نقش برخي از پارامترهاي مؤثر بر روي واكنش به ضربه صفحات كامپوزيتي هيبريدي هوشمند

علي شكوه‌فر[۱], سيد محمد رضا خليلي[*۲] و فرامرز آشناي قاسمي[۳]
[۱]دانشيار گروه مهندسي مواد- دانشكده مكانيک- دانشگاه صنعتي خواجه نصير
[۲]استاد گروه مهندسي مكانيک- دانشكده مكانيک- دانشگاه صنعتي خواجه نصير
[۳]دانشجوي دكتري مهندسي مكانيک- دانشكده مكانيک- دانشگاه صنعتي خواجه نصير

(تاريخ دريافت ۸۵/۶/۲۵ , تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۶/۱ , تاريخ تصويب ۸۶/۷/۷)

چكيده

در اين تحقيق، پاسخ صفحات كامپوزيتي چندلاية هيبريدي تقويت‌شده توسط سيمهاي هوشمند (حافظه‌دار[۱]يا SMA) به ضربه سرعت پايين[۲] مطالعه شده است. سيمهاي هوشمند در درون لايه‌هاي يک كامپوزيت چندلاية پليمري از جنس شيشه- اپوكسي قرار داده شده‌اند. اثر حضور سيمهاي هوشمند بر روي نيروي تماس[۳] و همچنين خيز سازه‌هاي مزبور مطالعه شده است. از تئوري تغييرشكل برشي مرتبه اول صفحات[۴] و روش سري فوريه[۵] براي حل تحليلي معادلات حاصل استفاده شده است. رفتار متقابل جسم ضربه‌زننده و صفحة ضربه‌خورنده توسط يک سيستم جرم- فنر[۶] با دو درجة آزادي مدل شده است. نتايج به‌دست آمده از تحليل حاضر با نتايج مقالات موجود مقايسه و صحت و دقت مدل حاضر تأييد شده است. نتايج حاصل از تحليل حاضر بيانگر آن است كه با انتخاب زاويه و محل قرارگيري مناسب سيمهاي هوشمند در امتداد ضخامت سازه، خيز و در نتيجه مقاومت سازه در برابر ضربه و همچنين حد تحمل به خسارت افزايش مي‌يابد.

واژه‌هاي كليدي: ضربه- كامپوزيت- سيمهاي هوشمند- زاويه- خيز- حد تحمل به خسارت- مدل جرم و فنر

مقدمه

از آنجايي كه پليمرها ذاتاً ترد هستند، مقاومت در برابر ضربة كامپوزيتهاي متداول چندلاية پليمري تقويت‌شده توسط الياف، اندک است. لذا حتي اگر يک جسم صلب كوچک با سرعت پايين به آنها برخورد كند، ممكن است موجب تخريب آنها شود. اين نوع از تخريب بسيار خطرناک مي‌باشد، زيرا از نوع تخريبهاي داخلي بوده و ممكن است كه با چشم غيرمسلح قابل رؤيت نباشد. از اين رو محققان توجه زيادي بر روي مقاوم كردن سازه‌هاي كامپوزيتي متداول در برابر تخريب ناشي از ضربه سرعت پايين داشته‌اند.

يكي از راههاي جلوگيري از تخريب سازه‌هاي كامپوزيتي پليمري، قرار دادن سيمهاي هوشمند در داخل آنهاست. زيرا سيمهاي هوشمند تحريک شده، مي‌توانند تنش بازياب كششي[۷] در داخل سازه توليد كنند. از آنجايي كه اين پيش‌كشيدگي مثبت، موجب كاهش خيز و تنشها و كرنشهاي درون‌صفحه‌اي سازه در هنگام وقوع ضربه در سرعتهاي پايين مي‌شود، اين مواد اخيراً مورد توجه بسياري از محققان سازه‌هاي كامپوزيتي قرار گرفته است[۱].

Abrate [۱]، رفتار ضربه در كامپوزيتهاي لايه‌اي را به نحو مبسوطي مورد مطالعه قرار داده است. همچنين Olsson [۲]، ضربه در سرعت پايين را بر اساس نسبت جرم جسم ضربه‌زننده به جرم جسم ضربه‌خورنده، به دو گروه ضربه با جرم سبک و جرم سنگين تقسيم‌بندي كرده است. Sun و Chen [۳] از نخستين افرادي بودند كه تأثير مثبت پيش تنش كششي را در بهبود مقاومت در برابر ضربة مواد كامپوزيتي مورد بررسي قرار دادند. Birman و همكارانش[۴] از اولين كساني بودند كه در تحقيقاتشان نشان دادند با قرار دادن سيمهاي هوشمند در داخل يک سازة كامپوزيتي چندلاية معمولي، مقاومت در برابر ضربه سازه افزايش مي‌يابد. او با استفاده از تئوري كلاسيک صفحات[۸] نشان داد كه با قرار دادن سيمهاي هوشمند در داخل تعدادي از لايه‌هاي متفاوت سازه، مقاومت به ضربه كلي[۹] سازه در سرعتهاي پايين افزايش مي‌يابد. او از روابط بنيادي و ميكرومكانيک متناظر با يک كامپوزيت چندلايه شامل سيمهاي هوشمند استفاده كرد كه پيشتر و با به‌كارگيري قانون مخلوطها، توسط برخي از محققان مانند Mei [۵] به دست آمده بود. برخي از محققان مانند

* نويسنده مسئول: تلفن: ۸۸۶۷۴۸۴۱-۸(۲۲۰۸) ، فاكس: ۸۸۶۷۴۲۴۳ Email: smrkhalili2005@gmail.com

Rogers [۶]، Wu [۷] و Schetky [۸] نیز با ارائه تکنولوژي مورد نیاز براي ساخت کامپوزیتهاي هوشمند، امکان ارزیابي تجربي تئوریهاي فوق را فراهم کردند.

همچنین Roh و Kim [۹ و ۱۰] با قرار دادن سیمهاي هوشمند در مرکز یک سازة کامپوزیتي چندلایه و با استفاده از قانون انرژي و روش اجزاي محدود، به نتایجي مشابه با نتایج Birman [۴] دست یافتند. با این تفاوت که Birman و همکارانش سیمهاي هوشمند را در تعدادي از لایه‌ها قرار داده، اما Roh و همکارانش سیمها را تنها در مرکز سازه قرار دادند. لذا این سئوال در ذهن ایجاد مي‌شود که آیا محل قرارگیري سیمها مي‌تواند تأثیري در بهبود مقاومت در برابر ضربة یک سازة کامپوزیتي داشته باشد یا خیر؟ بدین لحاظ در تحقیق اخیر خلیلي و همکارانش [۱۱] با روش تحلیلي به بررسي واکنش ضربه سرعت پایین یک سازة کامپوزیتي پلیمري شامل سیمهاي هوشمند پرداخته و نقش وجود سیمهاي هوشمند و تأثیر کسرحجمي و محل قرارگیري آنها را بر روي خیز، زمان و نیروي تماس در ضربه مورد مطالعه قرار داده‌اند.

در تحقیق حاضر، با ارائة یک مدل کامل که بتواند امکان مطالعة رفتار یک سازه کامپوزیتي چندلایة ترکیبي هوشمند را در ضربه سرعت پایین به صورت تحلیلي فراهم کند، به بررسي نقش برخي از پارامترهاي مؤثر مانند زاویه و محل قرارگیري سیمهاي هوشمند و همچنین زاویة الیاف در کامپوزیت پایه، در رفتار ضربه‌اي سازه‌هاي فوق پرداخته شده است.

معادلات حاکم

در این تحقیق، به سبب وجود تغییرشکلهاي برشي عرضي خارج از صفحه، معادلات صفحة به‌دست آمده توسط Whitney و Pagano [۱۲] ، مورد توجه قرار داده شده‌است. میدان تغییرمکان به صورت زیر بیان مي‌شود:

$$u = u^0(x,y,t) + z\psi_x(x,y,t)$$
$$v = v^0(x,y,t) + z\psi_y(x,y,t)$$
$$w = w^0(x,y,t)$$

(۱)

که در روابط فوق، u^0 ، v^0 و w^0 تغییرمکانهاي صفحة میاني کامپوزیت چندلایه، به ترتیب در جهتهاي x ، y و z و ψ_x و ψ_y دورانهاي برشي، به ترتیب حول محورهاي y و x هستند. با ساده‌سازي معادلات حرکت در حالت کلي براي حالت ارتوتروپیک خاص ($A_{16}=A_{26}=D_{16}=D_{26}=B_{ij}=0$) و با انتخاب نحوة لایه‌چیني سازه به صورت متقارن، بالانس و متعامد[۱۰]، و در صورت وجود برآیندهاي تنش یکنواخت اولیه N^i_x و N^i_y که توسط Sun و همکارانش[۱۳] ارائه شده است، معادلات حرکت سازه به صورت زیر به دست مي‌آید:

$$D_{11}\psi_{x,xx}+D_{66}\psi_{x,yy}+(D_{12}+D_{66})\psi_{y,xy}-k_{sh}A_{55}\psi_x - k_{sh}A_{55}w_{,x}=I\ddot{\psi}_x$$

(۲ - الف)

$$(D_{12}+D_{66})\psi_{x,xy}+D_{66}\psi_{y,xx}+D_{22}\psi_{y,yy}-k_{sh}A_{44}\psi_y - k_{sh}A_{44}w_{,y}=I\ddot{\psi}_y$$

(۲ - ب)

$$k_{sh}A_{55}\psi_{x,x}+(k_{sh}A_{55}+N^i_x)w_{,xx}+k_{sh}A_{44}\psi_{y,y} +(k_{sh}A_{44}+N^i_y)w_{,yy}+q=\rho\ddot{w}$$

(۲ - پ)

در روابط فوق، k_{sh} ضریب تصحیح برشي است که نخستین بار توسط Mindlin [۱۴] معرفي شده و عموماً برابر با $\pi^2/12$ در نظر گرفته مي‌شود. همچنین در معادلات فوق نماد "," نمایانگر مشتق‌گیري نسبت به x و y بوده و نماد " $\dot{}$ " نمایشگر مشتق‌گیري نسبت به زمان است. همچنین q معرف بارگذاري ضربه عرضي خارج از صفحه بوده و نیز:

$$(A_{ij},B_{ij},D_{ij}) = \int_{-h/2}^{h/2} Q^k_{ij}(1,z,z^2)\,dz; \qquad (i,j=1-6)$$
$$(A_{ij}) = \int_{-h/2}^{h/2} Q^k_{ij}\,dz\ ; \qquad (i,j=4,5)$$
$$(\rho,I) = \int_{-h/2}^{h/2} \rho_0\,(1,z^2)\,dz$$

(۳)

در رابطة فوق ρ_0 نمایانگر دانسیتة هر یک از لایه‌ها، ρ دانسیتة کل صفحه و I ممان اینرسي آن است. همچنین Q_{ij} $(i,j=1-6)$ سفتي‌هاي صفحه‌اي کاهش یافته براي تنشهاي صفحه‌اي و Q_{ij} $(i,j=4,5)$ سفتي‌هاي برشي جانبي مي‌باشند که در مرجع[۱۲] معرفي شده‌اند.

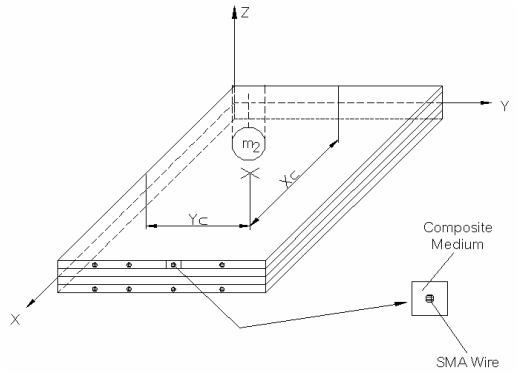
در این تحقیق تمرکز بر روي یک صفحة مستطیل‌شکل با ابعاد a x b و با ضخامت ثابت h است که شرایط مرزي

آن به صورت تکیه‌گاه ساده، و به نحو زير مي‌باشد:

$$w = \psi_{x,x} = 0 \quad ; \quad at \;\; x = 0, a$$
$$w = \psi_{y,y} = 0 \quad ; \quad at \;\; y = 0, b$$

(۴)

شکل (۱) نمايشگر يک صفحة کامپوزيتي هيبريدي هوشمند است که در معرض ضربة يک جرم کروي در مرکز آن مي‌باشد.



شکل ۱: نماي شماتيک يک صفحة کامپوزيتي هيبريدي هوشمند تحت يک بار ضربه‌اي.

معادلات بنيادي

معادلات بنيادي تنش- کرنش براي يک کامپوزيت هيبريدي هوشمند، به صورت زير است [۵, ۱۵]:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & 0\\ Q_{12} & Q_{22} & 0\\ 0 & 0 & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \gamma_{12}\end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix}\sigma_r\\ 0\\ 0\end{Bmatrix} k_s - \begin{bmatrix}\overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & 0\\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & 0\\ 0 & 0 & \overline{Q}_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\alpha_l^c\\ \alpha_t^c\\ 0\end{Bmatrix} k_c \Delta T$$

(۵)

که در رابطة فوق σ_1 ، σ_2 و τ_{12} ، به ترتيب تنش عمودي در جهت اصلي ۱، تنش عمودي در جهت اصلي ۲ و تنش برشي در صفحة ۲ – ۱ مي‌باشند. همچنين مقادير ε_1 ، ε_2 و γ_{12} ، به ترتيب معرف کرنش عمودي در جهت اصلي ۱، کرنش عمودي در جهت اصلي ۲ و کرنش برشي در صفحة ۲ – ۱ مي‌باشند. همچنين Q_{ij} و $\overline{Q}_{ij}$ به ترتيب معرف ماتريسهاي سفتي کاهش يافته براي سازة کامپوزيتي هيبريدي هوشمند و سازة کامپوزيتي پايه(فاقد سيمهاي هوشمند) مي‌باشند. σ_r نمايشگر تنش بازيابي بوده که به روشهاي تحليلي و تجربي قابل تعيين است و در اين تحقيق از منحنيهاي تنش- دما به‌کار گرفته شده در مرجع[۴] استفاده شده و α^c_i (i=l,t) ضريب انبساط حرارتي طولي l و عرضي t ناشي از اعمال اختلاف دماي با محيط ΔT مي‌باشند. همچنين k_s و k_c به ترتيب معرف کسرحجمي سيمهاي هوشمند و کسرحجمي کامپوزيت پايه مي‌باشند.

با انتگرال‌گيري از رابطة (۵) در امتداد ضخامت، رابطة بنيادي سازه به صورت زير به‌دست مي‌آيد:

$$\begin{Bmatrix}N\\ M\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}A & B\\ B & A\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon^0\\ \kappa\end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix}N_r\\ M_r\end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix}N^T\\ M^T\end{Bmatrix}$$

(۶)

که در معادلة فوق، N و M به ترتيب معرف برآيند نيروها و گشتاورهاي تنش و A ، B وD ، به ترتيب نمايشگر ماتريسهاي سفتي کشش، کوپلي و خمشي در رابطة (۳) مي‌باشند. همچنين N_r و M_r به ترتيب معرف برآيند نيروها و گشتاورهاي تنش بازيابي توليد شده توسط سيمهاي هوشمند و N^T و M^T به ترتيب نمايانگر برآيند نيروها و گشتاورهاي ناشي از تنش حرارتي مي‌باشند. همچنين ε^0 و κ به ترتيب معرف کرنشهاي صفحة مياني و انحناهاي کل صفحه مي‌باشند.

اگر لايه‌چيني به صورت متقارن، بالانس و متعامد باشد، با توجه به ثابت بودن توزيع دما در امتداد ضخامت صفحه، آنگاه داريم:

$$B = M_r = M^T = 0$$

(۷)

با اعمال اين شرط و با توجه به اينکه مقادير کرنشهاي صفحه‌اي و انحناها را مي‌توان بر حسب تغييرمکانها نشان داد، لذا معادلة (۵) را مي‌توان به صورت ساده شدة زير نوشت:

$$\begin{Bmatrix}N_x\\ N_y\\ N_{xy}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & 0\\ A_{12} & A_{22} & 0\\ 0 & 0 & A_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u_{,x}\\ v_{,y}\\ u_{,y}+v_{,x}\end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix}N_{rx}-N_x^T\\ N_{ry}-N_y^T\\ 0\end{Bmatrix}$$
$$\begin{Bmatrix}M_x\\ M_y\\ M_{xy}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}D_{11} & D_{12} & 0\\ D_{12} & D_{22} & 0\\ 0 & 0 & D_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}-w_{,xx}\\ -w_{,yy}\\ -2w_{,xy}\end{Bmatrix}$$

(۸)

پاسخ ديناميکي

تعيين نيروي تماس

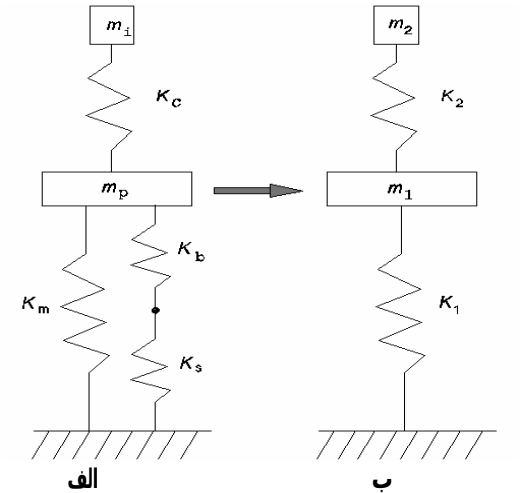
در اين تحقيق براي تعيين نيروي تماس ناشي از

ضربه، از یک مدل جرم- فنـر دو درجـه آزادي مطـابق بـا شکل (۲) استفاده شده است[۱و۱۶]. معادلة حرکت، بنـابر شکل ۲ و همان‌گونه که پیشتر توسط نویسنده ارائـه شـده است[۱۱]، عبارت است از:

$$m_2 \ddot{z}_2 + F = 0$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + k_{bs} z_2 + k_m z_2^{\,3} - F = 0$$

(۹)



شکل ۲ : مدلهاي جرم- فنر: الف) با در نظر گرفتن سفتي غشايي، ب) بدون در نظر گرفتن سفتي غشايي[۱].

که با توجه به شـکل فـوق، در معادلـه (۹)، m_1 همـان m_p جـرم صـفحة هيبريـدي و m_2 همـان m_i جـرم جسـم ضربه‌زننده، z_1 و z_2 بـه ترتيـب تغييرمکـان نسـبي صـفحة هيبريدي و جسم ضربه‌زننده ، k_{bs} سفتي خمشـي- برشـي صفحة هيبريدي، k_b سفتي خمشي صـفحة هيبريـدي، k_s سفتي برشي صفحة هيبريدي، k_m سـفتي غشـايي صـفحة هيبريدي و F نيروي تماس است.

از آنجايي که ميزان سفتي غشايي k_m براي مواد کامپوزيتي پليمري، به ويژه در سرعتهاي پايين اندک است، لذا با حذف اين پارامتر از مدل موجود در شکل (۲ الف)، به مدل ساده شدة شکل (۲ ب) دست پيدا مي‌کنيم.

حال با استفاده از مدل تماس خطي شدة چوي[۱۱][۱۷]، براي تعيين نيروي تماس، به جاي قانون تماس هرتز[۱۲]، که غيرخطي است، مي‌توان نوشت:

$$F = k_1 \alpha$$

(۱۰)

و:

$$k_1 = F_m^{\,1/3}\, k_c^{\,2/3}$$

(۱۱)

که در معادلات فوق $k_1 = k_2$ بيانگر ضريب تماس در مدل تماس خطي‌شدة چوي و F_m حداکثر نيروي تماس به‌دست آمده (به روش سعي- خطا) و k_c ضريب تماس در قانون تماس هرتز مي‌باشد، که توسط رابطة زير قابل محاسبه است:

$$k_c = \frac{4}{3}\,\frac{R_2^{1/2}}{\dfrac{1-\upsilon_2^2}{E_2} + \dfrac{1}{E_1}}$$

(۱۲)

در روابط فوق R_2 شعاع انحنأ، ν_2 ضريب پواسون و E_1 و E_2 مدول الاستيسيتة دو جسم بوده، زيرنويس ۱ مربوط به جسم ضربه‌خورنده و زيرنويس ۲ مربوط به جسم ضربه زننده است.

حال باتوجه به نمودار آزاد موجود در شکل (۲ ب) و جايگذاري مقدار F موجود در آن با مقدار ارائه شده توسط چوي، معادلات حرکت متناظر با سيستم ۲ درجة آزادي سيستم مزبور، به صورت زير درمي‌آيد:

$$m_1 \ddot{z}_1 = -k_1 z_1 - k_2 (z_1 - z_2)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = -k_2 (z_2 - z_1)$$

(۱۳)

پاسـخ معادلـة فـوق، بـا اسـتفاده از روش رانـگ- کوتـا و به‌کارگيري نـرم‌افزارهـاي محاسـباتي ماننـد MATLAB و اسـتفاده از کـد ODE 45 ، بـه سـادگي قابـل محاسـبه مي‌باشد.

تعيين خيز و تحليل تنش- کرنش صفحه

بـا بسـط بارگـذاريها، تغييرمکانهـا و دورانهـاي موجود در دسته معادلات (۲) به صورت سري‌هـاي فوريـه، مي‌توان به پاسخي دست يافـت کـه ارضـأ کننـدة شـرايط مرزي دسته معادلات (۴)، براي حالت تکيه‌گاه ساده باشد. فرض مي‌شود که هر يک از عبارتها، به صورت تـابعي جـدا از زمان و موقعيت باشد. بـه عـلاوه، بـا صـرفنظر کـردن از اثرات اينرسي دوراني[۱۸]، مسألة موجود بـه صـورت يـک معادلة ديفرانسيل مرتبة دوم بر حسب زمان در مي‌آيد کـه شامل ضرايب فوريه لازم براي تعيين خيز عرضي خـارج از صفحة سازه مي‌باشد.

نمايش سـريهاي فوريـه دوگانـه، تغييرمكانهـاي جـانبي و دوراني يک صفحة مستطيل‌شكل با تكيه‌گاه ساده، به يـک بارگذاري جانبي به صورت زير است[۱۹ و ۲۰]:

$$\psi_x(x,y,t) = \sum_{m,n=1}^{\infty} A_{mn}(t)\,\mathrm{Cos}(\frac{m\pi}{a})x\ \ \mathrm{Sin}(\frac{n\pi}{b})y \qquad (۱۴)$$

$$\psi_y(x,y,t) = \sum_{m,n=1}^{\infty} B_{mn}(t)\,Sin(\frac{m\pi}{a})x\ \ Cos(\frac{n\pi}{b})y \qquad (۱۵)$$

$$w(x,y,t) = \sum_{m,n=1}^{\infty} W_{mn}(t)\,\mathrm{Sin}(\frac{m\pi}{a})x\ \ \mathrm{Sin}(\frac{n\pi}{b})y \qquad (۱۶)$$

كـه در روابـط فوق،مقـادير $A_{mn}(t)$ ، $B_{mn}(t)$ و $W_{mn}(t)$ ، ثابتهاي وابسته به زمان بوده كه بايد محاسبه شـوند. تـابع بار را نيز مي‌توان به صورت زير نمايش داد:

$$q(x,y,t) = \sum_m \sum_n Q_{mn}(t)\,\mathrm{Sin}(\frac{m\pi}{a})x\,\mathrm{Sin}(\frac{n\pi}{b})y \qquad (۱۷)$$

كـه در رابطـة فـوق، Q_{mn} عبارتهـاي سـري فوريـه‌انـد. بـا جايگذاري معادلات فوق در دسته معادلات (۲)، بـه دسـت مي‌آيد:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} A_{mn}(t) \\ B_{mn}(t) \\ W_{mn}(t) \end{bmatrix} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Q_{mn}(t) - \rho h\,\ddot{W}_{mn}(t) \end{bmatrix} \end{Bmatrix} \qquad (۱۸)$$

كه در رابطة فوق:

$$L_{11} = D_{11}(\frac{m\pi}{a})^2 + D_{66}(\frac{n\pi}{b})^2 + k_{sh}\,A_{55}$$

$$L_{12} = L_{21} = (D_{12} + D_{66})(\frac{m\pi}{a})(\frac{n\pi}{b})$$

$$L_{13} = L_{31} = k_{sh}\,A_{55}(\frac{m\pi}{a})$$

$$L_{22} = D_{66}(\frac{m\pi}{a})^2 + D_{22}(\frac{n\pi}{b})^2 + k_{sh}\,A_{44}$$

$$L_{23} = L_{32} = k_{sh}\,A_{44}(\frac{n\pi}{b})$$

$$L_{33} = (k_{sh}\,A_{55} + N_x^i)(\frac{m\pi}{a})^2 + (k_{sh}\,A_{44} + N_y^i)(\frac{n\pi}{b})^2 \qquad (۱۹)$$

حال

با تغيير متغير زير:

$$A_{mn}(t) = K_A\,W_{mn}(t) \quad ; \quad B_{mn}(t) = K_B\,W_{mn}(t)$$

$$K_A = \frac{L_{12}L_{23} - L_{13}L_{22}}{L_{11}L_{22} - L_{12}^2} \quad ; \quad K_B = \frac{L_{12}L_{13} - L_{11}L_{23}}{L_{11}L_{22} - L_{12}^2} \qquad (۲۰)$$

معادلة (۱۸) به صورت زير تسهيل مي‌شود:

$$\ddot{W}_{mn}(t) + \omega_{mn}^2 W_{mn}(t) = \frac{Q_{mn}(t)}{\rho h} \qquad (۲۱)$$

كه در رابطة فوق:

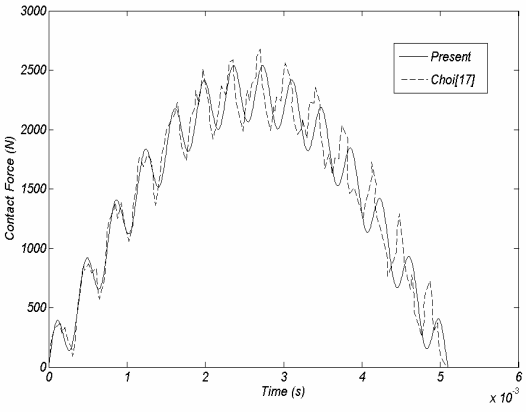
$$\omega_{mn}^2 = \frac{L_{13}\,K_A + L_{23}\,K_B + L_{33}}{\rho\,h} \qquad (۲۲)$$

كه ω_{mn} فركانس طبيعي اصلي صفحه است.

براي شرايط تغييرمكان اوليه برابر با صـفر و سـرعت اوليـه برابر با صفر، پاسخ معادلـة (۲۱)، يعنـي مقـدار $W_{mn}(t)$ بـا استفاده از حل عددي با نرم افزار قابل محاسبه مي‌باشد. با جايگـذاري ايـن مقـدار در معـادلات (۱۴) و (۱۵) و (۱۶)، مقادير ψ_x ، ψ_y و w به سادگي به دست مي‌آيند.

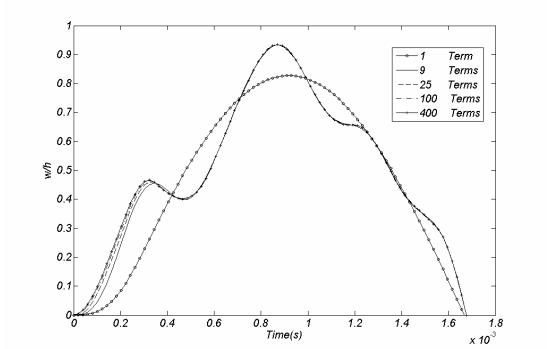
صحت مدل

به منظور اطمينان از دقت نتايج تحقيق حاضـر، در شكل (۳)، پاسخ مدل جرم- فنـر تحقيـق حاضـر بـراي تعيين نيروي تماس، با پاسخ ديناميكي چوي[۱۷] مقايسه شده است. بنابر شكل (۳)، انطبـاق مناسـبي بـين ايـن دو روش حل به چشم مي‌خورد. حداكثر خطا و اخـتلاف بـين مقادير ۱ درصد است.



شكل ۳ : مقايسه پاسخ مدل جرم- فنر تحقيق حاضر براي تعيين نيروي تماس، با پاسخ ديناميكي چوي[۱۷].

همچنين به منظور اطمينان ازهمگرايـي حـل مسـأله، بـه ازاي تعداد جملات مورد استفادة سري فوريه در حل خيـز صفحه، مسـأله در حالـت فاقـد سـيم و بـه ازاي داده‌هـاي موجود در جدول (۱) مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌گونـه كه در شكل (۴) نيز مشاهده مي‌شـود، بـه ازاي تنهـا ۱۰۰ جمله، همگرايي به نحو بسيار مطلوبي به دست مي‌آيد.



شكل ۴ : نحوة همگرايي تعداد جملات به‌كار گرفته شدة سري فوريه در تعيين پاسخ خيز صفحة كامپوزيتي فاقد سيم هوشمند.

جدول ۱ : مشخصات مادي و ابعادي[۴ و۱۶].

مشخصات ابعادي كامپوزيت هيبريدي چندلايه	
نوع تكيه‌گاه	ساده
طول= عرض	200 mm
لايه‌چيني	$[0/90/0/90/0]_S$
ضخامت هر لايه	0.269 mm
خواص كامپوزيت پايه (شيشه- اپوكسي)	
E_{11} = 23.062 GPa ; $E_{22} = E_{33}$ = 10.789 GPa	
$G_{13} = G_{12}$ = 11.92 GPa ; G_{23} =4.68 GPa	
$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$ = 0.344	
ρ = 1796 kg/m^3	
خواص سيمهاي هوشمند Ni-Ti (وضعيت آستنيتي)	
E = 70 GPa	
G = 26.32 GPa	
ν = 0.33	
ρ = 6500 kg/m^3	
σ_r = 220 MPa at ΔT = 39 °C	
خواص جسم ضربه‌زننده	
E = 207 GPa	
ν = 0.30	
ρ = 7800 kg/m^3	
Tip diameter =0.0127 m	
Weight = 1.50 kg	
Impactor velocity = 2.00 m/s	

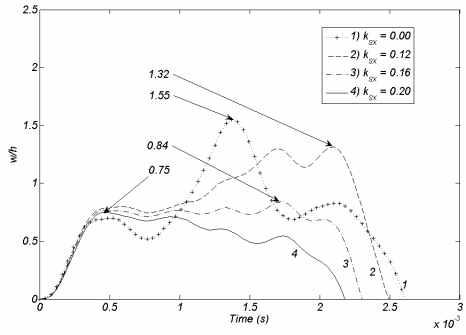
نتايج و بحث

صفحة كامپوزيتي هيبريدي هوشمند به‌كار رفته در اين تحقيق از نوع متقارن، بالانس و متعامد اختيار شده است. ضربه‌زننده نيز يک جسم كروي سنگين اختيار شده است. مشخصات مورد نياز مواد و ابعاد به‌كار رفته در اين تحقيق، در جدول (۱) ارائه شده است.

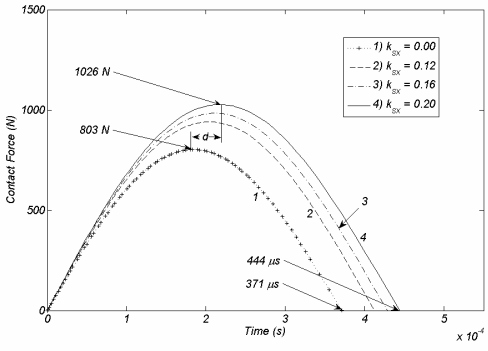
تأثير حضور سيمهاي هوشمند

در اين تحقيق، سيمها تنها در جهت الياف كامپوزيت پايه قرار داده شده‌اند. زيرا در صورتي كه سيمها، در زاويه‌اي متفاوت با زاويه الياف موجود در يک لايه خاص قرار گيرند، عدم تطابق سيمها با الياف موجود در آن لايه، منجر به ايجاد فضاي خالي از الياف و تنها شامل رزين ترد مي‌شود، كه خود اين پديده موجب تردي و كاهش مقاومت در برابر ضربة سازه خواهد شد[۲۱].

كسرحجمي سيمهاي هوشمند، از 0.12 تا 0.20 اختيار شده است. سيمها در جهت x و در لايه‌هاي ۵ و ۶ قرار داده شده‌اند. شماره‌گذاري لايه‌ها از بالا به پايين و از ۱ تا ۱۰ مي‌باشد. همان‌گونه كه در شكل (۵ -الف) مشاهده مي‌شود، به سبب حضور سيمهاي هوشمند و افزايش كسرحجمي آنها، مقدار حداكثر w/h (نسبت خيز صفحه به ضخامت آن)، از 1.55 براي كامپوزيت پايه (فاقد سيمهاي هوشمند)، به 0.75 براي كامپوزيت هوشمند با كسرحجمي 0.20 رسيده و لذا، موجب كاهش 52 درصدي نسبت مزبور شده است.



الف



ب

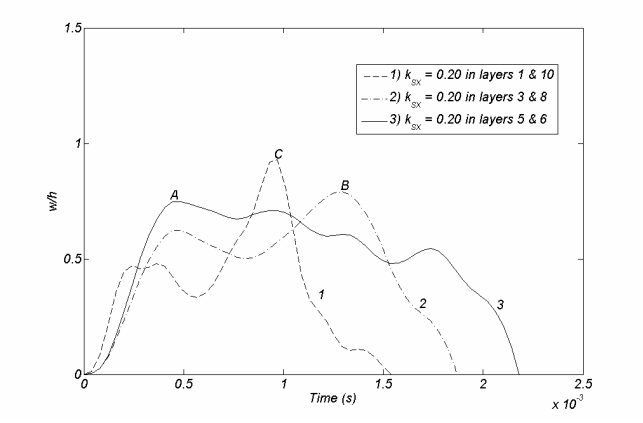
شكل ۵ : تغييرات: الف) w/h و ب) نيروي تماس بر حسب زمان، به سبب تأثير حضور سيمهاي هوشمند.

همچنين، همان‌گونه كه در شكل (۵ -ب) مشاهده مي‌شود، حضور سيمهاي هوشمند، منجر به بروز پديده‌هاي قابل توجهي در نيروي تماس به وجود آمدة ناشي از برخورد جسم ضربه‌زننده با صفحة‌كامپوزيتي مي‌شود. مقدار حداكثر نيروي تماس[۱۳](MCF)، از مقدار N 803 در حالت بدون سيم تا مقدار N 1026 در حالت كامپوزيت داراي 0.20 كسرحجمي سيمهاي هوشمند افزايش يافته است. از آنجايي كه اين افزايش 28 درصدي با انتقال زمان رسيدن به حداكثر نيروي تماس (MCFT)[۱۴] به سمت راست (فاصلة d) و نيز افزايش زمان تماس[۱۵](CT) از µs 371 تا µs 444 همراه است، لذا از شدت ضربه وارده به صفحه[۱۶] كاسته شده است. در نتيجه، ضربة نرمتري بر روي سازه اعمال شده و احتمال تخريب سازه كاهش مي‌يابد. همان‌گونه كه مشخص است، هم افزايش MCFT و هم افزايش CT ، هر دو منجر به نرمتر شدن ضربه مي‌شوند. به بيان ديگر، استفاده از سيمهاي هوشمند، نه تنها خيز سازه را به ميزان قابل توجهي كاهش مي‌دهد، بلكه با تأخير در افزايش نيروي تماس و در كنار آن با افزايش محدودة زمان تماس اجسام ضربه‌زننده و ضربه‌خورنده، به واقع باعث افزايش سفتي[۱۷] سازه شده و در نتيجه، موجب افزايش مقاومت در برابر ضربة سازه مي‌شود.

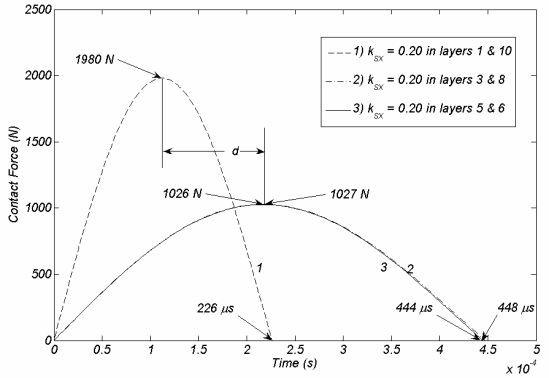
در اينجا اختلاف قابل توجهي مابين پيش‌كشيدگي يک صفحة كامپوزيتي با استفاده و بدون استفاده از سيمهاي هوشمند،كه پيشتر توسط نويسنده بدان پرداخته شده است[۲۲] به چشم مي‌خورد. در تحقيق مزبور نشان داده شده است كه اعمال پيش‌كشش بر روي كامپوزيتهاي فاقد سيمهاي هوشمند، مقادير MCF و MCFT را افزايش مي‌دهد، اما ميزان شوک ضربه نيز به سبب كاهش مقدار CT افزايش مي‌يابد. لذا به نظر مي‌رسد كه اعمال پيش‌كشيدگي بر روي يک صفحة كامپوزيتي توسط سيمهاي هوشمند، به سبب كاهش شوک ضربه وارده، مفيدتر از اعمال پيش‌كشيدگي در كامپوزيتهاي فاقد سيمهاي هوشمند است.

تأثير محل قرارگيري سيمهاي هوشمند در امتداد ضخامت سازه

در اين مرحله، به نحوة تأثير محل قرارگيري سيمهاي هوشمند در سازة كامپوزيتي موجود پرداخته شده است. كسرحجمي برابر با 0.20، اما جهت سيمهاي هوشمند تنها در جهت x اختيار شده است.



الف



ب

شكل ۶ : تغييرات: الف) w/h و ب) نيروي تماس بر حسب زمان، به سبب تغييرمحل قرارگيري سيمهاي هوشمند.

همان‌گونه كه در شكل (۶ -ب) مشاهده مي‌شود، تغيير محل قرارگيري سيمهاي هوشمند از داخل لايه‌هاي ۵ و ۶ (يعني در نزديكي مركز ضخامت سازه) به داخل لايه‌هاي ۳ و ۸ ، تقريباً تغييري در ميزان حداكثر نيروي تماس (1026 N) ندارد، اما به ميزان اندكي موجب افزايش خيز سازه شده، كه پديدة مطلوبي نمي‌باشد(شكل (۶ -الف)). با تغيير محل سيمهاي هوشمند از وضعيت قبل و قرار دادن آنها به داخل لايه‌هاي ۱ و ۱۰، مسأله بيش از پيش حائز اهميت مي‌شود. زيرا در اين حالت، نه تنها ميزان حداكثر نيروي تماس از مقدار N 1026 به N 1980 افزايش مي‌يابد، بلكه محل اوج آن نيز به سمت چپ نمودار حركت كرده (فاصلة d)، مدت زمان تماس دو جسم نيز از µs 448 به µs 226 كاهش يافته و در نتيجه، پديدة ضربه وارده تشديد مي‌شود. اين پديده‌ها در خلاف با پديدة ناشي از حضور سيمهاي هوشمند است(شكل (۵ -ب)) و لذا، باعث كاهش مقاومت در برابر سازه، نسبت به حالت قرارگيري

سيمهاي هوشمند در لايه‌هاي داخلي سازه مي‌شود. همان‌گونه كه در شكل (۶ -الف) مشاهده مي‌شود، قرار دادن سيمهاي هوشمند در لايه‌هاي خارجي سازه به جاي لايه‌هاي مركزي آن، در يك كامپوزيت داراي زمينه شيشه- اپوكسي، علاوه بر بروز پديدة نامطلوب افزايش نيروي تماس، منجر به افزايش مقدار حداكثر خيز سازه (از مقدار A به مقدار B و سپس به مقدار C (شكل (۶ -الف))) نيز مي‌شود. با توجه به اينكه پديدة ضربه، پديده‌اي موضعي[۱۸] است، لذا به نظر مي‌رسد كه براي يك كامپوزيت شيشه- اپوكسي، در صورت قرار دادن سيمهاي هوشمند در لايه‌هاي بالاتر، و با نزديكتر شدن هرچه بيشتر آنها به محل برخورد ضربه‌زننده، تغيير سفتي لايه فوقاني سازه، مي‌تواند عاملي براي اين رفتار ناخوشايند باشد.

تأثير زاوية قرارگيري سيمهاي هوشمند

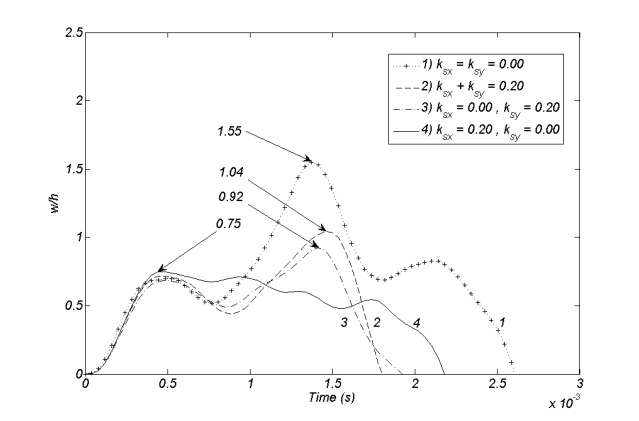
در بخش قبل نشان داده شد كه با قرار دادن سيمهاي هوشمند در لايه‌هاي مياني‌تر يك سازه با زمينة كامپوزيت شيشه- اپوكسي، مي‌توان مقاومت در برابر ضربة آن را بهبود بخشيد. حال به بررسي اثر زاوية قرار دادن سيمهاي هوشمند در داخل كامپوزيت پايه، به منظور بهبود بخشيدن به مقاومت در برابر ضربة سازه پرداخته مي‌شود. بدين منظور، يك سازة فاقد سيمهاي هوشمند، با يك سازه كه در آن سيمهاي هوشمند به‌ازاي كسرحجمي ثابت برابر با 0.20و محل قرارگيري ثابت در لايه‌هاي مياني سازه، يعني لايه‌هاي ۵ و ۶ ، و ۴ و ۷ به ترتيب براي جهت‌هاي همزمان x و y ، لايه‌هاي ۴ و ۷ براي جهت y و لايه‌هاي ۵ و ۶ براي جهت x و به نحو زير در داخل سازه قرار داده شدند:

۱) سازه فاقد سيمهاي هوشمند
۲) سازه با سيمهاي هوشمند در هر دو جهت x و y
۳) سازه با سيمهاي هوشمند تنها در جهت y
۴) سازه با سيمهاي هوشمند تنها در جهت x

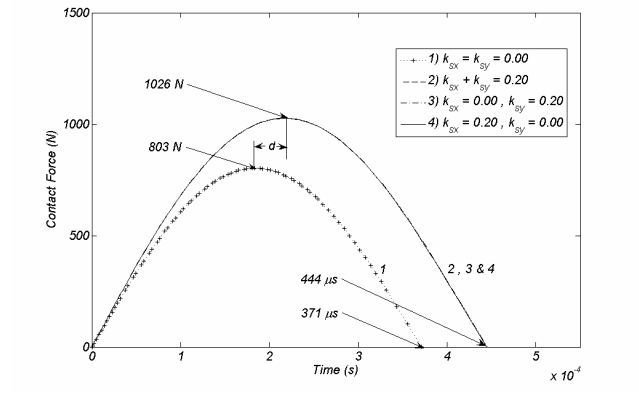
مشاهدة نمودارهاي شكل (۷)، نمايشگر آن است كه:

الف) همان‌گونه كه در شكل (۷ -الف) مشاهده مي‌شود، ميزان كاهش نقطة اوج w/h در حالت ۴ (منحني ۴) نسبت به حالت كامپوزيت فاقد سيمهاي هوشمند (منحني ۱)، برابر با 52 درصد است، در حالي كه اين نسبت براي حالت ۳ (منحني ۳)، برابر با 41 درصد و براي حالت ۲ (منحني ۲)، برابر با 33 درصد مي‌باشد، كه معرف تأثيرگذاري بيشتر قرارگيري سيمهاي هوشمند در حالت ۴، نسبت به حالتهاي ديگر است.

ب) با آنكه وجود سيمهاي هوشمند باعث بهبود مقاومت در برابر ضربه سازه مي‌شود (به سبب افزايش MCF ، MCFT و CT و لذا كاهش شوك ضربه)، اما تغيير زاويه سيم، تأثيري در ميزان نيروي تماس ندارد. يعني در صورت قرار دادن سيمهاي هوشمند در لايه‌هاي مياني سازه، اين تنها كسرحجمي و محل قرارگيري سيمهاي هوشمند هستند كه بر سه پارامتر فوق تأثيرگذار مي‌باشند (منحنيهاي ۲ و ۳ و ۴ در شكل (۷ -ب)).



الف

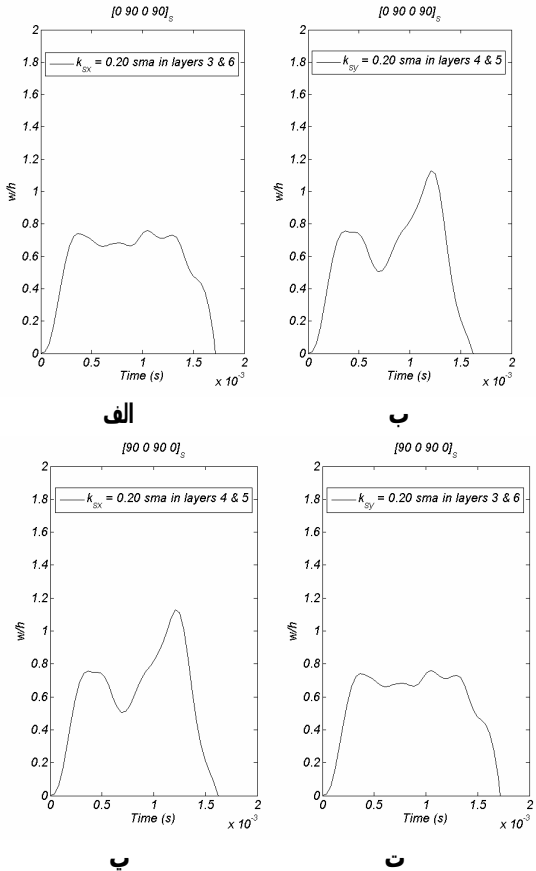


ب

شكل ۷ : تغييرات الف) w/h و ب) نيروي تماس بر حسب زمان، به سبب تغيير زاويه قرارگيري سيمهاي هوشمند.

از آنجايي كه قرارگيري سيمها در حالت ۴، به واقع در جهتي بود كه تعداد لايه‌هاي كامپوزيت پايه و كسرحجمي الياف بيشتري در آن جهت بود (يعني در جهت x)، تصور اولية اين است كه همين مسأله، باعث افزايش استحكام خمشي كلي سازه و لذا بهبود در مقاومت در برابر ضربة سازه شده است.

به منظور اطمينان از اين استدلال، لايه‌چيني بـه گونـه‌اي تغيير داده شد كه ميزان اليـاف در كامپوزيـت پايـه در دو جهت x و y با هم برابر شوند. لذا دو نـوع لايـه‌چينـي بـه صورت $[0/90/0/90]_s$ و $[90/0/90/0]_s$ با خواص مـواد ارائـه شده در جدول (۱) و كسر حجمي سيمهاي هوشمند برابـر با 0.20 اختيار و مورد بررسي قرار گرفتند(شكل (۸)).



شكل ۸ : تغييرات w/h براي دو نوع لايه‌چيني متفاوت كامپوزيت پايه، به‌ازاي قرارگيري سيمهاي هوشمند در دو جهت $0°$ و $90°$.

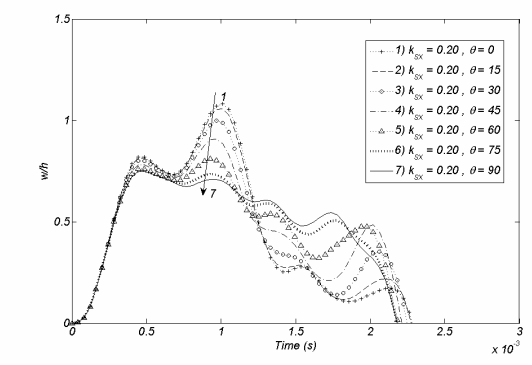
اگر استدلال فوق صحيح مـي‌بـود، آنگـاه بايـد نمودارهـاي شكل (۸ -الف) و شـكل (۸-پ) بـا يكـديگر و نمودارهـاي شـكل (۸ -ب) و شـكل (۸ -ت) نيـز بـا يكـديگر مشـابه مي‌شدند، زيرا هم كسرحجمي و جهت سيمهاي هوشـمند و هم كسرحجمي الياف كامپوزيت پايه، در اين دو حالت با هم يكسان مي‌باشند. امـا بنـابر آنچـه مشـاهده مـي‌شـود، مي‌توان نتيجه گرفت كه استدلال فوق نمـي‌توانـد صـحيح باشـد. نكتـه قابـل توجـه در نمودارهـاي فـوق، تشـابه نمودارهـاي شـكل (۸ -الـف) بـا شـكل (۸ -ت) و نيـز نمودارهاي شـكل (۸ -ب) بـا شـكل (۸ -پ) اسـت. نكتـة جالبتر، همانا كمتر بودن ميزان w/h در حالتهاي (۸ -الف) و (۸ -ت) در مقايسـه بـا حالتهـاي (۸ -ب) و (۸ -پ) مي‌باشد. از آنجايي كه از نظر مكانيک مواد و علـم مطالعـة رفتار سازه‌ها، لايه‌هاي بيرونـي‌تـر يـک سـازه هسـتند كـه بخش اعظم بار خمشي را تحمل مي‌كننـد، مـي‌تـوان ايـن گونه استدلال كرد كه چون در حالتهاي شكل (۸ -الـف) و شكل (۸ -ت)، نيروي پيش‌كشش سيمهاي هوشـمند، كـه موجب بهبود در مقاومت خمشي و لذا بهبـود مقاومـت در برابر ضربة سازه مي‌شوند، در جهت لايـه‌هـاي خـارجي‌تـر سازه مي‌باشند، تأثير بيشتري در بهبـود مقاومـت در برابـر ضربة سازه داشته‌اند. براي مثال در حالت شكل (۸ -الـف) كه سيمهاي هوشمند در لايه‌هاي ۳ و ۶ و در جهـت x در داخل سازه قرار داده و سپس تحريک شده‌اند، لايه‌هايي از كامپوزيت پايه كـه اليـاف آنهـا در جهـت x و در راسـتاي سيمهاي هوشـمند قـرار دارنـد در لايـه‌هـاي ۱، ۳، ۶ و ۸ مي‌باشند. چون اين لايه‌ها نسبت به لايه‌هـاي ۲، ۴، ۵ و ۷ ، در بخش خارجي‌تر سازه موجود واقع شـده‌انـد، بـه‌ويـژه لايه‌هاي ۱ و ۸، شرايط مناسبتري از نظر مقاومت در برابـر ضربه در سازه ايجاد مي‌شود. اين مسـأله كـاملاً مشـابه بـا حالت شكل (۸ -ت) است كه سيمهاي هوشمند در جهـت y قرار داده شده‌اند.

تأثير زاوية الياف در كامپوزيت پايه

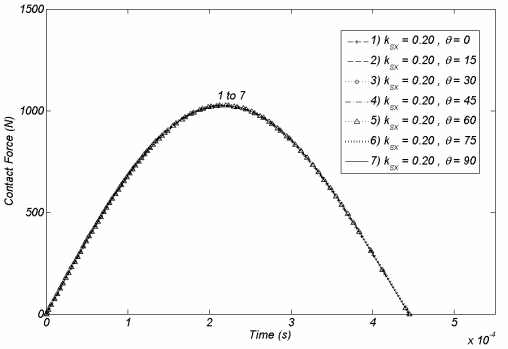
در اين بخش از تحقيـق، تـأثير زاويـة اليـاف در كامپوزيت پايه بر روي مقاومت در برابـر ضـربة سـازه‌هـاي فاقد سيمهاي هوشـمند و نيـز بـر روي سـازه‌هـاي شـامل سيمهاي هوشمند مطالعه شـده اسـت. چـون لايـه‌چينـي ابتدايي به صورت $[0, 90, 0, 90, 0]_s$ در جدول ۱ انتخـاب گرديده بود، لايه‌چيني اين بخش از تحقيق به صورت $[0, \theta, 0, \theta, 0]_s$ و به‌ازاي $\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90^o$ ، در نظر گرفته شده است. سيمهاي هوشمند در جهـت x و بـا كسرحجمي 0.20 در داخل لايـه‌هـاي ميـاني ۵ و ۶ سـازه قـرار دارنـد و سـاير مشخصـات بنـابر جـدول (۱) اختيـار شده‌اند. شايان ذكر است كه مقادير A_{16} و A_{26} صفر نبوده، اما در مقايسه با ساير ضرايب و ماتريسهاي سـازه بـه طـور كلي بسيار نـاچيز مـي‌باشـند و در نتيجـه از مقـادير آنهـا صرفنظر شده است.

همان‌طور كه در شكل (۹ -الـف) نشـان داده شـده اسـت، افزايش زاوية اليـاف كامپوزيـت پايـه، باعـث كـاهش خيـز صفحه و افزايش مقاومت سـازه در برابـر ضـربه مـي‌شـود.

حداكثر w/h در زاويه °0 و برابر با 1.08 است و حداقل w/h در زاويه °90 و برابر با 0.75 است. لذا تغيير زاويه الياف در كامپوزيت پايه از °0 تا °90 باعث كاهش 31 درصدي در نسبت w/h شده است. اما همان‌گونه كه از شكل (۹ -ب) مشخص است، تغيير زاويه الياف در كامپوزيت پايه، تأثيري در نيرو و زمان تماس ندارد.



الف

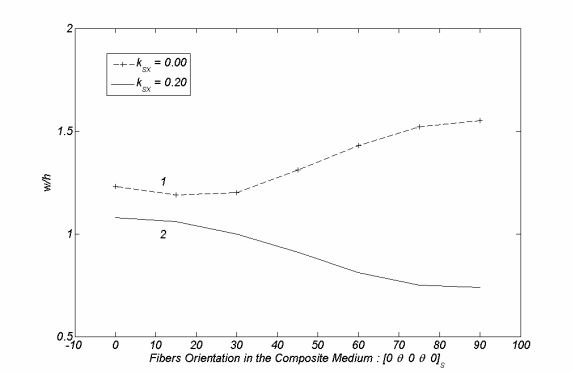


ب

شكل ۹ : تأثير زاويه الياف كامپوزيت پايه بر روي: الف) w/h **و ب) نيروي تماس.**

شكل (۱۰)، نمايش‌دهندة تفاوت رفتار يک كامپوزيت فاقد سيمهاي هوشمند (خط‌چين) و يک كامپوزيت شامل سيمهاي هوشمند (خط توپر) با تغيير زاويه الياف در كامپوزيت پايه است. همان‌گونه كه مشاهده مي‌شود، در زواياي كوچک θ (از °0 تا °30)، تأثير قرار دادن سيمهاي هوشمند در بهبود خيز و مقاومت در برابر ضربة سازه اندک بوده (در حدود 8 درصد)، اما هرچه اين زاويه افزايش مي‌يابد (از °30 تا °90)، ميزان تأثير مثبت سيمهاي هوشمند نيز نسبت به حالت $\theta = 0^{o}$ افزايش مي‌يابد (در حدود 31 درصد).

مقايسه دو منحني در شكل (۱۰) تأثير مستقيم سيمهاي هوشمند را كه تنها در جهت x قرار دارند به راحتي نشان مي‌دهد. افزايش زاويه الياف در كامپوزيت پايه بدون سيمهاي هوشمند (منحني خط‌چين) نشان دهندة افزايش اختلاف سفتي خمشي بين لايه‌هاي مجاور است[۲۳] و در نتيجه يكپارچگي و مقاومت سازه در برابر ضربه كاهش مي‌يابد. منحني خط‌چين، همچنين نشان مي‌دهد كه وجود لايه‌هاي °0 و °90 در لايه‌چيني و لذا حداكثر اختلاف در سفتي خمشي سازه، باعث افزايش خيز و كاهش مقاومت سازه و در نتيجه تخريب زودرس سازه مي‌شود.



شكل ۱۰: تأثير زاويه الياف كامپوزيت پايه بر روي نسبت w/h .

ليكن افزايش زاويه الياف در كامپوزيت پايه داراي سيمهاي هوشمند (منحني توپر)، با وجود ايجاد اختلاف سفتي خمشي بين‌لايه‌اي منجر به كاهش فاحشي در ميزان خيز و لذا افزايش مقاومت به ضربه سازه مي‌گردد. اين امر نشان مي‌دهد كه وجود سيمهاي هوشمند در راستايي به‌غير از راستاي الياف در كامپوزيت پايه، تأثير به‌سزايي در افت اختلاف سفتي خمشي بين‌لايه‌اي و يكنواخت‌سازي سازه در برابر ضربه دارد. هرچه اختلاف زاويه قرارگيري سيمهاي هوشمند و زاويه الياف در كامپوزيت پايه بيشتر باشد، تأثير مثبت و كاهش اختلاف سفتي لايه‌هاي مجاور بيشتر مي‌باشد.

نتيجه‌گيري

در اين تحقيق، پاسخ ضربه سرعت پايين، يک سازة كامپوزيتي از جنس شيشه- اپوكسي شامل سيمهاي هوشمند، توسط يک مدل كامل، با استفاده از تئوري تغييرشكل برشي مرتبه اول، يک مدل دودرجة آزادي جرم- فنر و مدل تماس خطي چوي براي تعيين نيروي تماس ناشي از ضربه، مورد بررسي قرار گرفت. اين مدل قادر است تا پاسخ ضربه در سرعتهاي پايين را در سازه‌هاي كامپوزيتي چندلايه معمولي و تقويت شده توسط

سيمهاي هوشمند تعيين نمايد.

با مطالعة نتـايج بـه دسـت آمـده مشـاهده گرديـد كـه در صورت قرار دادن سيمهاي هوشمند در لايه‌هاي مياني يک سازه از جنس شيشه- اپوكسي، مقـادير MCF ، MCFT و CT افزايش مي‌يابد، نرخ رشد نيروي تماس كاهش يافته و در نتيجه از شدت ميزان ضربه وارده نيز كاسته مـي‌شـود. همچنين مشاهده شده است كه مقدار حداكثر نسبت w/h سازه به شدت كاهش يافته و لذا، سازه به نحو قابل توجهي در برابر تخريب ناشي از ضربه مقاوم مي‌شود. همچنين بـه سبب كاهش خيز سازه، تنشها و كرنشهاي درون صفحه‌اي سازه در جهتهاي x و y نيـز كـاهش يافتـه و از واماندگي سازه ممانعت مي‌شود.

در صورت قرار دادن سيمهاي هوشمند در هر جهت خاص، باز هم مي‌توان بهبود در مقاومت سازه را مشاهده كرد. امـا در صورت ثابت نگهداشتن كسرحجمي سيمهاي هوشـمند و تغيير دادن محل قرارگيري سيمهاي هوشمند در امتـداد ضخامت يک سازه از جنس شيشه- اپوكسي، هرچه سيمها در لايه‌هاي خارجي‌تر سازه قرار گيرند، بـه سـبب افـزايش سفتي خارجي‌ترين لاية سـازه، مقـدار MCF افـزايش امـا مقادير MCFT و CT كاهش مي‌يابند. لذا نرخ رشد نيروي تماس افزايش يافته، بر شدت شوک ضربه و اثرات مخـرب ناشي از آن افزوده مي‌شود. لذا هرچه سيمهاي هوشمند در لايه‌هاي خارجي‌تر سازه قرار گيرند، ميزان حداكثر نسـبت w/h سـازه و در پـي آن مقـادير تنشـها و كرنشـهاي درون‌صفحه‌اي نيز افزايش يافته و از مقاومت سازه در برابر ضربه كاسته مي‌شود.

با قرار دادن سيمهاي هوشمند به موازات آن دسته از الياف كه در خارجي‌ترين لايه‌هاي كامپوزيت پايه قرار دارنـد، بـه سبب آنكه خارجي‌ترين لايـه‌هـاي سـازه بـه محـل ضـربه نزديكترند و لذا بيشترين تـأثير را بـر روي رفتـار سـازه در برابر ضربه دارند، نرخ رشد نيروي تماس و شوک ضربه بـه ميزان بيشتري كاهش مي‌يابند. ايـن اسـتراتژي همچنـين باعث مي‌شود كه مقادير حداكثر w/h و تنشها و كرنشهاي درون‌صفحه‌اي كاسته شده، احتمال واماندگي سازه كاهش يابد.

با ثابت نگهداشتن كسرحجمي و محل قرارگيري سـيمهاي هوشمند در مركز سـازه و بـا تغييـر دادن زاويـة الیـاف در كامپوزيت پايه، در يک سازه از جنس كامپوزيـت شيشـه- اپوكسي، تغيير زاوية الياف كامپوزيت پايه، تأثيري بـر روي نيروي تماس ندارد. اما با افـزايش زاويـة الیـاف كامپوزيـت پايه، كاهش قابل توجهي در نسـبت w/h يـک كامپوزيـت چندلاية شامل سيمهاي هوشمند به وجود آمده، مقاومـت در برابر ضربة سازه افزايش مي‌يابد. در نهايت، بدون توجـه به زاويـة الیـاف در كامپوزيـت پايـه، قـرار دادن سـيمهاي هوشمند در داخل سازه، موجب افزايش مقاومـت در برابـر ضربة سازه شده و اين تأثير مثبت، با افزايش زاويـة الیـاف كامپوزيت پايه از °0 تا °90، به نحو قابل تـوجهي افـزايش مي‌يابد.

فهرست علائم

w^0 , v^0 , u^0 : تغييرمكانهـاي صـفحه ميـاني كامپوزيـت هيبريدي، به ترتيب در جهتهاي x ، y ، z

ψ_x , ψ_y : دوران برشي، در جهتهاي x ، y

N^i_x , N^i_y : برآيند نيروهاي يكنواخت اوليه، در جهتهاي x ، y

k_{sh} : ضريب تصحيح برش

q : بارگذاري عرضي

I : ممان اينرسي كل صفحه

Q_{ij} : سفتي‌هاي صفحه‌اي كاهش يافته

a , b : طول و عرض صفحه

h : ضخامت كل صفحه

ΔT : اختلاف دماي سازه با محيط

k_c , k_s : كسرحجمي سيمهاي هوشمند و كامپوزيت پايه

M , N : برآيندهاي نيرو و گشتاور تنش

A ، D ، B : ماتريسهاي سفتي كششي، كوپلي و خمشي

M_r , N_r : برآيندهاي نيرو و گشتاور تنش بازيابي

M^T , N^T : برآيندهاي نيرو و گشتاور تنش حرارتي

m_1 , m_2 : جرم صفحة هيبريدي و جرم جسم ضربه‌زننده

z_1 , z_2 : تغييرمكان نسبي جرم صـفحة هيبريـدي و جـرم جسم ضربه‌زننده

k_{bs} : سفتي خمشي- برشي صفحة هيبريدي

k_b : سفتي خمشي صفحة هيبريدي

k_s : سفتي برشي صفحة هيبريدي

k_m : سفتي غشايي صفحة هيبريدي

F : نيروي تماس

$k_1 = k_2$: ضريب تماس در مدل تماس‌خطي چوي

k_c : ضريب تماس در قانون تماس هرتز

F_m : حداكثر نيروي تماس به دست آمده

R_2 : شعاع انحنأ ضربه‌زننده

E_2 , E_1 : مدول الاستيسيتة ضربه‌خورنده و ضربه‌زننده

$W_{mn}(t)$, $B_{mn}(t)$, $A_{mn}(t)$: ثابتهاي وابسته به زمان

Q_{mn} : ثابتهاي متناظر با عبارتهاي سري فوريه

F(t) : بار ضربه‌اي

G : مدول برشي

MCF : حداكثر نيروي تماس

MCFT : زمان رسيدن به حداكثر نيروي تماس

CT : زمان تماس

نمادهاي يوناني

ρ_0 : دانسيته هر يک از لايه‌ها

ρ : دانسيتة كل لايه‌ها

σ_1 ، σ_2 ، τ_{12} : تنشهاي عمودي و برشي در جهتهاي اصـلي صفحة هيبريدي براي هر لايه

ε_1 ، ε_2 ، γ_{12} : كرنشهاي عمودي و برشي در جهتهاي اصلي صفحة هيبريدي براي هر لايه

σ_r : تنش بازيابي

α^c_i (i=l,t) : ضريب انبساط حرارتي طولي l و عرضي t

κ , ε^0 : كرنشها و انحناهاي صفحة مياني

ν_2 : ضريب پواسون ضربه‌زننده

ω_{mn} : فركانس طبيعي اصلي صفحه

بالانويسها

^{0} : صفحة مياني

^{i} : مقدار اوليه

[̊] : يک مرتبه مشتق‌گيري نسبت به زمان

[¨] : دو مرتبه مشتق‌گيري نسبت به زمان

زيرنويسها

, : مشتق‌گيري نسبت به x يا y

مراجع

1 - Abrate, S. (1991). "Impact on laminated composite materials." *Applied Mechanics Review,* Vol. 44, PP. 155-190.

2 - Olsson, R. (2000). "Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates." *Composites: Part A,* Vol. 31, PP. 879-887.

3 - Sun, C. T. and Chen, J. K. (1985). "On the impact of initially stressed composite laminates." *Journal of Composite Materials,* Vol. 19, PP. 490-503.

4 - Birman, V., Chandrashekhara, K. and Sain, S. (1996). "An approach to optimization of shape memory alloy hybrid composite plates subjected to low-velocity impact." *Composites: Part B,* Vol. 27B, PP. 439-446.

5 - Mei, C., Zhong, Z. W., Chen, R. R. and Pates, C. S. (1994). "Buckling and post-buckling of shape memory alloy fiber reinforced composite plates." *In 'Buckling and Postbuckling of Composite Structures*', Ed. A. K. Noor), ASME, New York, PP. 115-132.

6 - Rogers, C. A. (1990). "Active vibration and structural acoustic control of shape memory alloy hybrid composites: experimental results." *Journal of Acoustics Society of America*, Vol. 88, PP. 2803-2811.

7 - Wu, M. H., Schetky, L. McD. (1991). "The properties and processing of shape memory alloys for use as actuators in intelligent composite materials." *In 'Smart Structures and Materials',* Eds. Haritos, G. K. and Srinivasan, A. V., ASME, New York, PP. 65-71.

8 - Schetky, L. McD. (1992). "The role of shape memory alloys in smart/adaptive structures." *In 'Shape memory Materials and Phenomena-Fundamental Aspects and Applications*', (Eds C. T. Liu), Materials Resource Society, Pittsburgh, PP. 299-307.

9 - Roh, J. H. and Kim, J. H. (2002). "Hybrid smart composite plate under low velocity impact." *Composite Structures,* Vol. 56, PP. 175-182.

10 - Roh, J. H. and Kim, J. H. (2003). "Adaptability of Hybrid smart composite plate under low velocity impact." *Composites: Part B,* Vol. 34, PP. 117-125.

11 - Khalili, S. M. R., Ashenai Ghasemi, F., Shokuhfar, A., Malekzadeh, K. and Ehsani, N. (2006). "Dynamic response of shape memory polymer composite plate in low velocity large mass impact." *'International Conference on Composite Materials and nano-Structures'*, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Universiti Putra, Malaysia.

12 - Whitney, J. M. and Pagano, N. J. (1970). "Shear deformation in heterogeneous anisotropic plates." *Journal of Applied Mechanics,* Vol. 37, PP. 1031-1036.

13 - Sun, C. T. and Chattopadhyay, S. (1975). "Dynamic response of anisotropic plates under initial stress due to impact of a mass." *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics,* Vol. 42, PP. 693-698.

14 - Mindlin, R. D. (1951). "Influence of rotary inertia and shear on flexural motions of isotropic elastic plates." *Journal of Applied Mechanics,* Vol. 18, PP. 31-38.

15 - Pates, C. S. III., Zhong, Z. W., Chen, R. R. and Mei, C. (1994). "Passive control of random response of shape memory alloy fiber reinforced composite plates." *In 'Structural Dynamics: Recent Advances, Proc. 5th Int. Conf.*', (Eds N. S. Ferguson, H. F. Wolfe and C. Mei), The Institute of Sound and Vibration Research, Southampton, 1, PP. 423-436.

16 - Khalili, M. R., Malekzadeh, K. and Mittal, R. K. "Effect of physical and geometrical parameters on transverse low-velocity impact response of sandwich panels with a transversely flexible core." *Composite Structures,* In Press, available online from 16 July 2005.

17 - Choi, I. H. and Lim, C. H. (2004). "Low-velocity impact analysis of composite laminates using linearized contact law." *Composite Structures,* Vol. 66, PP. 125-132.

18 - Bert, C. W. and Birman, V. (1987). "Dynamic stability of thick, orthotropic, circular cylindrical shells." *In Lecture Notes in Engineering: Refined Dynamic Theories of Beams, Plates and Shells and Their Applications* (Eds by I. Elishakoff and H. Irretier), Springer, Berlin, PP. 235-244.

19 - Carvalho, A. and Soares, C. G. (1996). "Dynamic response of rectangular plates of composite materials subjected to impact loads." *Composite Structures,* Vol. 34, PP. 55-63.

20 - Christoforou, A. P. and Swanson S. R. (1991). "Analysis of Impact response in composite plates." *International Journal of Solids Structures*, Vol. 27, No. 2, PP. 161-170.

21 - Tsoi, K. A., Stalmans, R., Schrooten, J. and Mai, Y. W. (2003). "Impact damage behavior of shape memory alloy composites." *Materials Science and Engineering Part: A,* Vol. 342, PP. 207-215.

22 - Khalili, S. M. R., Mittal, R. K. and Mohammad Panah, N. "Analysis of fiber reinforced composite plates subjected to transverse impact in the presence of initial stresses." *Composite Structures,* In Press, available online from 6 October 2005.

23 - Abrate, S. (2005). *Impact on laminated composite materials; 2nd Edition*, Cambridge University Press, America.

واژه‌هاي انگليسي به ترتيب استفاده شده در متن

1 - Shape Memory
2 - Low Velocity Impact
3 - Contact Force
4 - First Order Shear Deformation Plate Theory
5 - Fourier Series Method
6 - spring-Mass Model
7 - Tensile Recovery Stress
8 - Classical Plate Theory
9 - Global Impact
10 - Cross Ply- Balanced Symmetric Laminates
11 - Choi's Linearized Contact Model
12 - Hertzian's Contact Theory
13 - Maximum Contact Force
14 - Maximum Contact Force Time
15 - Contact Time
16 - Impulse
17 - Stiffness
18 - Localized Phenomenon