اثر هسته هدفمند مرتبه اي بر پاسخ ديناميكي پانل ساندويچي تحت ضربه عرضي با سرعت پايين

محمد حسين شكيب[i]؛ سيد محمد رضا خليلي[ii*]; كرامت ملک زاده فرد[iii]

چكيده

در اين مقاله، مسأله ضربه عرضي با سرعت پايين بر روي پانل ساندويچي با هسته هدفمند مرتبه اي در نظر گرفته شده است. فعل و انفعال ضربه زننده و پانل به كمک سيستم دو درجه آزادي جرم و فنر مدل شده است. براي تخمين نيروي برخورد، روش عددي بر پايه تئوري بهبود يافته مرتبه بالاي ورق ساندويچي به كار برده شده است. تئوري برشي مرتبه اول براي رويه‌ها بكار رفته، در حالي كه تئوري الاستيسيته سه بعدي براي هسته استفاده شده است. براي اولين بار اثر تنش‌هاي صفحه‌اي برشي و نرمال در هسته درنظر گرفته شده است. مولفه‌هاي جابجايي در هسته با تابعي چند جمله‌اي فرض شده كه داراي ضرايب مجهول است. نتايج بدست آمده نشان مي‌دهند كه استفاده از مواد هدفمند مرتبه‌اي در هسته مي‌تواند ميزان تغيير شكل‌ها را كاهش دهد ولي بيشينه نيروي برخورد را افزايش خواهد داد.

كلمات كليدي : پانل ساندويچي، هسته هدفمند مرتبه‌اي، ضربه سرعت پايين، تئوري مرتبه بالا

Effect of Functionally Graded Core on Dynamic Response of Sandwich Panel subjected to Transverse Low-velocity Impact

M.H. Shakib, S.M.R. Khalili, K. Malekzadeh

ABSTRACT

In this paper, the problem of low-velocity transverse impact on a sandwich panel with functionally graded core has been considered. The interaction between the impactor and the panel is modeled with the help of a system having two-degrees-of-freedom consisting of springs-masses. In order to determine the contact force history, a numerical procedure is employed based on improved higher-order sandwich plate theory. Shear deformation theory is used for the face sheets while three-dimensional elasticity theory is used for the core. For the first time effect of consideration of in-plane shear stress and normal stress in the core is considered. Displacement components in the core are assumed to vary with a polynomial function with unknown coefficients. Results indicate that use of the FG core can reduce deflections and increase maximum of contact forces.

KEYWORDS : Sandwich panels, Functionally graded core, Low-velocity impact, High-order theory

---

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۷/۷/۱۵

تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۲/۱۹

[i] دانشجوي كارشناسي ارشد، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، me.shakib@gmail.com

[ii] * نويسنده مسئول و استاد دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي،khalili@kntu.ac.ir

[iii] دانشيار دانشگاه صنعتي مالک اشتر تهران، kmalekzadeh@mut.ac.ir

۱- مقدمه

پانل‌هاي ساندويچي امروزه كاربردهاي مختلفي در صنايع هوايي، فضايي، دريايي و نظامي دارند. به‌علت اختلاف زياد در سفتی در وجه مشترک رويه‌ها و هسته، بارگذاری‌هايي مانند ضربه عرضي باعث توليد تنش‌های برشی عرضی متمرکزی در وجه مشترک مي‌شوند كه به تشكيل تورق در وجه مشترک رويه و هسته كمک كرده و سبب واماندگی سازه می‌شود. يک راه ممكن براي كم كردن تمركز تنش برشی بالا در وجه مشترک آن است كه تغيير تدريجی خواص سفتی در وجه مشترک هسته و رويه داشته باشيم. يک راه براي رسيدن به اين هدف استفاده از مواد هدفمند مرتبه‌اي در هسته ورق ساندويچي است، بطوريكه سفتی را بتوان در راستای ضخامت به دلخواه تغيير داد.

سروش و مورتنسن [۱] به معرفي و مرور جامعي بر خواص و روش‌هاي ساخت مواد هدفمند مرتبه‌اي پرداخته‌اند. كوئزومي [۲] اولين تحقيقات موجود در اين زمينه را گردآوري و ارائه داده است. نظريه مطرح شده، تركيب رفتار تدريجي بين سراميک‌هاي مقاوم به حرارت با فلزات چقرمه داراي هدايت الكتريكي مناسب بوده است.

لي و همكارانش [۳] ارتعاشات ورق‌هاي مستطيلي ساندويچي با هسته هدفمند مرتبه‌اي و با شرايط مرزي تكيه‌گاه ساده و گيردار را بر مبناي تئوري الاستيسيته خطي سه بعدي مورد بررسي قرار داده‌اند. يک بار هسته، هدفمند مرتبه‌اي و رويه‌ها ايزوتروپيک و همگن در نظر گرفته شدند و بار ديگر رويه‌ها، هدفمند مرتبه‌اي و هسته همگن فرض شده است. يک ماده هدفمند مرتبه‌اي بوسيله تغيير در كسر حجمي تعريف مي‌شود. بيش‌تر محققان از توابع تواني، نمايي يا هلالي شكل براي توصيف كسر حجمي استفاده نموده‌اند [۴]. بنابراين، ورق‌هاي هدفمند مرتبه‌اي با تابع تواني، نمايي يا هلالي شكل در اين مقاله در نظر گرفته شده است. همچنين پراكاش و همكارانش [۵] روش همگن‌سازي موري - تاناكا براي تخمين خواص مؤثر ماده بدست آمده از مواد تشكيل دهنده آن را مورد استفاده داده‌اند. در تحقيقي كه دلاله و اردوگان [۶] انجام داده‌اند نشان داده شد كه اثر نسبت پواسون بر تغيير شكل بسيار كمتر از مدول يانگ است. در نتيجه، نسبت پواسون هسته ثابت فرض شده است. آپتر و همكارانش [۷] با استفاده از روش گلركين و تغيير خواص مكانيكي با تابع چند جمله‌اي، هسته‌هايي با ماده هدفمند مرتبه‌اي براي تير تحت ضربه جانبي مورد تحليل قرار داده‌اند. هم‌چنين نتيجه گرفته‌اند كه فرض توزيع نامتقارن خواص مكانيكي پاسخ بهتري مي‌دهد. آندرسون [۸] با مدل‌هاي يک درجه آزادي، ضربه با جرم بزرگ را بر روي كامپوزيت‌هاي چندلايه ساندويچي بررسي كرده است. اعتمادي و همكارانش [۹] با استفاده از المان محدود و مدل‌سازي سه بعدي، درستي پاسخ و روش حل مرجع [۷] را مورد بررسي قرار داده‌اند. نتايج بدست آمده از تحليل المان محدود در مرجع [۹] براي تير ساندويچي با هسته هدفمند مرتبه‌اي با نتايج تحليلي برابري خوبي داشته و درستي روش حل آن را تأييد نمود. فروستيگ و تامسن [۱۰] تئوري صفحات ساندويچی با مرتبه بالا (HSAPT[1]) را براي تحليل ارتعاشات آزاد پانل ساندويچي با هسته انعطاف‌پذير مورد استفاده قرار داده‌اند. هم‌چنين بوسيله ملک‌زاده و همكاران [۱۱] و خليلي و همكاران [۱۲] تئوري ارتقاء يافته مرتبه بالاي ورق ساندويچي (IHSAPT[2]) بدست آمده كه با كمک اين تئوري ارتعاشات آزاد و ضربه عرضي بر روي پانل ساندويچي مورد تحليل قرار گرفت. در اين تحليل‌ها، تئوري برشي مرتبه اول براي رويه‌ها و تغيير غيرخطي شتاب عمودي در هسته به جاي تغيير خطي شتاب كه پيش از اين بطور عمومي به كار مي‌رفت، استفاده شد.

در اين مقاله، پاسخ ديناميكي ورق ساندويچي با هسته هدفمند مرتبه‌اي بر پايه تئوري ارتقاء يافته مرتبه بالاي ورق ساندويچي [۱۲] مورد بررسي قرار گرفته است. بر خلاف مدل‌هاي قبل، براي اولين بار تنش‌هاي صفحه‌اي برشي و نرمال براي هسته پانل ساندويچي در تحليل در نظر گرفته شده است. براي تحليل برخورد، از مدل دو درجه آزادي جرم و فنر استفاده شده است. براي درستي مدل، نتايج بدست آمده با نتايج مراجع ديگر مقايسه شده‌اند.

۲- معادلات حاكم و روش حل تحليلي

مدل مفروض براي پانل ساندويچي در شكل (۱) آمده است. اين مدل، ورقي مستطيلي است كه از دو رويه چند لايه كامپوزيتي و يک هسته مياني هدفمند مرتبه‌اي تشكيل شده است. طول و عرض ورق به ترتيب a و b و ضخامت كل ورق h در نظر گرفته شده است. ضخامت رويه بالايي، هسته و رويه پاييني به ترتيب h_t، h_c و h_b هستند. در تحليل ديناميكی ورق، تغيير مكان‌ها كوچک بوده و تحليل در محدوده الاستيک خطی مورد نظر است. فرض مي‌شود كه لايه‌ها و هسته ميانی به‌طور كامل به هم چسبيده و توابع كرنش در سطوح اتصال لايه‌ها پيوسته باشند. لايه چينی در رويه‌های ورق كامپوزيتی و ساندويچی به‌صورت متقارن و متوازن در نظر گرفته شده است. براي حل مسأله از روش انرژي و اصل هميلتون استفاده

شده است:

$$\delta\int_{t_1}^{t_2}(U+V-T)dt=0 \qquad (۱)$$

نمادهاي U، T و V به ترتيب بيان‌گر انرژي پتانسيل، جنبشي و انرژي بدست آمده از نيروهاي خارجي هستند. هم‌چنين δ عامل تغييرات مرتبه اول است. انتگرال‌گيري در بازه زماني (t_1-t_2) انجام مي‌شود. فرآيند عمليات حل تحليلي معادله (۱) مشابه مرجع [۱۰] است، اما تنش‌هاي صفحه‌اي در هسته نيز به فرضيات مسأله اضافه شده است. اين جمله‌ها در رابطه تغييرات مرتبه اول انرژي پتانسيل وارد شده‌اند:

$$\begin{aligned}\delta U=&\int_{v_t}(\sigma^t_{xx}\delta\varepsilon^t_{xx}+\sigma^t_{yy}\delta\varepsilon^t_{yy}+\tau^t_{xy}\delta\gamma^t_{xy}+\tau^t_{xz}\delta\gamma^t_{xz}+\tau^t_{yz}\delta\gamma^t_{yz})dv\\&+\int_{v_b}(\sigma^b_{xx}\delta\varepsilon^b_{xx}+\sigma^b_{yy}\delta\varepsilon^b_{yy}+\tau^b_{xy}\delta\gamma^b_{xy}+\tau^b_{xz}\delta\gamma^b_{xz}+\tau^b_{yz}\delta\gamma^b_{yz})dv\\&+\int_{v_c}(\sigma^c_{zz}\delta\varepsilon^c_{zz}+\sigma^c_{yy}\delta\varepsilon^c_{yy}+\sigma^c_{xx}\delta\varepsilon^c_{xx}+\tau^c_{xy}\delta\gamma^c_{xy}+\tau^c_{xz}\delta\gamma^c_{xz}+\tau^c_{yz}\delta\gamma^c_{yz})dv\end{aligned} \qquad (۲)$$

در معادله (۲)، $\sigma_{ii}(i=x,y)$ و $\varepsilon_{ii}(i=x,y)$ به ترتيب تنش‌ها و کرنش های نرمال در جهت x وy و انديس بالایt، b وc به ترتيب نشان‌دهنده رويه‌های بالايی، پايينی و هسته ميانی است. $\tau_{iz}(i=x,y)$ و $\gamma_{iz}(i=x,y)$ به ترتيب تنش‌ها و کرنش‌های برشی در جهت قائم در هسته ميانی هستند. σ^c_{zz} و ε^c_{zz} تنش‌ها و کرنش‌های نرمال در جهت قائم در هسته ميانی هستند. هم‌چنين v_t، v_b و v_c حجم‌های رويه‌های بالايی، پايينی و هسته ميانی هستند. در معادله (۲)، جمله‌های $\sigma^c_{xx}\delta\varepsilon^c_{xx}$، $\sigma^c_{yy}\delta\varepsilon^c_{yy}$ و $\tau^c_{xy}\delta\gamma^c_{xy}$ که در معادله تغييرات مرتبه اول انرژی پتانسيل وارد شده‌اند، بيانگر تغييرات انرژی صفحه‌ای در هسته مياني بوده که در تئوری مرتبه بالا [۱۰] و تئوری ارتقاء يافته مرتبه بالا [۱۱] و [۱۲] در نظر گرفته نشده‌اند، اما در روش حاضر در نظر گرفته شده است.

با توجه به اينکه جنس هسته از مواد هدفمند مرتبه‌اي است، پس تغييرات تنش برشی در هسته را نمی‌توان يکنواخت فرض کرد و در نتيجه از مدل اول [۱۰] نمي‌توان استفاده نمود. به همين دليل از مدل دوم [۱۰] استفاده نموده که ميدان‌هاي جابجايي در هسته به صورت رابطه (۳) هستند:

$$\begin{aligned}u_c(x,y,z_c,t)&=u_0(x,y,t)+z_cu_1(x,u,t)+z_c^2u_2(x,y,t)+z_c^3u_3(x,y,t)\\v_c(x,y,z_c,t)&=v_0(x,y,t)+z_cv_1(x,u,t)+z_c^2v_2(x,y,t)+z_c^3v_3(x,y,t)\\w_c(x,y,z_c,t)&=w_0(x,y,t)+z_cw_1(x,u,t)+z_c^2w_2(x,y,t)\end{aligned} \qquad (۳)$$

بطوري‌که u_k و $v_k(k=0, 1, 2, 3)$ جابجايي‌هاي در صفحه هسته بوده و مجهول است و $w_k(k=0, 1, 2)$ جابجايي‌هاي عمودي و مجهول است. با استفاده از شرايط سازگاري، انتگرال‌هاي انرژي پتانسيل، جنبشي و انرژي بدست آمده از نيروهاي خارجي و معادله (۳) و عمليات انتگرال گيري جزء به جزء طبق فرآيند حل مرجع [۱۰] و [۱۱]، معادلات حرکت سيستم بدست آيد. در نتيجه ۱۵ معادله و ۱۵ مجهول بدست مي‌آيند. با اعمال شرايط مرزي ورق ساندويچي و پس از ساده‌سازي، معادلات مسأله به معادله مقدار ويژه (٤) تبديل مي‌شود:

$$([k]-[M]\times\omega^2)\{X_0^*\}=\{0\} \qquad (۴)$$

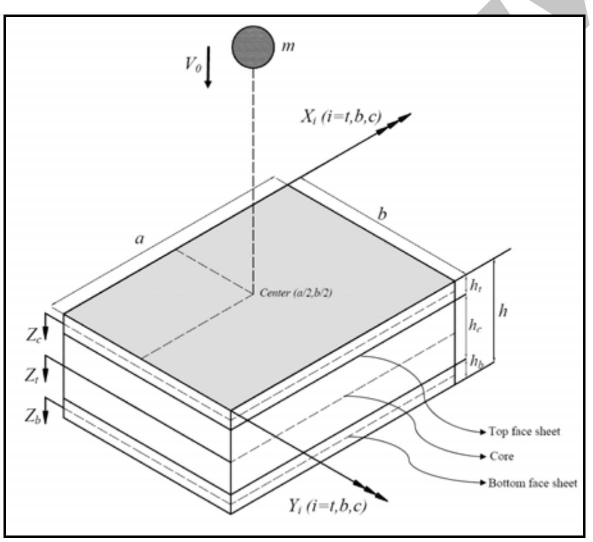
که $\{X_0^*\}$ در معادله فوق عبارت است از:

$$\{u_0^t,\psi_x^t,v_0^t,\psi_y^t,w_0^t,u_0^b,\psi_x^b,v_0^b,\psi_y^b,w_0^b,u_0,u_1,v_0,v_1,w_0\} \qquad (۵)$$

در معادله (٤)، $[M]$ ماتريس جرم و $[K]$ ماتريس سفتي پانل ساندويچي بوده که ماتريس‌هايي ۱۵ در ۱۵ متقارن هستند.

۲-۱- توابع توزيع خواص ماده هسته هدفمند مرتبه‌اي

خواص مواد هدفمند مرتبه اي وابسته به دستگاه مختصات تغيير کرده و در يک جهت خاص از محورهاي مختصات بسته به تابع توزيع خواص، مقادير مختلفي را خواهند داشت. از ابتداي مطرح شدن اين مواد ناهمگن در مسائل علمي، مدل‌هاي بسياري براي توابع کسر حجمي تعريف شده‌اند که مي‌توان آن‌ها را در چند مدل کلي تعريف کرد. مدل‌هاي تابع کسر حجمي تواني، هلالي و نمايي [5] و روش همگن‌سازي موري - تاناکا [٦] براي استفاده در مسأله انتخاب شده‌اند. خواص ماده هسته مانند E^c_{xx}، E^c_{yy}، E^c_{zz}، G^c_{xy}، G^c_{xz}، G^c_{zy} و ρ_c با توجه به اين توابع تغيير کرده ولي نسبت پواسون ثابت فرض شده است.



شکل (۱): هندسه، ابعاد و دستگاه مختصات مفروض براي مدل پانل ساندويچي

۲-۲- مدل جرم و فنر دو درجه آزادي

براي بدست آوردن نيروي برخورد و خيز ورق ساندويچي

از مدل جرم و فنر دو درجه آزادي طبق شکل (۲) استفاده شده است. m_I و M_{eff}^{p} بترتيب جرم مربوط به ضربه‌زننده و جرم مؤثر پانل هستند که M_{eff}^{p} براي حالت‌هاي مختلف تکيه‌گاهي متفاوت خواهد بود، به‌طوري‌که براي تکيه‌گاه ساده مقدار آن يک سوم جرم کل پانل است [۱۰]. K_g و K_c^* نيز بترتيب سفتي مربوط به تغيير شکل کلي سازه و سفتي تماس خطي شده هستند. Δ_1 و Δ_2 عبارتند از جابجايي عمودي جرم ضربه‌زننده و جرم مؤثر پانل ساندويچي. سفتي تماس خطي شده که در مدل جرم و فنر استفاده شده است، به صورت رابطه (٦) تعريف مي‌شود [۱۳]:

$$K_c^* = K_c^{\frac{1}{n}} F_{\max}^{\frac{n-1}{n}} \tag{۶}$$

که در آن K_c سفتي تماس هرتز است و مقدار F_{max} از معادله توازن انرژي در رابطه (۷) بدست مي‌آيد:

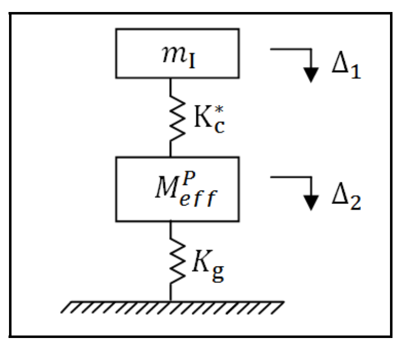
$$\frac{F_{\max}^2}{2K_g} + \frac{F_{\max}^{1+\frac{1}{n}}}{(n+1)K_c^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{2} m v_0^2 \tag{۷}$$

هنگامي که ضربه در مرکز ورق رخ دهد مي‌توان مانند مرجع [۱۲] سفتي تغيير شکل کلي سازه را به‌صورت رابطه (۸) بدست آورد:

$$K_g = M_{tot}\,\omega_{11}^2 \tag{۸}$$

که در آن ω_{11} فرکانس اولين حالت ارتعاشي پانل ساندويچي بوده که با استفاده از حل معادله (٤) بدست مي‌آيد. هم‌چنين M_{tot} مجموع کل جرم رويه‌ها و هسته است. اکنون با اعمال شرايط اوليه و حل معادله حرکت سيستم دو درجه آزادي مقادير Δ_1 و Δ_2 بدست آمده و مي‌توان به راحتي تابع نيروي برخورد را به‌صورت رابطه (۹) بدست آورد:

$$F(t) = K_c^*(\Delta_1 - \Delta_2) \tag{۹}$$



شکل (۲): مدل جرم و فنر دو درجه آزادي

۳- بررسي درستي روش حل مسأله

ابتدا نتايج بدست آمده براي ارتعاشات آزاد پانل ساندويچي با نتايج رويه‌هاي همگن فلزي و هسته هدفمند مرتبه‌اي با خواص مکانيکي و هندسي بيان شده در مرجع [۳] مقايسه شده، سپس نتايج تحليل ضربه بر روي پانل ساندويچي با هسته همگن با نتايج تجربي و تحليلي مرجع [۸] مقايسه شدند. هم‌چنين تير ساندويچي با هسته هدفمند مرتبه‌اي تحت بار ضربه‌اي عرضي با سرعت پايين طبق مراجع [۷] و [۹] مورد تحليل قرار گرفت. مقايسه نتايج روش مورد استفاده با نتايج ساير مراجع، نشان‌دهنده درستي روش حل مسأله است. در بخش‌هاي زير نتايج اين بررسي‌ها به ترتيب آورده شده‌اند.

۳-۱- ارتعاشات آزاد پانل ساندويچي با رويه‌هاي همگن و هسته هدفمند مرتبه‌اي

ورق ساندويچي اين مثال، ورقي مربع شکل با رويه‌هاي همگن و هسته هدفمند مرتبه‌اي بوده که تابع کسر حجمي هسته هدفمند مرتبه‌اي از نوع تواني است [۳]. شرايط مرزي از نوع تکيه‌گاه ساده است. ماده رويه فوق که بعنوان سراميک در نظر گرفته شده است، اکسيد آلومينيوم بوده که خواص آن عبارت است از:

$E_c = 380$ GPa , $\rho_c = 3800$ Kg/m^3

هم‌چنين خواص ماده رويه پايين که آلومينيوم بوده، به صورت زير است:

$E_m = 70$ GPa , $\rho_m = 2707$ Kg/m^3

نسبت پواسون براي هر دو ماده ۰/۳ در نظر گرفته شده است. نسبت طول به عرض ورق برابر با ۱ و نسبت ضخامت هسته به ضخامت کل برابر با ۰/۸ است. سرعت‌هاي زاويه‌اي بدون بعد مربوط به فرکانس‌هاي طبيعي سه حالت اول براي مقادير مختلف نسبت طول ورق به ضخامت آن (a/h) و توان‌هاي مختلف تابع کسر حجمي (n) با نتايج مرجع [۳] که بر اساس تئوري خطي سه بعدي الاستيسيته بدست آمده‌اند که در جدول (۱) مقايسه شده‌اند. سرعت‌هاي زاويه‌اي بدون بعد ذکر شده در جدول (۱) با رابطه (۱۰) بدون بعد شده‌اند، بطوريکه در اين رابطه E_0=1 GPa و ρ_0=1 Kg/m^3 است.

$$\overline{\omega} = \frac{\omega a^2}{h}\sqrt{\rho_0 / E_0} \tag{۱۰}$$

نتايج جدول (۱) نشان مي‌دهند که با افزايش توان تابع کسر حجمي $(n=1,10)$، فرکانس طبيعي اول کاهش و با افزايش نسبت طول به ضخامت، فرکانس طبيعي اول افزايش مي‌يابد. بيش‌ترين اختلاف بين روش ارائه شده و نتايج جواب تحليلي [۳] نزديک به ۳% است. مقادير آورده شده در جدول (۱) براي

روش حاضر با در نظر گرفتن تنش‌هاي صفحه‌اي هستند.

جدول (۱): فركانس‌های طبيعی مربوط به ورق مربعي ساندويچی با هسته هدفمند مرتبه‌اي تواني براي نسبت طول به ضخامت و توان‌های تابع توزيع خواص متفاوت

a/h=۱۰			
n	شماره مود	روش تحليلي [۳]	روش حاضر
۱	۱	۱/۵۲۲۰۸	۱/٤٩٦٤
	۲	۳/٦۲۹۵۳	۳/۵۹۳۵
	۳	۳/٦۲۹۵۳	۳/۵۹۳۵
۱۰	۱	۱/۵۱۵۲۳	۱/٤٩٦۳
	۲	۳/٦٤٦۵۱	۳/٦۱٤۸
	۳	۳/٦٤٦۵۱	۳/٦۱٤۸
a/h=۱۰۰			
n	شماره مود	روش تحليلي [۳]	روش حاضر
۱	۱	۱/۵۷٦۰۱	۱/۵۲۸٦
	۲	۳/۳۷۸۷	۳/۳۲٤۲
	۳	۳/۳۷۸۷	۳/۳۲٤۲
۱۰	۱	۱/۵۵۷۵۵	۱/۵۱٤۵
	۲	۳/۸۹۲۲	۳/۸۳۹۷
	۳	۳/۸۹۲۲	۳/۸۳۹۷

۳-۲- پاسخ ديناميكي ورق ساندويچي با رويه‌هاي كامپوزيتي و با هسته مياني الاستيک و انعطاف-پذير تحت بار ضربه‌اي سرعت پايين

ورق ساندويچی مورد بررسي به شكل مربع با رويه‌های چند لايه كامپوزيتي بوده و با تكيه‌گاه ساده در رويه‌های بالايی و پايينی و هسته ميانی فوم در نظر گرفته می‌شود [۸]. ضربه زننده صلب فولادي با سر نيم‌كره با شعاع ۱۲/۷ ميلي‌متر و جرم ۱/۸ كيلوگرم است. خواص مكانيكي رويه‌ها و هسته در جدول (۲) آورده شده است. هم‌چنين آرايش لايه‌چيني رويه‌ها به ترتيب *[0₂/90₂/0₂]* است. ورق ساندويچي داراي نسبت‌هاي هندسي زير است:

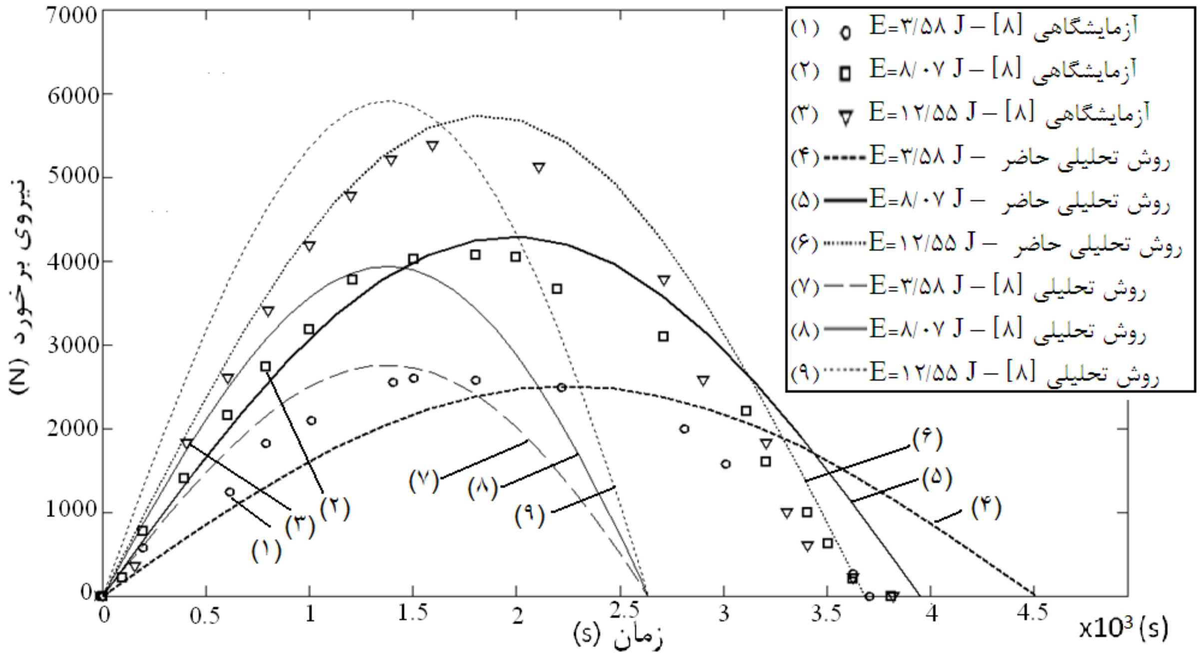
(a/b=۱، a/h=٤/۸۰۲۱، h_c/h=۰/۸۰۰٤)

در شكل (۳) اثر انرژي ضربه زننده بـر روي توابـع زمـاني نيروي برخورد نشان داده شده است. با افزايش انـرژي ضـربه زننده بيشينه نيروي برخورد افزايش و بيـشينه زمـان برخـورد كاهش مي‌يابد. اين موضـوع بـه دليـل افـزايش انـرژي جنبـشي ضربه‌زننده اسـت. افـزايش بيـشينه نيـروي برخـورد همـراه بـا كاهش بيشينه زمان برخورد سبب مي‌شـود تـا انـرژي جنبـشي ضـربه‌زننـده بـا مقـدار بيـشتر و در زمـاني كمتـر بـه ورق ساندويچي وارد شده و باعث ايجاد شوک به سازه گردد.

جدول (۲): خواص هندسي و مكانيكي ورق ساندويچي

خواص	رويه	هسته
E_{11}(GPa)	۵۴	۰/۱۸
E_{22}(GPa)	۵۴	۰/۱۸
E_{33}(GPA)	۴/۸۴	۰/۱۸
G_{12}(GPa)	۳/۱۶	۰/۰۷
G_{13}(GPa)	۱/۸۷	۰/۰۷
G_{23}(GPa)	۱/۸۷	۰/۰۷
n_{12}	۰/۰۶	۰/۲۸۶
n_{13}	۰/۳۱۳	۰/۲۸۶
n_{23}	۰/۳۱۳	۰/۲۸۶
r(Kg/m^3)	۱۵۱۱	۱۱۰
h_c(mm)	-	۱۲/۷
Ply Thickness (mm)	۰/۲۶۴	۰
a(mm)	۷۶/۲	۷۶/۲
b(mm)	۷۶/۲	۷۶/۲

همان طور كه ديده مي‌شود دقت مدل دو درجـه آزادي اسـتفاده شده داراي دقت قابل قبولي نسبت به نتايج آزمايشگاهي است و از پاسـخ‌هـاي روش تحليلـي مـدل يـک درجـه آزادي (SOFD[3]) نشان داده شده نيز دقيق‌تر است. بيش‌ترين تفـاوت نتـايج روش حاضر با نتايج آزمايشگاهي ۴/۲ درصد بـوده كـه ايـن اخـتلاف هم به دليل برخي ساده‌سازي‌ها و فرضيات در مدل‌سازي است.



شكل (۳): اثر انرژي ضربه زننده روي تابع زماني نيروي برخورد در وسط رويه بالايي پانل ساندويچي

۳-۳- بررسي نيروي برخورد در تير ساندويچي با هسته‌هاي همگن ساده و هدفمند مرتبه‌اي تحت بار ضربه‌اي عرضي سرعت پايين

تير ساندويچي به طول L=۲۰۰ mm، عرض b=۳۰ mm و ضخامت هسته h_c=۲۰ mm و رويه‌هايي كامپوزيتي با ضخامت h_f=۰/۳ mm براي بررسي درستي روش حل در نظر گرفته شد. رويه‌ها با مدول الاستيسيته ۵۰ GPa و نسبت پواسون ۰/۲۵ هستند. نسبت پواسون براي هسته برابر با ۰/۳۵ فرض شده است. سه مدل در نظر گرفته شده براي هسته عبارتند از ۱- هسته هدفمند مرتبه‌اي متقارن خطي (نوع۱)، ۲-هسته هدفمند مرتبه‌اي نامتقارن خطي (نوع۲) و ۳-هسته همگن ساده (نوع۳). ضربه زننده فولادي با جرم ۱۵/۷ كيلوگرم، سرعت برخورد ۶ متر بر ثانيه و شعاع انحناي ۱۰ ميلي‌متر است. جدول (۳) بيش‌ترين نيروي برخورد محاسبه شده با روش حاضر و نتايج روش حل تحليلي [۷] و المان محدود [۹] را نشان مي‌دهد. نتايج روش حل حاضر با نتايج [۷] و [۹] برابري قابل قبولي داشته و بيشينه اختلاف با نتايج المان محدود [۹] نزديک به ۵ درصد و با روش تحليلي [۷] نزديک به ۱/۶ درصد است.

اكنون بـا مثـالي اثـر هـسته هدفمنـد مرتبـه‌اي را بـر پاسـخ ديناميكي پانل ساندويچي تحت ضربه عرضي با سـرعت پـايين بررسي مي‌نماييم. همچنين برخي از عوامل مـؤثر ضـربه زننـده را بر روي پاسخ ضربه بررسي مي‌نماييم.

جدول (۳): مقايسه نتايج روش حاضر با نتايج روش تحليلي [۷] وتحليل المان محدود [۸]

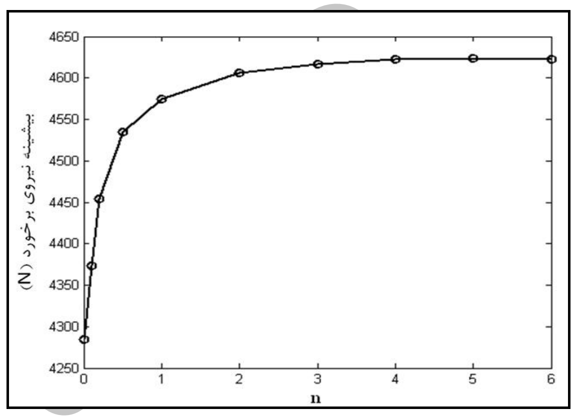
نوع هسته	حل تحليلي [۷]	المان محدود [۹]	روش حاضر
	بيشينه نيروي برخورد بر حسب كيلونيوتن		
۱	۷۸/۹	۸۱	۷۷/۶
۲	۸۳/۱	۸۶/۸	۸۲/۴
۳	۵۴/۵	۵۸/۵	۵۵/۲

۳-٤- پاسخ ديناميكي ورق ساندويچي با رويه‌هاي كامپوزيتي و با هسته مياني هدفمند مرتبه‌اي تحت بار ضربه‌اي با سرعت پايين

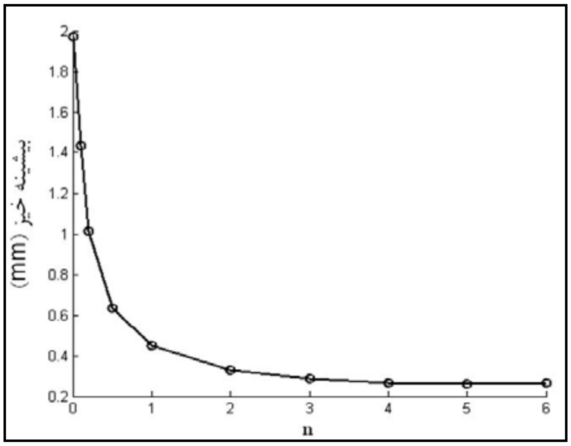
ورق مورد بررسي در اين مثال يک پانل ساندويچي با هسته هدفمند مرتبه‌اي است كه هسته بر مبناي تابع كسر حجمي تواني تعريف شده است. خواص هندسي و مكانيكي ورق و لايه‌چيني رويه‌ها مانند مثال (۳-۲) بوده و تنها نوع هسته هدفمند مرتبه‌اي است كه خواصش با تابع تواني بين خواص هسته فوم همگن و خواص رويه بالايي تغيير مي‌نمايد. ضربه‌زننده صلب و فولادي با انرژي جنبشي اوليه ۸/۰۷ ژول به مركز ورق برخورد كرده و باعث بوجود آمدن نيروي برخورد و خيز در ورق ساندويچي مي‌شود.

همان‌طور كه در شكل (۴) نشان داده شده است، تغيير

هسته فوم همگن (n=۰) به هسته هدفمند مرتبه‌اي تواني سبب مي‌شود كه براي n>۱ بيشينه نيروي برخورد بيشتر و بيشينه زمان برخورد كمتر شود. اين امر به‌علت سفت‌تر شدن هسته بوده و هرچه توان هسته به مقادير بزرگ‌تر از ۱ نزديک شود اين اثر بيش‌تر خواهد شد. با افزايش توان تابع توزيع خواص تواني، هسته بيشتر به خواص رويه نزديک شده كه باعث مي‌شود سازه سفت شود. اين سفتي دو برابر شده باعث افزايش فركانس‌هاي سيستم و بويژه فركانس طبيعي پايه گرديده و با توجه به معادله (۸) سفتي معادل پانل افزايش يافته است. فركانس استفاده شده براي تحليل ضربه (ω_{11})، با در نظر گرفتن تنش‌هاي صفحه‌اي در هسته است.

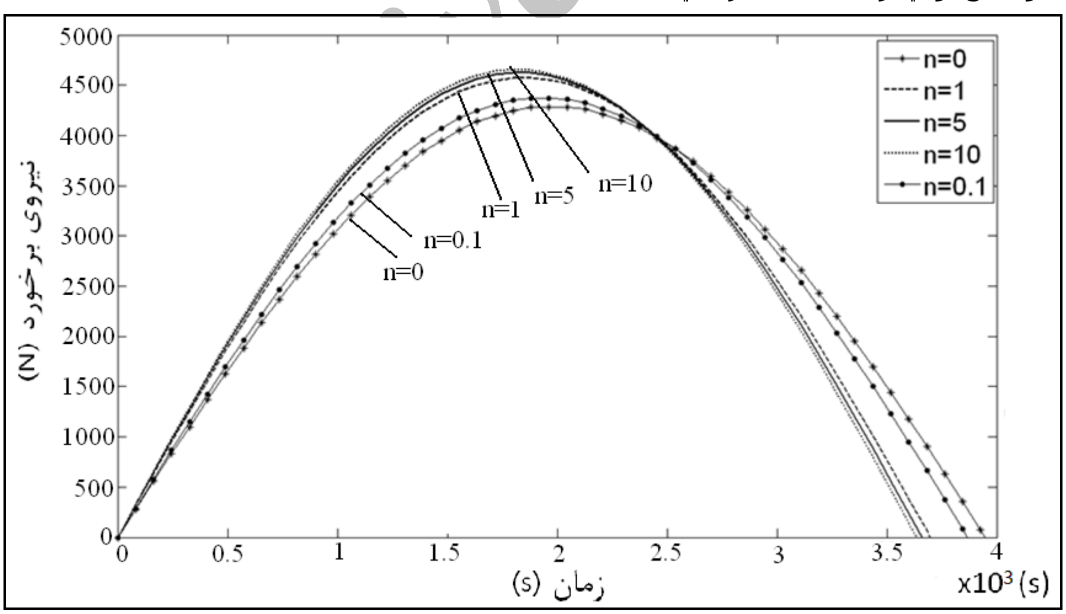


شكل (۵): تغييرات مقادير بيشينه نيروي برخورد نسبت به مقادير توان تابع تواني در هسته هدفمند مرتبه‌اي



شكل (٦): تغييرات مقادير بيشينه خيز رويه بالايي نسبت به مقادير توان تابع تواني در هسته هدفمند مرتبه‌اي

همچنين شكل‌هاي (۵) و (۶) به ترتيب تغييرات بيشينه نيروي برخورد و بيشينه خيز ورق ساندويچي نسبت به تغيير توان تابع توزيع خواص تواني هسته را نشان مي‌دهند. وارون افزايش نيروي برخورد، خيز در مركز رويه بالايي با افزايش مقدار n كاهش مي‌يابد، كه اين موضوع نيز به‌علت سفت‌تر شدن هسته با افزايش توان n تابع كسر حجمي است.



شكل (٤): تغيير تابع نيروي برخورد براي پانل ساندويچي با هسته هدفمند مرتبه‌اي با تابع كسر حجمي تواني براي نسبت‌هاي تواني متفاوت

٤- نتيجه‌گيري

مسأله ضربه عرضي با سرعت پايين بر روي پانل ساندويچي با هسته هدفمند مرتبه‌اي با استفاده از تئوري ارتقاء يافته مرتبه بالاي ورق ساندويچي و با کمک مدل دو درجه آزادي جرم و فنر مورد بررسي قرار گرفت. براي اولين بار اثر تنش‌هاي صفحه‌اي برشي و نرمال براي هسته بررسي شده‌اند.

با مقايسه نتايج بدست آمده از روابط استخراج شده، ديده مي‌شود که برابري خوبي با نتايج تحليلي و تجربي ديگر محققين بدست آمده است. اثر هسته هدفمند مرتبه‌اي بر روي ميزان خيز و نيروي برخورد حاصل از ضربه عرضي سرعت پايين بررسي شد و کاهش ميزان خيز و افزايش نيروي برخورد در زمان برخورد کمتري ديده شده است.

٥- مراجع

[١] Suresh, S.; Mortensen, A.; Fundamentals of Functionally Graded Materials, IOM Communications Limited, London, United Kingdom, 1998.

[٢] Koizumi, M.; "FGM activities in Japan" Composites Part B, vol. 28, p.p. 1–4, 1997.

[٣] Li, Q.; Iu, V.P.; Kou, K.P.; "Three-dimensional vibration analysis of functionally graded material sandwich plates", Journal of Sound and Vibration, vol. 311, p.p.498-515, 2008.

[٤] Chi, S.H.; Chung, Y.L.; "Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load— Part I: Analysis", International Journal of Solids and Structures, vol. 43, p.p. 3657–3674, 2006.

[٥] Prakash, T.; Singha, M.K.; Ganapathi, M.; "Thermal postbuckling analysis of FGM skew plates", Engineering Structures, vol. 30, p.p. 22-32, 2008.

[٦] Delale, F.; Erdogan, F.; "The crack problem for a nonhomogeneous plane", ASME Journal of Applied Mechanics, vol. 50, p.p. 609–614, 1983.

[٧] Apetre, N.A.; Sankar, B.V.; Ambur, D.R.; "Low-velocity impact response of sandwich beams with functionally graded core", Journal of Solids and Structures, vol. 43, p.p. 2479-2496, 2006.

[٨] Anderson, T.A.; "An investigation of SDOF models for large mass impact on sandwich composites", Journal of Composites Part B, vol. 36(2), p.p. 135–142, 2005.

[٩] Etemadi E., Afaghi Khatibi A., Takaffoli M., "3D finite element simulation of sandwich panels with a functionally graded core subjected to low velocity impact". Journal of Composite Structures, vol. 89(1), p.p. 28-34, 2009.

[١٠] Frostig, Y.; Thomsen, O. T.; "High-order free vibration of sandwich panels with a flexible core", International Journal of Solids and Structures, vol. 41, p.p. 1697–1724, 2004.

[١١] Malekzadeh, K.; Khalili, M.R.; Mittal R.K.; "Local and global damped vibration of plates with a viscoelastic soft flexible core: an improved high-order approach", Journal of Sandwich Structure and Materials, vol. 7, p.p. 431-456, 2005.

[١٢] Khalili, M.R.; Malekzadeh, K.; Mittal, R.K.; "Effect of physical and geometrical parameters on transverse low-velocity impact response of sandwich panels with a transversely flexible core", Journal of Composite Structures, vol. 77, p.p. 430-443, 2007

[١٣] Choi, I.H.; Lim, C.H.; "Low-velocity impact analysis of composite laminates using linearized contact law", Journal of Composite Structure, vol. 66, p.p. 125–32, 2004.

۶- زيرنويس‌ها

[1] Higher-order Sandwich Plate Theory
[2] Improved Higher-order Sandwich Plate Theory
[3] Single Of Freedom Degree