

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1401.8.2.7.7](https://doi.org/10.24767/131.1401.8.2.7.7)

درصد همانندی: ۸٪

تحلیل ضربه سرعت پایین پنل‌های متا-ساندویچی با هسته‌های مختلف

میترا قوانلو^۱، علی عبداللهی فر^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران mi.ghavanloo@gmail.com

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران abdollahifar@mut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹

چکیده

کف شناورها و قایق‌های پرنده بایستی با وجود سبک‌وزن بودن در مقابل بارهای ضربه‌ای مانند ضربه سرعت پایین نیز مستحکم باشند. در این مقاله، رفتار دینامیکی ساختار پنل‌های متا-ساندویچی با هسته‌های مختلف تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین به روش تحلیلی و عددی بررسی می‌شود. چهار نمونه هسته مختلف شامل لانه‌زنبوری، آگزتیک، مربعی و مثلثی از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید تحت ضربه، یک پرتابه نیم کرووی فولادی با شعاع ۱۵ میلی‌متر با شرایط مرزی ثابت بررسی شده است. رفتار متقابل بین ضربه‌زننده با پنل متا-ساندویچی به کمک یک سیستم دو درجه آزادی جرم و فنر با استفاده از نرم‌افزار المان محدود همانند انسیس ورک بِنچ مدل‌سازی شده است. بیشترین نیروی تماسی برخورد نیز به صورت تحلیلی و عددی با یکدیگر مقایسه می‌شود و نتایج نشان‌دهنده تطابق خوبی میان این دو روش است. با توجه به اهمیت پارامترهای مؤثر در پاسخ دینامیکی ساختار پنل‌های ساندویچی اثر برخی پارامترها شامل سرعت و جرم ضربه‌زننده روی بیشترین نیروی تماسی برخورد، بیشترین جابه‌جایی و بیشترین تنش فون میسز به صورت عددی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده این نکته است که اثرات سرعت ضربه‌زننده عامل مهم‌تری در افزایش و کاهش نیروی تماسی، جابه‌جایی، تنش فون میسز و زمان اعمال ضربه نسبت به جرم ضربه‌زننده است. در انتها نیز با مقایسه هسته‌های مختلف ارائه شده در این مقاله با یکدیگر، هسته آگزتیک برترین هسته از میان سایر هسته‌ها معرفی می‌شود.

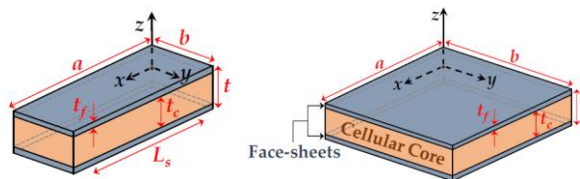
واژه‌های کلیدی: پنل‌های متا-ساندویچی، متامواد مکانیکی، روش المان محدود، ضربه سرعت پایین

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، تقاضا برای حمل‌ونقل‌های دریایی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته است. از آنجاکه دستیابی به سرعت بالا در شناورهای دریایی منوط به وزن آنهاست، استفاده از پنل‌های ساندویچی سبک با استحکام بالا در مقابل بارهای ضربه‌ای مختلف در طراحی بدنه شناورها مورد توجه طراحان و محققان قرار گرفته است.

امروزه پنل ساندویچ‌ها یکی از مهم‌ترین انواع سازه در حوزه طراحی و توسعه کاربردهای مهندسی به‌ویژه در صنایع دریایی به‌شمار می‌آیند. ساختار یک پنل ساندویچ از سه بخش تشکیل شده است که اغلب از دو رویه نازک جامد با سختی خمشی بالا تشکیل شده‌اند که با یک هسته سلولی سبک و نسبتاً ضخیم از هم جدا می‌شوند. در شکل یک نمای شماتیک پنل‌های ساندویچی مشاهده می‌شود [۱].

هسته‌های سلولی پنل ساندویچ‌ها بارهای برش عرضی و فشاری و رویه‌های نازک هسته، بارهای محوری و گشتاور خمشی را تحمل می‌کنند. هسته‌های سلولی بیشترین نقش را در عملکرد پنل ساندویچ‌ها دارند و می‌تواند از نظر سختی الاستیک به حد بالایی برسند و حداکثر ذخیره انرژی کرنشی را نشان دهند [۲].



شکل ۱. تصویری از هندسه و سیستم مختصات تیر و پنل‌های متا-

ساندویچ [۱]

پنل‌های ساندویچی به علت ساختار منحصربه‌فرد در ساختار خود، ویژگی‌های خاصی دارند که مهم‌ترین آن‌ها نسبت استحکام به وزن و نسبت سفتی به وزن بالاست. نوع جدیدی از متا مواد که به‌عنوان هسته در ساخت پنل ساندویچ‌ها استفاده می‌شود با نام ساختار متا- ساندویچ‌ها شناخته می‌شود. متا مواد، طوری طراحی و ساخته می‌شوند که خواص مکانیکی منحصربه‌فرد و اغلب غیرمتعارفی داشته باشند. این

مواد در طبیعت وجود ندارند و به‌صورت مهندسی‌شده از مواد موجود در طبیعت با خواص متفاوت و معمولاً از الگوهای تکرارشونده با سلول‌های کوچک واحد که در یک هندسه خاص چیده شده‌اند، ساخته می‌شود [۳]. متا مواد دربرگیرنده خواص مکانیکی، الکترومغناطیسی و موج صوتی دلخواهی است که جذابیت قابل توجهی را در چند دهه اخیر ایجاد نموده است. مشخصه اصلی آن‌ها از طراحی دقیق و آرایش ساختارشان حاصل می‌شود که در مواد معمولی یافت نمی‌شود و به مواد مورد استفاده در ساخت، هندسه رویه‌ها و توپولوژی هسته‌های سلولی بستگی دارد [۴]. متا مواد مکانیکی به دلیل خواص نامتعارف در ساختار وجودی خود مانند ضریب پواسون منفی، مدول حجمی منفی، ضریب شکست منفی و ... توانسته‌اند نظرات محققان زیادی را جلب نمایند [۵]. از این رو ساختار متا- ساندویچ‌های سبک عمدتاً به دلیل خواص چندمنظوره و عملکرد عالی در ساختار خود که شامل نسبت وزن به سختی خمشی بالا، عایق حرارتی عالی و قابلیت جذب انرژی بالاست باعث شده است که امروزه به‌طور گسترده در صنایع دریایی، هوایی، خودروسازی، آسیاب بادی و مانند آن استفاده شوند [۶]. بنابراین با توجه به کاربرد زیاد و روزافزون پنل‌های ساندویچی در جهان شناخت خواص مکانیکی آن‌ها امری ضروری به‌شمار می‌آید. سازه‌ها و پنل ساندویچ‌ها علاوه بر اینکه مورد بارگذاری استاتیکی قرار دارند، تحت بارگذاری دینامیکی به‌خصوص ضربه نیز واقع می‌شوند. یکی از مسائل مرتبط با سازه‌های پنل ساندویچ تأثیر ضربه اجسام خارجی بر آن‌هاست. به‌عنوان مثال می‌توان سقوط ابزار در حین کار یا تعمیرات و نگهداری، برخورد سنگ‌ریزه کف باند فرودگاه با سازه‌های هوایی در حین بلند شدن از باند و طوفان تگرگ را نمونه‌هایی از برخورد سرعت پایین به شمار آورد [۷]. ضربه سرعت پایین را می‌توان تا محدوده سرعت ۱۰ متر بر ثانیه تعریف کرد [۸].

در ضربه سرعت پایین زمان برخورد ضربه‌زننده با هدف به اندازه‌ای است که کل سازه در رفتار و پاسخ تأثیر می‌پذیرند. ضربه سرعت پایین بر پنل ساندویچ ممکن است باعث آسیب

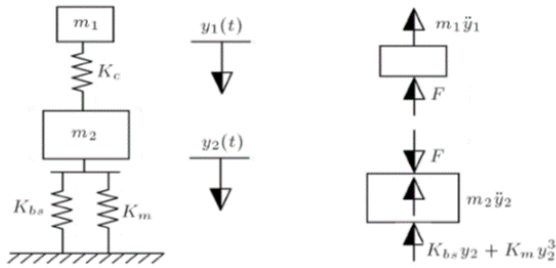
داخلی شود که با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نیست؛ بنابراین بررسی رفتار سازه‌های متا-ساندویچی در برابر ضربه سرعت پایین اهمیت ویژه‌ای دارد. پژوهش‌های عمده‌ای در زمینه بارهای ضربه‌ای، روی پنل ساندویچ‌های کامپوزیتی با روش‌های تجربی، عددی و مدل‌سازی ریاضی به‌طور گسترده بررسی شده است. مهم‌ترین و کاربردی‌ترین ابزار مورد استفاده در روش‌های عددی المان محدود است که این روش توسط نرم‌افزارهای قدرتمند المان محدود مانند انسیس و آباکوس اجرا می‌شود. اولین تحلیل ضربه عمودی بر یک صفحه مستطیلی شکل توسط کاراس در سال ۱۹۳۹ ارائه شده است. او در این روش ضربه وارده به مرکز یک صفحه مستطیلی شکل را با شرایط مرزی ساده مورد تحلیل قرار داد [۹]. پس از آن مارگور در سال ۱۹۴۴ ابتدایی‌ترین کار تحقیقاتی در مورد بارهای فشاری درون صفحه‌ای در سازه‌های ساندویچی را مورد ارزیابی قرار داد [۱۰].

از آن زمان به بعد، مطالعه و تحقیق در زمینه کامپوزیت‌ها و پنل ساندویچ‌ها رونق گرفت. سان و چن [۱۱] با استفاده از اجزای محدود و قانون تماسی هرترز به صورت تجربی صفحات پنل ساندویچ کامپوزیتی با تنش اولیه را بررسی کردند. در این تحقیق اثرات سرعت ضربه و جرم و اندازه ضربه‌زننده را بر رفتار پنل ساندویچ کامپوزیتی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که سرعت و جرم ضربه‌زننده تأثیر مستقیمی بر رفتار و پاسخ صفحات پنل ساندویچ دارند.

کاستینی و همکارانش [۱۲] پاسخ ضربه سرعت پایین در پنل‌های ساندویچی لانه‌زنبری را به روش المان محدود مدل‌سازی کردند و به دقت خوبی بین نتایج عددی با نتایج تجربی دست یافتند. هر و لیانگ [۱۳] پاسخ رفتار رویه کامپوزیتی تحت ضربه سرعت پایین را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس برای دو شرط مرزی ساده و گیردار بررسی نموده، همچنین تأثیر اندازه مش‌بندی در پاسخ استخراجی از نرم‌افزار، سرعت ضربه‌زننده، میزان نیروی تماسی و خیز ورق را به روش حل عددی تعیین و محاسبه کردند. ملک‌زاده و همکاران [۱۴] پاسخ ضربه با سرعت پایین را روی یک پنل کامپوزیتی به وسیله یک ضربه‌زننده

استوانه‌ای صلب با در نظر گرفتن شرایط مرزی ساده و گیردار مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش جرم ضربه‌زننده، تغییر شکل و زمان تماس افزایش می‌یابد و ترتیب لایه چینی ورق‌ها اثر ناچیزی بر نیروی ضربه و زمان تماس دارد. ترنر [۱۵] در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود، طراحی و چاپ سازه‌های معماری شده را با هسته‌های پلیمری مختلف با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی ثابت تحت بار ضربه سرعت پایین بررسی کرد. یزدانی سروستانی و همکاران [۱۶] مطالعه‌ای جامع از تیرها و صفحات معماری شده از هسته‌های متا-ساندویچ مختلف با استفاده از پرینت سه‌بعدی چاپ انجام دادند. آن‌ها یک روش عددی و تحلیلی به همراه آزمایش‌های تجربی شامل آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و آزمایش ضربه با سرعت پایین را برای نسل جدیدی از سازه‌های ساندویچی متا ماده توسعه داده‌اند. پاسخ‌های ساختاری، مکانیزم شکست، سختی خمشی، قابلیت جذب ضربه با جذب انرژی برای چهار توپولوژی از هسته‌های متا-ساندویچ را با هسته سلولی آگرتیک مقایسه کردند. نتایج نشان داد که ساختارهای دارای هسته سلولی متا ماده ایزومکس که در این مقاله معرفی شده است، بیشترین قابلیت جذب انرژی را دارند.

هوآ و همکاران [۱۷] مقاله‌ای در زمینه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته آگرتیک و غیر آگرتیک با استفاده از چاپ سه‌بعدی تحت تأثیر ضربه سرعت پایین ارائه داده‌اند. آزمایش‌های ضربه با سرعت پایین را ابتدا برای مشخص کردن الگوی تغییر شکل هسته‌های سلولی به انجام رساندند. هسته آگرتیک که خواصی همچون ضریب پواسون منفی دارد پس از ضربه‌های مختلف که در تست آزمایش به آن وارد شد میزان جذب انرژی کمتری از خود نشان دادند اما استحکام و دوام بالاتری نسبت به غیر آگرتیک‌ها دارند و تنها در صورتی که انرژی ضربه مناسب باشد، هسته‌های آگرتیک بهترین عملکرد را در کاهش بار ضربه‌ای و نیرو خواهند داشت و به همین دلیل عملکرد ثابتی را ارائه می‌دهند. چانگ و همکاران [۱۸] به شیوه‌سازی تجربی و عددی به روش المان محدود برای ارزیابی پاسخ دینامیکی



شکل ۲. سیستم جرم-فنر جهت مدل‌سازی ضربه سرعت پایین [۱۹]

شرایط اولیه قبل از تماس به شرح زیر است:

$$\dot{y}_1(0) = V \quad (۳)$$

$$y_1(0) = y_2(0) = 0 \quad (۴)$$

در معادله (۳)، V سرعت اولیه ضربه‌زننده قبل از تماس است. اگر تغییر شکل محوری و فرورفتگی پرتابه ناچیز فرض شود، مدل را می‌توان به‌طور قابل‌توجهی به یک سیستم درجه آزادی با معادله حرکت زیر ساده کرد:

$$(m_1 + m_2)\ddot{y} + K_{bs}y = 0 \quad (۵)$$

برای ساده‌سازی بیشتر معادله تعادل، فرض می‌شود که سازه و ضربه‌زننده به‌محض برقراری تماس به‌صورت زیر با هم ارتعاش ($y_1 = y_2 = y$) خواهند کرد.

$$y(t) = \frac{V}{\omega} \sin(\omega t) \quad (۶)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{K_{bs}}{m_1 + m_2}} \quad (۷)$$

از سوی دیگر حداکثر نیروی تماسی، F_{max} ، به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

$$F_{max} = V \sqrt{K_{bs}(m_1 + m_2)} \quad (۸)$$

معادله (۸) بر اساس این فرض تنظیم شده است که سفتی صفحه در هنگام ضربه ثابت می‌ماند. برای محاسبه مقدار سفتی برشی-خمشی صفحه، جابه‌جایی استاتیکی صفحه زیر نیروی واحد متمرکز وارد بر مرکز صفحه (δ) با استفاده از روش اجزا محدود محاسبه می‌شود، سپس سفتی برشی-خمشی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$K_{bs} = \frac{1}{\delta} \quad (۹)$$

پنل ساندویچ موجدار نوع U تحت ضربه با سرعت پایین پرداختند. نتایج نشان داد که پنل ساندویچ موجدار نوع U عملکرد و مقاومت بهتری در برابر ضربه عرضی نسبت به طولی دارد و این بدین دلیل است که تعداد سلول‌های هسته بیشتر درگیر تغییر شکل و جذب انرژی هستند.

با توجه به ماهیت ضربه به‌ویژه ضربه سرعت پایین در بررسی و تحلیل پنل‌های ساندویچی با هسته‌های سبک به کار گرفته شده در بدنه شناورهای دریایی، استفاده از هندسه‌های مختلف در هسته پنل ساندویچ‌ها برای بررسی ضربه ضروری است. از این رو در این مقاله ساختار پنل‌های متا-ساندویچی با چهار پیکربندی مختلف از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید تحت ضربه سرعت پایین تحلیل و بررسی می‌شود. سپس اثرات پارامترهای سرعت و جرم ضربه‌زننده بر رفتار دینامیکی پنل‌های متا-ساندویچ به روش عددی در نرم‌افزار المان محدود ارزیابی می‌شود که نوآوری مقاله حاضر می‌باشد.

۲. محاسبه تحلیلی بیشترین نیروی تماسی برخورد

به‌منظور تخمین الاستیک نیروی ضربه اعمال شده به یک صفحه با تکیه‌گاه ثابت، می‌توان از یک سیستم جرم و فنر ایده‌آل استفاده کرد. در شکل ۲ پنل ساندویچ و ضربه‌زننده به‌صورت یک سیستم دو درجه آزادی جرم و فنر مدل‌سازی می‌شود. با توجه به مدل ارائه‌شده در شکل ۲ می‌توان معادله‌های حرکت دینامیکی کل سیستم را به‌صورت رابطه‌های زیر بیان کرد:

$$m_1\ddot{y}_1 + F = 0 \quad (۱)$$

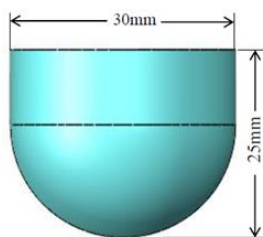
$$m_2\ddot{y}_2 + K_{bs}y_2 + K_m y_2^3 - F = 0 \quad (۲)$$

در معادله (۱) و (۲)، جرم ضربه‌زننده m_1 و جرم صفحه یا پنل ساندویچ m_2 است. y_1 و y_2 به ترتیب جابه‌جایی ضربه‌زننده و مرکز صفحه هستند. F نیروی تماس بین ضربه‌زننده و صفحه است. K_{bs} سفتی برشی-خمشی صفحه و K_m سفتی غشایی صفحه است. در معادله (۲) از ترم غیرخطی y_2^3 صرف‌نظر شده است. همچنین K_c نیز که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سفتی تماسی صفحه است.

۵۰۰ و ۷۵۰ گرم در سه سرعت اولیه ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ متر بر ثانیه به مرکز رویه فوقانی ساختار متا-ساندویچی برخورد می‌کند. از این رو ضربه‌زننده به صورت جسمی شکل‌پذیر تعریف می‌شود. استفاده از ضربه‌زننده شکل‌پذیر با خواص فیزیکی و مکانیکی معین طبق جدول ۱، به شبیه‌سازی واقعی‌تر برخورد منجر می‌شود، اما نیاز به مدل سه‌بعدی ضربه‌زننده است. اما زمان حل مسئله را افزایش خواهد داد. مسیر حرکت ضربه‌زننده در راستای محور Z و عمود بر رویه فوقانی پنل ساندویچ با سرعت‌های مختلف گفته شده در بالا مورد اصابت قرار می‌گیرد.

۳-۳. شبیه‌سازی عددی

با پیشرفت فناوری و ساخت قطعات پیچیده، لزوم استفاده از روش‌های علمی دقیق و مناسب برای کاهش زمان و هزینه مطرح است. حال استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی در تحلیل مسائل تحقیقاتی و صنعتی، ابزاری قوی و هوشمند برای تخمین و پیش‌بینی نتایج به‌شمار می‌آیند. با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار انسیس، در مقاله حاضر، مدل‌سازی ضربه سرعت پایین روی پنل متا-ساندویچ با هسته‌های مختلف، به کمک نرم‌افزار انسیس و رک‌بنچ و در محیط دینامیک صریح صورت پذیرفته است.



شکل ۴. ابعاد هندسی ضربه‌زننده نیم‌کروی

با توجه به اینکه ضربه‌زننده و پنل متا-ساندویچ به صورت جسم انعطاف‌پذیر سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است و فرآیند مورد بررسی در مسئله نیز فرآیند برخورد می‌باشد. حال برای مش‌بندی ضربه‌زننده و پنل‌های متا-ساندویچی شامل هسته و رویه‌های تحتانی و فوقانی از المان Tet4 استفاده شده است. المان Tet4 ساده‌ترین عنصر چهاروجهی با چهار گره است

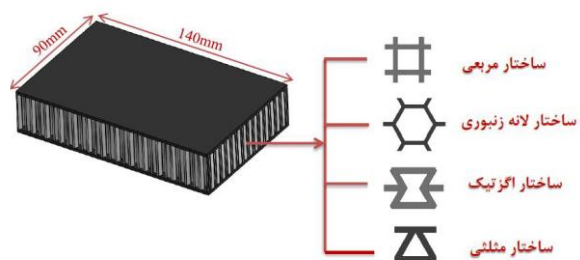
مدل تحلیلی ارائه شده بیشترین نیروی تماسی برخورد را با تقریب مناسبی پیش‌بینی می‌کند. در ادامه پاسخ‌های بیشترین نیروی تماسی برخورد به روش تئوری و عددی به دست آمده از نرم‌افزار المان محدود مقایسه می‌شود.

۳. مدل‌سازی پنل متا-ساندویچ

۳-۱. ابعاد مدل

پنل‌های ساندویچی مورد مطالعه در این مقاله، از دو بخش هسته‌های سلولی سبک و رویه‌های فوقانی و تحتانی تشکیل شده است. ابعاد کلی پنل ساندویچ $140 \times 90 \times 30$ میلی‌متر مکعب بوده و ضخامت رویه‌های طرفین پنل هر کدام ۲ میلی‌متر است و هسته سلولی نیز ۲۶ میلی‌متر از ضخامت پنل ساندویچی را به خود اختصاص داده است. طراحی و مدل‌سازی هسته و رویه‌های مختلف پنل ساندویچ در نرم‌افزار تخصصی سالیدورکس صورت گرفته است.

ساختارهای پنل ساندویچ مورد استفاده در این مطالعه چهار هسته سلولی مختلف شامل هسته لانه‌زنبوری، آگزتیک، مربعی و مثلثی طراحی و مدل‌سازی شده است که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. برای مدل کردن هسته به صورت یک مدل سه‌بعدی، ابتدا یک سلول واحد از کل هسته مدل شده، سپس با تکرار در دو جهت محور X و Y، کل هسته در نرم‌افزار سالیدورکس مورد مدل‌سازی قرار گرفته است.

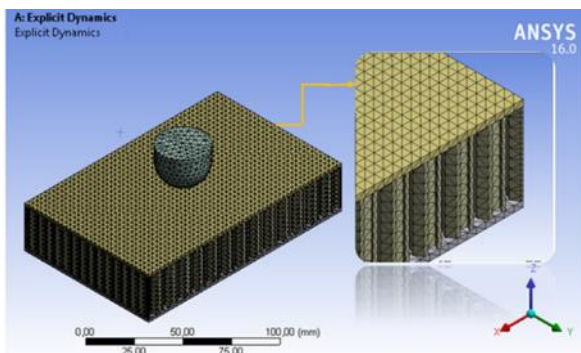


شکل ۳. انواع هسته‌های متا-ساندویچ مدل‌سازی شده در این مقاله

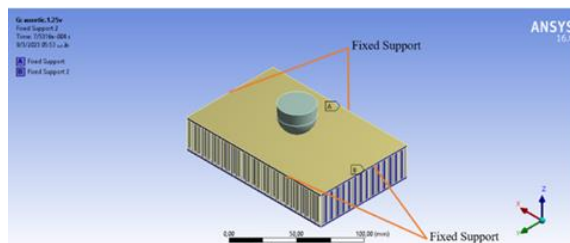
۳-۲. ابعاد ضربه‌زننده

در این پژوهش یک ضربه‌زننده نیم‌کروی فولادی با شعاع ۱۵ میلی‌متر و با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر مطابق شکل ۴ مدل‌سازی شده است. جرم و سرعت ضربه‌زننده به ترتیب در سه حالت ۲۵۰،

تعداد و اندازه مناسب المان برای همگرایی دقیق نتایج در نرم‌افزار بررسی شده است. در ادامه نیز یافته‌های پژوهش که خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی پدیده ضربه با سرعت پایین بر روی پنل متا-ساندویچ با هسته‌های مختلف به صورت عددی و تحلیلی استخراج شده است با هم مقایسه می‌شود. تأثیر پارامترهای فیزیکی مختلف مانند جرم ضربه‌زننده، سرعت ضربه‌زننده، هسته با هندسه‌های مختلف بر روی پاسخ دینامیکی پنل متا-ساندویچ به صورت نمودار ارائه و بررسی شده است.



شکل ۵. مش بندی پنل متا-ساندویچ در نرم‌افزار انسیس



شکل ۶. شرایط مرزی برای پنل متا-ساندویچ

۴-۱. صحت‌سنجی

به منظور بررسی و صحت‌سنجی در این مقاله، نتایج شبیه‌سازی پنل‌های متا-ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین را با نتایج مقاله‌های مراجع [۲۲-۲۳] صحت‌سنجی نموده‌ایم. در این بررسی یک ضربه‌زننده کروی با شعاع ۱۰ میلی‌متر به جرم 0.328 کیلوگرم با سرعت ۱ متر بر ثانیه به صفحه مربعی همسانگرد با ابعاد 200×200 میلی‌متر و با ضخامت ۸ میلی‌متر با شرایط تکیه‌گاهی ساده برخورد می‌کند. صفحه و ضربه‌زننده فولادی از یک جنس با خواص مکانیکی یکسان شامل مدول الاستیک $206/8$ گیگاپاسکال، چگالی 7810

که هر گره تنها سه درجه آزادی از نوع انتقالی دارد و نوع مش موردبررسی در شبیه‌سازی نیز در شکل ۵ مشاهده می‌شود. به منظور اعمال شرایط مرزی در نرم‌افزار، سطح خارجی اطراف هسته و رویه‌های پنل متا-ساندویچ به صورت ثابت یا گیردار تعیین شده که نشان‌دهنده این نکته است که جابه‌جایی و گشتاورها در تمام جهت‌ها ثابت و صفر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۶، جزئیات شرایط مرزی اعمال‌شده در نرم‌افزار المان محدود را نشان می‌دهد. نکته مهم قبل از مدل‌سازی در مورد اکثر پنل ساندویچ‌ها، عدم نیاز به در نظر گرفتن لایه چسب در مدل‌سازی است [۲۱]. به همین دلیل در این شبیه‌سازی بین رویه‌های پایینی و بالایی با هسته اتصال از نوع Bonded در نظر گرفته می‌شود.

۴-۳. جنس و خواص مکانیکی مواد

در ساختار پنل‌های متا-ساندویچی از خواص ماده پلی‌لاکتیک‌اسید برای هسته و رویه‌ها و برای ضربه‌زننده نیز از خواص فولاد برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

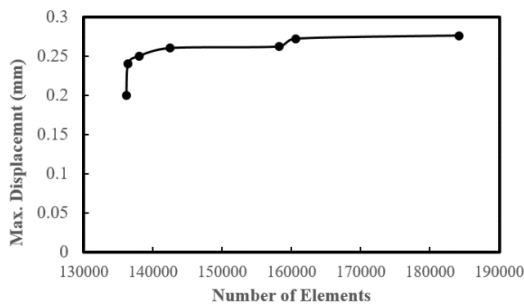
جدول ۱. خواص مکانیکی هسته، رویه‌ها و ضربه‌زننده

فولاد	پلی‌لاکتیک‌اسید	خصوصیات مکانیکی
۲۰۰	۳/۵	مدول الاستیک (E) (GPa)
۷۸۵۰	۱۲۴۰	چگالی (ρ) (kg/m^3)
۲۵۰	۷۰	تنش تسلیم (σ_y) (MPa)
۴۶۰	۷۳	تنش نهایی (σ_u) (MPa)
۰/۳	۰/۳۶	ضریب پواسون (ν)

۴. نتایج و بحث

در این بخش برخورد سرعت پایین ضربه‌زننده نیم‌کروی بر پنل‌های متا-ساندویچ با هسته‌های مختلف بررسی شده است. ابتدا برای حصول اطمینان از نتایج شبیه‌سازی عددی به کمک تحقیقات گذشته صحت‌سنجی صورت پذیرفته است. سپس

یک پارامتر را به عنوان هدف برای تحلیل در نظری می‌گیریم، سپس تعداد المان را افزایش داده تا تأثیر کوچک کردن مش بر پارامتر هدف سنجیده شود. این عمل تا زمانی ادامه خواهد یافت که مصالحه‌ای بین زمان و تعداد و اندازه المان به وجود آید، که به اصطلاح گفته می‌شود که پاسخ همگرا شده است و نیازی به افزایش بیشتر المان نیست و افزایش المان کمکی به دقت حل نخواهد داشت و فقط زمان حل را افزایش می‌دهد. تعداد و اندازه المان‌ها با استفاده از مطالعه همگرایی مش به دست می‌آید و به ترتیب ۱۸۵۵۱۶ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده که در شکل ۸ نمودار بیشترین جابه‌جایی بر تعداد المان برای مشخص نمودن همگرایی مش مشاهده می‌شود.



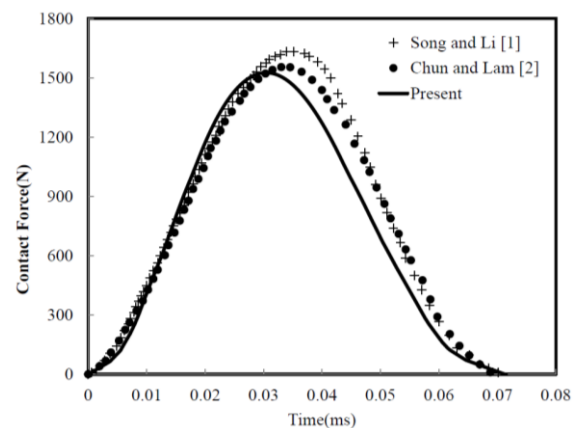
شکل ۸. بررسی و تعیین همگرایی مش‌بندی در نرم‌افزار انسیس

۴-۳. مقایسه و بررسی نتایج حاصل از روش تحلیلی و عددی

در این بخش از پژوهش نتایج حاصل از بیشترین نیروی تماسی بین ضربه‌زننده و پنل‌های متا-ساندویچی با هسته‌های مختلف شامل آگرتیک، لانه‌زنبوری، مربعی و مثلثی تحت ضربه سرعت پایین، یک ضربه‌زننده فولادی با جرم ۵۰۰ گرم در سه سرعت برخورد مختلف شامل ۰٫۷۵، ۱ و ۱٫۲۵ متر بر ثانیه به روش تحلیلی و عددی بررسی و مقایسه می‌شود. هدف اصلی از مدل تحلیلی جرم و فنر با دو درجه آزادی یافتن تابع بیشترین نیروی برخورد F_{max} بین ضربه‌زننده و پنل متا-ساندویچ تحت ضربه سرعت پایین است. بنابراین ابتدا تابع F_{max} بر اساس روابط تئوری بیان شده برای تمام پنل‌های ساندویچی با هسته‌های مختلف محاسبه می‌شود، سپس نتایج حاصله با داده‌های به‌دست‌آمده از روش عددی در نرم‌افزار المان محدود مقایسه و ارزیابی می‌شود. در جدول (۲) نتایج بیشترین نیروی تماسی به ازای چهار پیکربندی مختلف با

کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون برابر مقدار ۰٫۳ است. در مقاله‌های [۲۲-۲۳] برای محاسبه نیروی تماسی برخورد از روش‌های تئوری غیرخطی هرتز و اختلال دو گامی برای روش تحلیلی استفاده شده است. اما در مقاله حاضر، برای اعتبارسنجی نتایج از روش المان محدود در نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ استفاده شده است. شکل ۷ مقایسه نتایج نمودار صحت‌سنجی را نشان می‌دهد.

درصد خطای بیشترین نیروی تماسی برخورد نرم‌افزار با مقاله لام و چان و سانگ و لی به ترتیب برابر مقدار ۰٫۸۴٪ و ۰٫۵۵٪ است. درصد خطای بیشترین زمان رخداد در نرم‌افزار با مقاله‌های لام و چان و سانگ و لی به ترتیب برابر مقدار ۶٫۹٪ و ۱۲٫۵٪ است. با بررسی و مقایسه نتایج داده‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار انسیس و مقاله‌های مراجع [۲۲-۲۳] با یکدیگر، مطابقت خوبی بین روش عددی و تئوری وجود دارد.



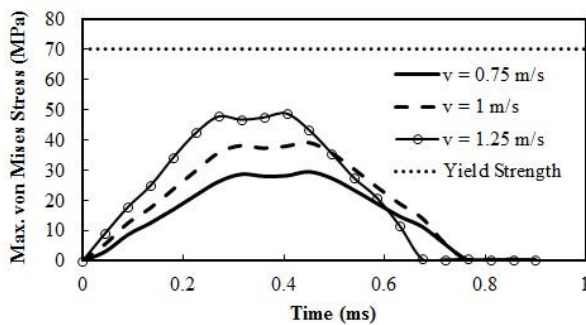
شکل ۷. مقایسه نتایج صحت‌سنجی، نمودار نیروی تماس بین ضربه‌زننده و صفحه بر حسب زمان

۴-۲. یافتن المان مناسب جهت همگرایی نتایج

مبنای حل در نرم‌افزارهای المان محدود، شبکه‌بندی و تقسیم مدل به اجزای کوچک‌تر است و تعیین تعداد و اندازه مناسب المان‌های سازه اهمیت زیادی دارد و در استخراج نتایج صحیح، تأثیر به‌سزایی دارد. بنابراین رسیدن به تعداد و نوع المان‌های مناسب باید در فرایند مش‌بندی، مورد توجه قرار گیرد. به همین دلیل پس از شبکه‌بندی و رسیدن به نظم در هندسه سازه و ظاهر مش، برای رسیدن به تعداد مطلوب المان

۴-۴-۱. بررسی تأثیر سرعت ضربه‌زننده بر ساختار هسته آگزتیک

نمودار بیشترین تنش فون میسر برحسب زمان برای ساختار هسته آگزتیک در سه سرعت مختلف در شکل ۹ مشاهده می‌شود. نتایج بیشترین تنش فون میسر برای ساختار متا-ساندویچ با هسته آگزتیک از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۲۹/۴۶، ۳۹/۰۹ و ۴۸/۷۰ مگاپاسکال استخراج شده است.



شکل ۹. نمودار بیشترین تنش فون میسر برحسب زمان برای ساختار هسته آگزتیک در سه سرعت مختلف

طبق نتایج شکل بالا، با افزایش سرعت ضربه‌زننده بیشترین تنش فون میسر نیز ۴۰٪ افزایش می‌یابد، زیرا انرژی ضربه‌زننده در سرعت‌های مختلف افزایش یافته است. بنابراین با افزایش سرعت ضربه‌زننده، شاهد کاهش مدت زمان برخورد میان ضربه‌زننده با ساختار هسته آگزتیک هستیم.

۴-۴-۲. بررسی تأثیر سرعت ضربه‌زننده بر ساختار هسته مثلثی

نمودار بیشترین تنش فون میسر برحسب زمان برای ساختار هسته مثلثی در سه سرعت مختلف در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. نتایج بیشترین تنش فون میسر برای ساختار متا-ساندویچ با هسته مثلثی از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۴۲/۱۸، ۵۶/۰۲ و ۶۸/۶۰ مگاپاسکال استخراج شده است. طبق نتایج نمودار با افزایش سرعت ضربه‌زننده بیشترین تنش فون میسر نیز ۳۹٪ افزایش می‌یابد، زیرا انرژی ضربه‌زننده در سرعت‌های مختلف افزایش یافته است. اما با افزایش سرعت ضربه‌زننده، شاهد کاهش مدت زمان برخورد میان ضربه‌زننده با ساختار هسته مثلثی هستیم.

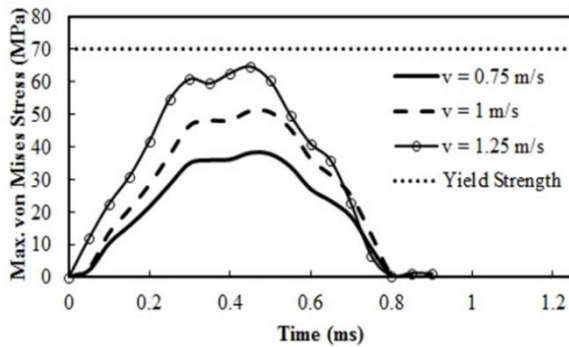
سرعت‌های برخورد اولیه با در نظر گرفتن روش تحلیلی و عددی مقایسه شده است. از مقایسه نتایج حاصل در جدول (۲) می‌توان نتیجه گرفت که تطابق خوبی میان روش عددی و تحلیلی وجود دارد. کمترین درصد خطای محاسبه شده در روش عددی و تحلیلی در سرعت ۰/۷۵ متر بر ثانیه و مربوط به هسته لانه‌زنبوری با مقدار ۰/۰۶٪ است.

جدول ۲. مقایسه بیشترین نیروی تماسی بر اساس روش تحلیلی و عددی

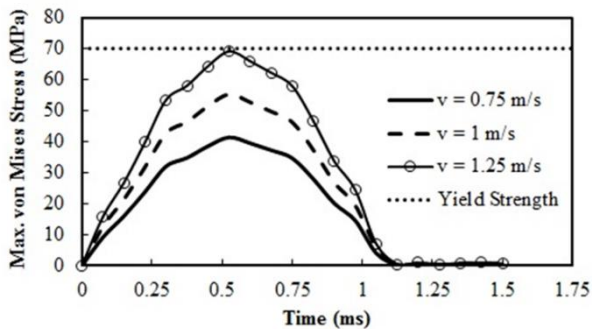
هسته	سرعت (m/s)	بیشترین نیروی تماسی (N)	
		تئوری	عددی
آگزتیک	۰/۷۵	۱۵۷۳/۹	۱۵۹۸/۱
	۱	۲۰۹۸/۶	۲۱۳۰/۵
	۱/۲۵	۲۶۲۳/۳	۲۶۶۲/۸
لانه‌زنبوری	۰/۷۵	۱۱۰۲/۷	۱۰۹۵/۶
	۱	۱۴۷۰/۲	۱۴۵۹/۱
	۱/۲۵	۱۸۳۷/۸	۱۸۲۱/۶
مربعی	۰/۷۵	۱۴۶۸/۲	۱۵۱۹/۴
	۱	۱۹۵۷/۶	۲۰۳۳/۹
	۱/۲۵	۲۴۴۷	۲۵۵۸/۵
مثلثی	۰/۷۵	۱۶۴۰/۸	۱۴۵۹/۳
	۱	۲۱۸۷/۷	۱۹۷۳/۳
	۱/۲۵	۲۷۳۴/۶	۲۵۵۹/۵

۴-۴-۳. تأثیر پارامتر سرعت ضربه‌زننده بر بیشترین تنش

پارامتر سرعت نقش مؤثری در پدیده ضربه دارد، بنابراین در این بخش تأثیر پارامتر سرعت برای هندسه‌های مختلف شامل آگزتیک، مربعی، مثلثی و لانه‌زنبوری با سرعت‌های ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ متر بر ثانیه با سطح انرژی متفاوت و در نظر گرفتن شرایط مرزی ثابت و جرم ضربه‌زننده ۵۰۰ گرم بررسی و نمودار بیشترین تنش برحسب زمان ارزیابی شده است، خروجی‌های مدنظر از نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ محاسبه می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار بیشترین تنش فون میسز برحسب زمان برای ساختار هسته مربعی در سه سرعت مختلف



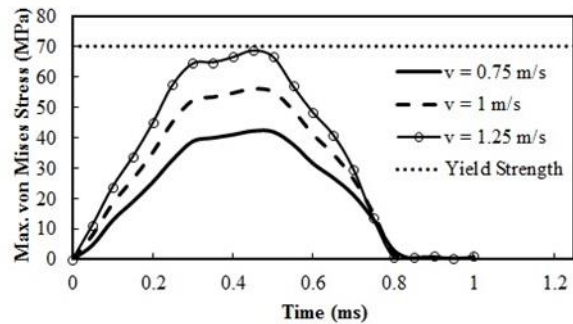
شکل ۱۲. نمودار بیشترین تنش فون میسز برحسب زمان برای ساختار هسته لانه‌زنبوری در سه سرعت مختلف

۴-۵. تأثیر پارامتر سرعت ضربه‌زننده بر بیشترین نیروی تماسی

پارامتر سرعت ضربه‌زننده نقش مؤثری در بیشترین نیروی تماسی دارد. در بررسی پاسخ ضربه، دو پارامتر زمان برخورد و بیشترین نیروی تماسی ناشی از ضربه اهمیت دارد. منظور از نیروی تماسی نیرویی فوق‌العاده کوتاه‌مدت است که در حین برخورد به جسم وارد می‌شود. در لحظه شروع تماس، نیروی تماس صفر است و ضربه‌زننده سرعت اولیه مشخصی دارد. با نفوذ ضربه‌زننده در هدف، سرعت آن کاهش یافته و نیروی تماسی زیاد می‌شود. سپس نیروی تماس به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن ضربه‌زننده شروع به برگشتن می‌کند. در این مدت زمان نیروی تماس کاهش می‌یابد و در نهایت در لحظه جدا شدن ضربه‌زننده از هدف نیروی تماس دوباره به صفر می‌رسد. پس از شبیه‌سازی و تحلیل نمودار نیروی تماسی برحسب زمان استخراج می‌شود.

۴-۳-۴. بررسی تأثیر سرعت ضربه‌زننده بر ساختار هسته مربعی

نمودار بیشترین تنش فون میسز برحسب زمان برای ساختار هسته آگزیتریک در سه سرعت مختلف در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار بیشترین تنش فون میسز برحسب زمان برای ساختار هسته مثلثی در سه سرعت مختلف

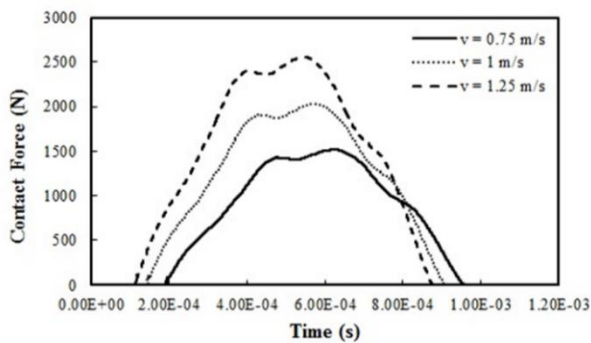
نتایج بیشترین تنش فون میسز برای ساختار متا-ساندویچ با هسته آگزیتریک از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۳۸/۵۶، ۵۰/۹۳ و ۶۴/۶۲ مگاپاسکال استخراج شده است. طبق نتایج نمودار با افزایش سرعت ضربه‌زننده بیشترین تنش فون میسز نیز ۴۰٪ افزایش می‌یابد، اما با افزایش سرعت ضربه‌زننده، شاهد کاهش مدت زمان برخورد میان ضربه‌زننده با ساختار هسته مربعی هستیم.

۴-۴-۴. بررسی تأثیر سرعت ضربه‌زننده بر ساختار هسته لانه‌زنبوری

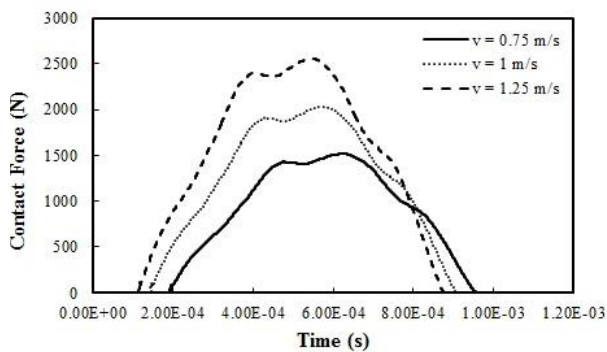
نمودار بیشترین تنش فون میسز برحسب زمان برای ساختار هسته لانه‌زنبوری در سه سرعت مختلف در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. نتایج بیشترین تنش فون میسز برای ساختار متا-ساندویچ با هسته لانه‌زنبوری از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۴۱/۳۷، ۵۵/۲ و ۶۹/۰۸ مگاپاسکال استخراج شده است. طبق نتایج نمودار با افزایش سرعت ضربه‌زننده بیشترین تنش فون میسز نیز ۴۰٪ افزایش یافته است و با افزایش سرعت ضربه‌زننده، شاهد کاهش مدت زمان برخورد میان ضربه‌زننده با ساختار هسته لانه‌زنبوری می‌باشیم.

۴-۵-۴. بررسی نمودار بیشترین نیروی تماسی بر ساختار هسته لانه‌زنبوری

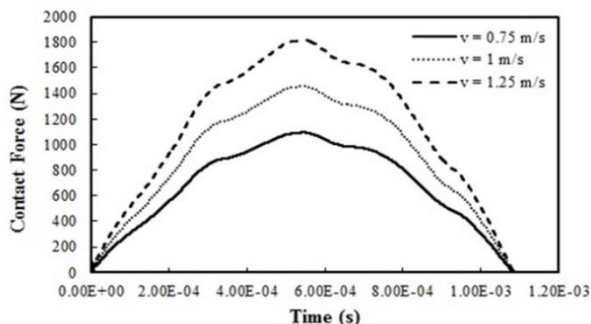
نتایج بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار متا-ساندویچ با هسته لانه‌زنبوری از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۱۰۹۵/۶، ۱۴۵۹/۱ و ۱۸۲۱/۶ نیوتن استخراج شده است. طبق نتایج شکل ۱۶ با افزایش سرعت ضربه‌زننده بیشترین نیروی تماسی برخورد نیز ۳۹٪ افزایش می‌یابد و مدت‌زمان برخورد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴. نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار هسته مثلثی در سه سرعت مختلف



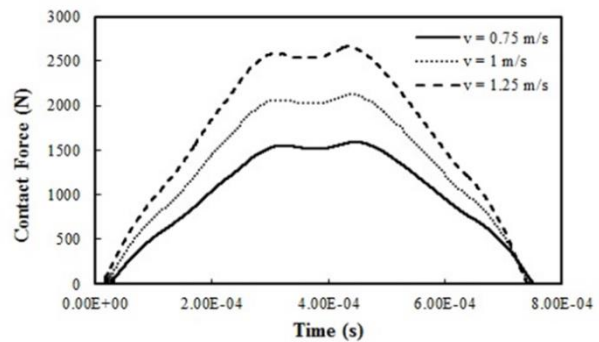
شکل ۱۵. نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار هسته مربعی در سه سرعت مختلف



شکل ۱۶. نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار هسته لانه‌زنبوری در سه سرعت مختلف

۴-۵-۱. بررسی نمودار بیشترین نیروی تماسی بر ساختار هسته آگرتیک

نتایج بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار متا-ساندویچ با هسته آگرتیک از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۱۵۹۸/۱، ۲۱۳۰/۵ و ۲۶۶۲/۸ نیوتن استخراج شده است. طبق نتایج شکل ۱۳ با افزایش سرعت ضربه‌زننده بیشترین نیروی تماسی برخورد نیز ۴۰٪ افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت ضربه‌زننده، مدت‌زمان برخورد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳. نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار هسته آگرتیک در سه سرعت مختلف

۴-۵-۲. بررسی نمودار بیشترین نیروی تماسی بر ساختار هسته مثلثی

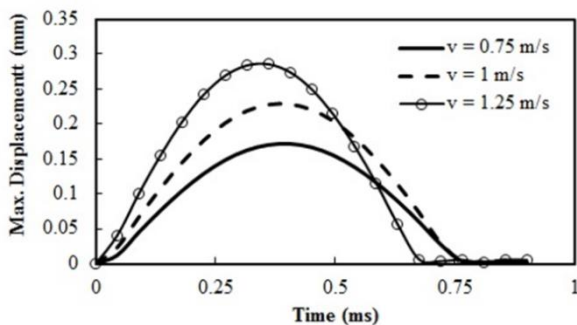
نتایج بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار متا-ساندویچ با هسته مثلثی از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۱۴۵۹/۳، ۱۹۷۳/۳ و ۲۵۵۹/۵ نیوتن استخراج شده است. طبق نتایج شکل ۱۴ با افزایش سرعت ضربه‌زننده بیشترین نیروی تماسی برخورد نیز ۴۲٪ افزایش می‌یابد و مدت‌زمان برخورد کاهش می‌یابد.

۴-۵-۳. بررسی نمودار بیشترین نیروی تماسی بر ساختار هسته مربعی

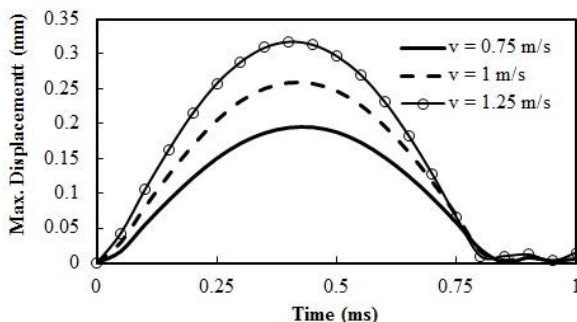
نتایج بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار متا-ساندویچ با هسته مربعی از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۱۵۱۹/۴، ۲۰۳۳/۹ و ۲۵۵۸/۵ نیوتن استخراج شده است. طبق نتایج شکل ۱۵ با افزایش سرعت ضربه‌زننده بیشترین نیروی تماسی برخورد نیز ۴۰٪ افزایش می‌یابد و مدت‌زمان برخورد کاهش می‌یابد.

۴-۶-۴. بررسی نمودار بیشترین جابه‌جایی بر ساختار هسته لانه‌زنبوری

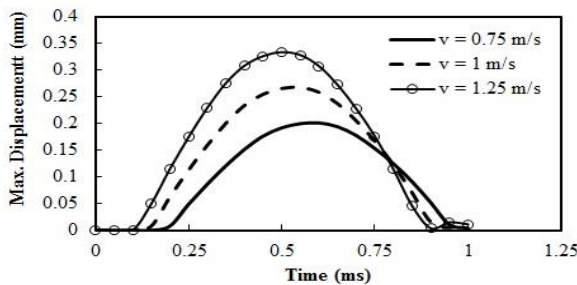
در شکل ۲۰ نتایج حداکثر جابه‌جایی برحسب زمان برای ساختار پنل‌های متا-ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۰/۲۶، ۰/۳۵ و ۰/۴۳ میلی‌متر استخراج شده است. طبق نتایج با افزایش سرعت ضربه‌زننده، مقدار بیشترین جابه‌جایی ۳۹٪ افزایش و مدت‌زمان تماس بین ضربه‌زننده و متا-ساندویچی نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۲۰. نمودار بیشترین جابه‌جایی برحسب زمان برای ساختار هسته لانه‌زنبوری در سه سرعت مختلف



شکل ۲۱. نمودار بیشترین جابه‌جایی برحسب زمان برای ساختار هسته مثلثی در سه سرعت مختلف



شکل ۲۲. نمودار بیشترین جابه‌جایی برحسب زمان برای ساختار هسته مربعی در سه سرعت مختلف

۴-۶-۴. تأثیر پارامتر سرعت ضربه‌زننده بر بیشترین جابه‌جایی

پارامتر سرعت ضربه‌زننده از عوامل مهم و تأثیرگذار در بررسی حداکثر جابه‌جایی است. در این قسمت نمودار جابه‌جایی برحسب زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین ارزیابی می‌شود.

۴-۶-۴-۱. بررسی نمودار بیشترین جابه‌جایی بر ساختار هسته آگزتیک

در شکل ۱۷ نتایج حداکثر جابه‌جایی برحسب زمان برای ساختار پنل‌های متا-ساندویچی با هسته آگزتیک از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۰/۱۷، ۰/۲۳ و ۰/۲۸ میلی‌متر استخراج شده است. طبق نتایج با افزایش سرعت ضربه‌زننده، مقدار بیشترین جابه‌جایی ۳۹٪ افزایش و مدت‌زمان تماس بین ضربه‌زننده و متا-ساندویچی نیز کاهش می‌یابد.

۴-۶-۴-۲. بررسی نمودار بیشترین جابه‌جایی بر ساختار هسته مثلثی

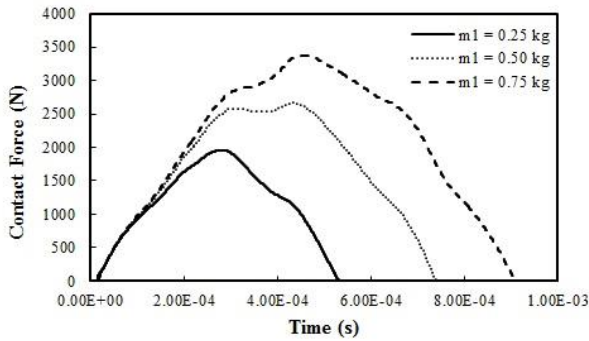
در شکل ۱۸ نتایج حداکثر جابه‌جایی برحسب زمان برای ساختار پنل‌های متا-ساندویچی با هسته مثلثی از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۰/۱۹، ۰/۲۶ و ۰/۳۲ میلی‌متر استخراج شده است. طبق نتایج با افزایش سرعت ضربه‌زننده، مقدار بیشترین جابه‌جایی ۴۰٪ افزایش و مدت‌زمان تماس بین ضربه‌زننده و متا-ساندویچی نیز کاهش می‌یابد.

۴-۶-۴-۳. بررسی نمودار بیشترین جابه‌جایی بر ساختار هسته مربعی

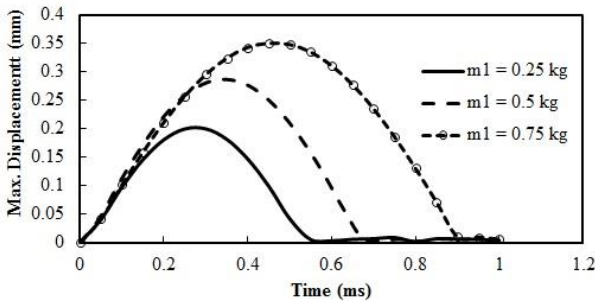
در شکل ۱۹ نتایج حداکثر جابه‌جایی برحسب زمان برای ساختار پنل‌های متا-ساندویچی با هسته مثلثی از سرعت ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۰/۲۰، ۰/۲۷ و ۰/۳۳ میلی‌متر استخراج شده است. طبق نتایج با افزایش سرعت ضربه‌زننده، مقدار بیشترین جابه‌جایی ۳۹٪ افزایش و مدت‌زمان تماس بین ضربه‌زننده و متا-ساندویچی نیز کاهش می‌یابد.

۴-۷-۳. تأثیر پارامتر جرم بر بیشترین جابه‌جایی

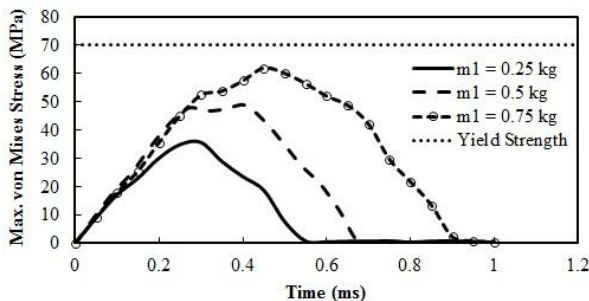
در شکل ۲۳ نتایج حاصل از نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان در سرعت ثابت ۱/۲۵ متر بر ثانیه در جرم ۲۵۰ تا ۷۵۰ گرم به ترتیب برابر با ۰/۲۹، ۰/۳۵ و ۰/۳۵ میلی‌متر استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش جرم ضربه‌زننده، بیشترین جابه‌جایی و مدت زمان افزایش می‌یابد.



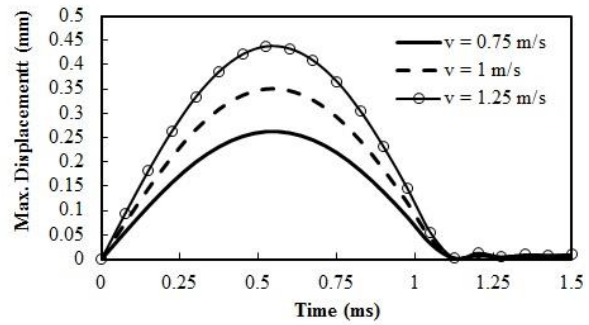
شکل ۲۰. نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار هسته آگزتیک در سه جرم متفاوت



شکل ۲۱. نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار هسته آگزتیک در سه جرم متفاوت



شکل ۲۲. نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان برای ساختار هسته آگزتیک در سه جرم متفاوت



شکل ۲۳. نمودار بیشترین جابه‌جایی برحسب زمان برای ساختار هسته لانه‌زنبوری در سه سرعت مختلف

۴-۷-۴. تأثیر پارامتر جرم بر بیشترین نیروی تماسی، تنش و جابه‌جایی

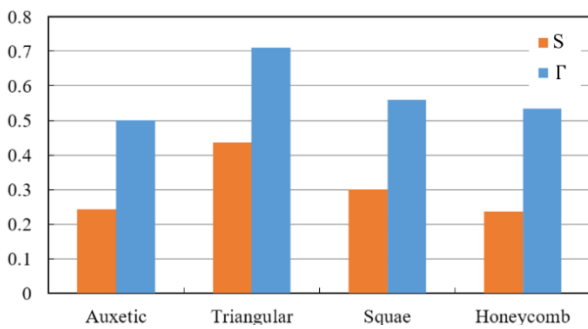
در این قسمت تأثیر پارامتر جرم ضربه‌زننده با سرعت ثابت با مقدار ۱/۲۵ متر بر ثانیه، در سه حالت مختلف جرم شامل ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم را بر ساختار پیل‌های متا-ساندویچ با هسته آگزتیک مدل‌سازی شده است. سپس خروجی‌های مدنظر شامل بیشترین نیروی تماسی، جابه‌جایی و تنش فون میسز پس از برخورد تحلیل و بررسی خواهد شد.

۴-۷-۴-۱. تأثیر پارامتر جرم بر بیشترین نیروی تماسی

در شکل ۲۱ نتایج حاصل از نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان در سرعت ثابت ۱/۲۵ متر بر ثانیه، در جرم ۲۵۰ تا ۷۵۰ گرم به ترتیب برابر با ۱۹۵۳، ۲۶۶۲/۸ و ۳۳۷۷ نیوتن استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش جرم ضربه‌زننده، مقادیر نیروی تماسی برخورد و مدت زمان تماس افزایش می‌یابد.

۴-۷-۴-۲. تأثیر پارامتر جرم بر بیشترین تنش

در شکل ۲۲ نتایج حاصل از نمودار بیشترین نیروی تماسی برحسب زمان در سرعت ثابت ۱/۲۵ متر بر ثانیه در جرم ۲۵۰ تا ۷۵۰ گرم به ترتیب برابر با ۴۸/۷۰، ۳۵/۵۶ و ۶۱/۴ مگاپاسکال استخراج شده است. نتایج نشان‌دهنده این نکته است که با افزایش جرم ضربه‌زننده، بیشترین تنش فون میسز و مدت زمان تماس افزایش می‌یابد.



شکل ۲۴. مقایسه برترین هسته متا-ساندویچ با یکدیگر

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، پاسخ دینامیکی پنل‌های ساندویچی با هسته‌های مختلف تحت ضربه سرعت پایین به روش عددی و تحلیلی بررسی شد.

در روش تحلیلی رفتار متقابل بین ضربه‌زننده و پنل ساندویچ به کمک سیستم جرم و فنر با دو درجه آزادی تحلیل و ارزیابی شد. سپس نتایج حاصل از این روش با نتایج روش عددی که در نرم‌افزار انسیس و رک‌بنچ استخراج شده مقایسه می‌شود. با توجه به اهمیت برخی پارامترهای مؤثر در پاسخ دینامیکی پنل ساندویچ‌ها اثر برخی پارامترها شامل سرعت و جرم ضربه‌زننده بر بیشترین نیروی تماسی، بیشترین جابه‌جایی و بیشترین تنش فون میسر مورد شبیه‌سازی و بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مقاله به شرح زیر است:

۱. با افزایش سرعت ضربه‌زننده از ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه، بیشترین نیروی تماسی برخورد، بیشترین تنش فون میسر و همچنین بیشترین جابه‌جایی افزایش می‌یابد ولی مدت‌زمان برخورد کاهش می‌یابد؛
۲. نتایج نمودار تنش فون میسر در سرعت و جرم‌های مختلف نشان می‌دهد که حداکثر تنش فون میسر کمتر از تنش تسلیم است و پنل ساندویچ دچار شکست نمی‌شود و در ناحیه الاستیک باقی می‌ماند؛
۳. با افزایش جرم ضربه‌زننده از ۲۵۰ تا ۷۵۰ گرم، بیشترین نیروی تماسی برخورد، بیشترین تنش فون میسر و بیشترین جابه‌جایی افزایش می‌یابد. از این رو مدت‌زمان برخورد نیز افزایش می‌یابد؛
۴. اثرات سرعت ضربه‌زننده عامل مهم‌تری در افزایش و کاهش نیروی تماسی، جابه‌جایی، تنش فون میسر و زمان اعمال ضربه نسبت به جرم ضربه‌زننده است؛

۴-۸. یافتن برترین هسته پنل‌های متا-ساندویچ

چهار هسته شامل لانه‌زنبوری، آگرتیک، مربعی و مثلثی در نرم‌افزار سالدورکس مدل‌سازی شده است. اینک می‌خواهیم یک هسته را از میان سایر هسته‌های طراحی شده به عنوان برترین هسته معرفی کنیم. برای تحقق این هدف دو پارامتر بی‌بعد برای تعیین برترین هسته تعریف نموده‌ایم تا بر اساس آن بتوانیم مقایسه‌ای میان هسته‌های متا-ساندویچ با یکدیگر داشته باشیم.

مؤلفه‌ها را می‌توان به صورت رابطه‌های زیر تعریف نمود:

$$S = \frac{\sigma_x M_1}{S_y M_2} \quad (12)$$

$$\Gamma = \frac{O_x M_1}{O_y M_2} \quad (13)$$

علت تعریف نمودن دو پارامتر بی‌بعد S و Γ به این سبب است که جرم هسته‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و برای یکسان نمودن جرم هسته‌ها و قابل مقایسه نمودن آن‌ها با یکدیگر از این روش استفاده نموده‌ایم. S و Γ به ترتیب فرمول تنش جابه‌جایی بی‌بعد برای تعیین برترین هسته می‌باشد. σ_x بیشترین تنش فون میسر استخراج شده از نرم‌افزار انسیس است. S_y تنش تسلیم، M_1 جرم هسته و رویه‌های مختلف متا-ساندویچ، M_2 جرم معادل یک صفحه مستطیلی شکل توپر با ابعاد و اندازه پنل متا-ساندویچی، O_x بیشترین جابه‌جایی استخراج شده از نرم‌افزار انسیس برای هر هسته می‌باشد. O_y معادل بیشترین جابه‌جایی یک صفحه مستطیلی شکل توپر است که از نرم‌افزار به دست می‌آید. هر چه مقادیر محاسبه شده از رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) از لحاظ تنش و جابه‌جایی کمتر باشد هسته نسبت به سایرین برتری خواهد داشت. هسته آگرتیک با اختلاف جزئی نسبت به هسته‌های دیگر برترین هسته معرفی می‌شود زیرا مقاومت ضربه بالاتری نسبت به سایر هسته‌ها دارد. در شکل ۲۴ نمودار مقایسه برترین هسته متا-ساندویچ با یکدیگر مشاهده می‌شود.

- [11] Sun CT, Chen JK. On the impact of initially stressed composite laminates, *Journal of Composite materials*, 1985; 194: 90-504.
- [12] Castanié B, Bouvet C, Aminanda Y, Barrau J. J, Thévenet P. Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins, *International Journal of Impact Engineering*. 2008; 35(7): 620-634.
- [13] Her SC, Liang YC. The finite element analysis of composite laminates and shell structures subjected to low velocity impact, *Composite Structures*. 2004; 66(1-4): 277-285.
- [14] Fard KM, Khalili SM, Forooghi SH, Hosseini M. Low velocity transverse impact response of a composite sandwich plate subjected to a rigid blunted cylindrical impactor. *Composites Part B: Engineering*. 2014 Jul 1;63:111-22.
- [15] Turner A. Low-velocity impact behavior of sandwich panels with 3D printed polymer core structures, Master of Science thesis, Wright State University Graduate School. 2017.
- [16] Yazdani Sarvestani H, Akbarzadeh A, Niknam H, Hermenean K. 3D Printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance, *Composite Structures*. 2018; 200: 886-909.
- [17] Hou S, Li T, Jia Z, Wang L. Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic non-auxetic lattice cores under low velocity impact, *Materials and Design*. 2018; 160: 1305–1321.
- [18] Cheng Y, Liu K, Li Y, Wang, Z, & Wang J. Experimental and numerical simulation of dynamic response of U-type corrugated sandwich panels under low-velocity impact. *Ocean Engineering*. 2022; 245: 110492.
- [19] Shafei E, Kabir M. Z. Analytical and numerical study of FRP retrofitted RC beams under low velocity impact, *Scientia Iranica* 2009; 16 (5): 415-428.
- [20] Abrate S. *Impact on composite structures*, Cambridge: Cambridge University Press. 1998.
- [21] Barati E, Vaziri MA, Yazdani MH. Numerical and experimental fatigue life estimation of airplane emergency door bracket in various mission profiles. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2018 Dec 22;8(4):143-52.
- [22] Song M, Li X, Kitipornchai S, Bi Q, Yang J. Low-velocity impact response of geometrically nonlinear functionally graded graphene platelet-reinforced nanocomposite plates. *Nonlinear Dynamics*. 2019 Feb 28;95:2333-52.
- [23] Chun LU, Lam KY. Dynamic response of fully-clamped laminated composite plates subjected to low-velocity impact of a mass, *International journal of solids and structures*. 1998; 35 (11): 963-979.

۵. هسته آگرتیک برترین هسته در میان سایر هسته‌های مدل‌سازی شده در این مقاله است.

سیاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مصوب و دفاع شده در دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر شیراز استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا که ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

مراجع

- [1] Yazdani Sarvestani H, Akbarzadeh A, Mirbolghasemi A, Hermenean K, 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials & Design*. 2018; 160: 179–193.
- [2] Jiang L, Walczyk D, McIntyre G, Bucinell R, Li B. Bioresin infused then cured mycelium-based sandwich-structure biocomposites: resin transfer molding (RTM) process, flexural properties, and simulation. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 207: 123-135.
- [3] Banerjee B. *An introduction to metamaterials and waves in composites*, Crc Press. 2011.
- [4] Alex-Amor A, Palomares-Caballero Á, Molero C. 3-D metamaterials: Trends on applied designs, computational methods and fabrication techniques, *Electronics*. 2022; 11(3): 2-24.
- [5] Li T, Wang L. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials, *Composite Structures*. 2017; 175: 46-57.
- [6] Schaedler TA, Carter WB. Architected cellular materials. *Annual Review of Materials Research*. 2016 Jul 1;46(1):187-210.
- [7] Topac OT, Gozluclu B, Gurses E, Coker D. Experimental and computational study of the damage process in CFRP composite beams under low-velocity impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017 Jan 1;92:167-82.
- [8] Cantwell WJ, Morton J. The impact resistance of composite materials—a review. *composites*. 1991 Sep 1;22(5):347-62.
- [9] Karas K. Platten unter seitlichem Stoss. *Ingenieur-Archiv*. 1939 Aug;10(4):237-50.
- [10] K. Marguerre. The optimum buckling load of a flexibly supported plate composed of two sheets joined by a light weight filler when under longitudinal compression, *Deutsche Vierteljahrsschrift fur Literaturwissenschaft und Giests Geschichte*. DVL (ZWB UM1360/2) 1944.