت به ضربه در پانل ساندویچی با هسته فوم آگزتیک نسبت به پانل ساندویچی با هسته معمولی بیشتر است [۲۳]. که شبیه نتایج پژوهش‌های پیشین است.

۴- نتایج

در این مطالعه به بررسی و مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینه ضربه بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک در سال‌های اخیر پرداخته و نتایج مهم آنان در متن مقاله ذکر شده‌اند. به طور خلاصه از این بررسی مروری نتایج زیر استنباط می‌گردد.

- روش‌های مختلفی من جمله تراکم‌سازی و حرارت دهی برای ساخت مواد اگزتیک از مواد معمولی وجود دارد.
- مواد آگزتیک فارغ از شکل و هندسه مقاومت به ضربه بهتری نسبت به مواد معمولی دارند. همچنین جذب انرژی آن‌ها نیز نسبت به مواد معمولی بهتر است که این مسئله به علت منفی بودن ضریب پوآسون در آن‌هاست. از این رو از مواد آگزتیک به عنوان هسته در پانل‌های ساندویچی برای مقاومت دربرابر بار ضربه استفاده می‌شود. این مسئله در ضربه با هر دو ضربه بالا و پایین صادق است و پژوهش‌های بررسی شده همگی این مطلب را تایید کردند بجز پژوهش T. C. Lim و همکارانش [۹] که از نظر ما فاقد استدلال‌های قانع کننده بود و نیاز به صحت سنجی دارد.

- از کاربردهای روزمره فوم‌ها و مواد اگزتیک (به علت جذب انرژی بالای آن‌ها) می‌توان به استفاده در بانداژهای پزشکی، زیره کفش، محافظ دستگاه‌ها و وسایل ورزشی و... اشاره کرد.
- با توجه به پژوهش‌های انجام شده، پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری درون‌رو آگزتیک بهینه‌ترین مقاومت را در برابر ضربه دارند.
- ابعاد هسته لانه زنبوری درون‌رو آگزتیک نیز در میزان مقاومت ضربه آن تاثیر میستقیم دارد. به طوری که افزایش طول دندانه مورب لانه‌های زنبور باعث افزایش مدول الاستیسیته و ضریب پوآسون در جهت y و همچنین کاهش این پارامتر ها در جهت x می‌شود. همچنین کاهش زاویه بین دنده های مورب و افقی داخلی به طور کلی باعث افزایش ضریب پوآسون در هر دوجهت x وy می‌شود. همچنین افزایش ضخامت دندانه افقی و حفظ ضخامت دندانه مورب، باعث افزایش مدول الاستیسیته و نسبت پواسون در جهت x شده اما آن‌ها را در جهت y ثابت نگه می‌دارد.
- هرچه ضخامت پانل (پوسته و هسته) بیشتر باشد حد بالستیک پانل بالاتر می‌رود.
- در کنار تراکم نسبی ، طراحی هندسی هسته های سلولی نیز می تواند به میزان قابل توجهی بر عملکرد جذب انرژی تأثیرگذاری ساختارهای ساندویچ تأثیر بگذارد. همچنین مشخص شد که میزان جذب انرژی در ساختارهای سلولی مورد بررسی در این تحقیق ارتباطی با خصوصیات مکانیکی شبه استاتیک یا دما ندارد.

۵- مراجع

[1] Grima J.N., University of Malta, http://www.auxetic.info.

[2] Wetzel, J. J. (2009). “The Impulse Response of Extruded Corrugated Core Aluminum Sandwich Structures.

[3] Liu, Q. (2006). Literature review: materials with negative Poisson’s ratios and potential applications to aerospace and defence, Defence Science and Technology Organisation Victoria (Australia) Air …

[۴] سمیه محرمی (۱۳۹۳). تحلیل تجربی پانل ساندویچی با هسته فوم Auxetic, وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی مکانیک.

[5] G.Uzer, Y. Ding, F.P. Chiang“Auxetic Foam as a Core Material for Sandwich Panels”, Stony Brook, NY 11794-2300

[6] Chiang, F. P. (2009). Characterization of Deformation and Failure Modes of Ordinary and Auxetic Foams at Different Length Scales. In Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures (pp. 779-798). Springer, Dordrecht.

[7] Yang, S., Qi, C., Wang, D., Gao, R., Hu, H., & Shu, J. (2013). A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores. Advances in Mechanical Engineering, 5, 589216.

[8] Yang, L., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., Park, C., & Peters, K. (2013). Design of auxetic sandwich panels for structural applications. In *Solid freeform fabrication symposium* (Vol. 929).

[9] Lim, T. C., Alderson, A., & Alderson, K. L. (2014). Experimental studies on the impact properties of auxetic materials. *physica status solidi (b)*, *251*(2), 307-313.

[10] Allen, T., Shepherd, J., Hewage, T. A. M., Senior, T., Foster, L., & Alderson, A. (2015). Low-kinetic energy impact response of auxetic and conventional open-cell polyurethane foams. *physica status solidi (b)*, *252*(7), 1631-1639.

[11] Smardzewski, J., & Majewski, A. (2015). Mechanical properties of auxetic honeycomb core with triangular cells. In *25th International scientific conference: New materials and technologies in the function of wooden products* (pp. 103-112)

[12] MOZAFAR SHOKRI RAD (2015). AUXETIC STRUCTURES FOR ENERGY ABSORPTION APPLICATION. Malaysia

[13] El-Butch, A. M. (2015). *The Effect of the Geometry on The Negative Poisson's Ratio of Re-Entrant Periodic Honeycomb Structure* (Doctoral dissertation, Helwan University).

[14] Abrate, S (2016). Advances in Composite Sandwich Structures and their Behaviour under Impact.

[15] Novak, N., Vesenjak, M., & Ren, Z. (2016). Auxetic cellular materials-a review. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, *62*(9), 485-493.

[16] Mohamed, R. A., Lawaty, S. M., & El-Butch, A. M. (2016, April). Ballistic impact response of an aluminum sandwich panel with auxetic honeycomb core structure. In *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering* (Vol. 17, No. 17th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering, pp. 1-12). Military Technical College.

[17] Qi, C., Remennikov, A., Pei, L. Z., Yang, S., Yu, Z. H., & Ngo, T. D. (2017). Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: experimental tests and numerical simulations. *Composite structures*, *180*, 161-178.

[18] Imbalzano, G., Tran, P., Ngo, T. D., & Lee, P. V. (2017). Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, *19*(3), 291-316.

[19] Beharic, A., Egui, R. R., & Yang, L. (2018). Drop-weight impact characteristics of additively manufactured sandwich structures with different cellular designs. *Materials & Design*, *145*, 122-134.

[20] Ataalp, A., Usta, F., Türkmen, H. S., Scarpa, F., Doltsinis, I., & Kazancı, Z. (2019, June). Impact Response of Sandwich Structures with Auxetic and Honeycomb Core. In *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)* (pp. 69-72). IEEE.

[21] Novak, N., Vesenjak, M., Kennedy, G., Thadhani, N., & Ren, Z. (2019). Response of Chiral Auxetic Composite Sandwich Panel to Fragment Simulating Projectile Impact. *physica status solidi (b)*, 1900099.

[22] Zhang, J., Zhu, X., Yang, X., & Zhang, W. (2019). Transient nonlinear responses of an auxetic honeycomb sandwich plate under impact loads. *International Journal of Impact Engineering*, *134*, 103383.

[23] Shahrjerdi, A. (2020). Experimental Study of Mechanical Properties on the Sandwich Panel with Auxetic Foam Core and Carbon Fiber. *Modares Mechanical Engineering*, *20*(3), 587-598.