

پاسخ دینامیکی صفحات کامپوزیت الیافی تنش دار تحت بار ضربه ای عرضی

سید محمدرضا خلیلیⁱ؛ ناصح محمدپناهⁱⁱ

چکیده

در این مقاله برای اولین بار، تاثیر تنش های اولیه بر پاسخ صفحات بزرگ کامپوزیت الیافی تک لایه و چند لایه متقارن در برابر ضربه عرضی کم سرعت با روش تحلیلی بررسی شده است. تنش های اولیه از طریق اعمال بارهای کششی یا فشاری صفحه ای در حالت های تک محوری و دو محوری در امتداد سطح میانی صفحه کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق از قانون برخورد اسوکلو برای اجسام غیر ایزوتروپیک استفاده شده است. اثرات تنش های کششی و فشاری اولیه به صورت تک محوری و دو محوری بر روی نیروی برخورد، زمان برخورد و خیز مرکزی صفحه بررسی شده است. با روش تحلیلی، اثر تنش های تک محوری در راستای الیاف و عمود بر آن در کامپوزیت های تک جهت و تاثیر لایه چینی های مختلف در کامپوزیت های چند لایه با وجود تنش های اولیه، بر روی پارامترهای فوق بررسی شده است.

کلمات کلیدی

کامپوزیت الیافی - چند لایه ها - ضربه عرضی - تنش های اولیه - تحلیل دینامیکی - خیز مرکزی

Dynamic Response of Fibre Composites With Pre-Stresses Under Transverse Impact

S.M.R. Khalili¹; N. Mohammadpanah²

¹ Associate Professor, Mechanical Engineering Department, K.N.Toosi University of Technology, Tehran

² Lecturer, Mechanical Engineering Department, Islamic Azad University, Aligodarz Unit

ABSTRACT

In this paper, the effect of pre-stresses on the dynamic response of large fibre composite plates in the form of lamina and/or symmetric laminates subjected to low velocity transverse impact was studied using analytical procedure. Pre-stresses were considered in the form of tensile and compressive loads which are uni-axial as well as bi-axial types applied to the edges on mid-plane of the plate. Sveklo's contact law for anisotropic bodies was used. The effect of pre-stresses was considered on contact force, contact time and central deflection of the plate. Using the same analytical method, the effect of uni-axial pre-stresses applied along the fibres as well as perpendicular to the fibres and the effect of various ply sequences on the dynamic response of the plate subjected to transverse impact was studied.

KEYWORDS:

fibre composites, laminates, transverse impact, pre-stress, dynamic analysis, central deflection

ⁱ دانشیار، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، فلکه چهارم تهرانپارس، بزرگراه وفادار شرقی، تلفن ۰۷۷۳۳۴۱۲۳، smrkhalili@mail.com
ⁱⁱ مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد الیگودرز

اسوکلو [۸] به جای قانون برخورد کلاسیک هرتز استفاده شده است. در این تحقیق، ضربه عرضی ناشی از برخورد گلوله ای با جرم، سرعت و شعاع انحنای مشخص در مرکز صفحه کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. همچنین در آنالیز صفحات کامپوزیتی از تئوری کلاسیک لایه ای استفاده شده است. متدولوژی این تحقیق تحلیلی، بسط و تعمیم روش تحلیلی خلیلی [۹] و [۱۰] در آنالیز صفحات کامپوزیتی تحت ضربه عرضی است.

۲- محاسبه نیروی برخورد

در اینجا برای آنالیز برخورد الاستیک بین دو جسم غیر ایزوتروپیک از تئوری اسوکلو استفاده شده است. اصول اساسی تئوری اسوکلو در برخورد دو جسم غیر ایزوتروپیک مشابه اجسام ایزوتروپیک است. در این تئوری سطح تماس به شکل بیضی (با اقطار $2a$ و $2b$) است که بار بر روی آن به شکل سهمی توزیع می شود [۸].

در فاصله زمانی شروع تا پایان برخورد بین ضربه زننده و صفحه کامپوزیتی متقارن، نیرویی متغیر وابسته به زمان به وجود می آید که مقدار آن در هر لحظه با توجه به حرکت ضربه زننده و صفحه و پس از ساده سازی به صورت زیر به دست می آید [۷]:

$$\left[\frac{F(t)}{K} \right]^{2/3} = v_S t - \frac{1}{m_S} \int_0^t F(\tau)(t-\tau) d\tau - \frac{1}{4\pi^2 \sqrt{\rho h}} \int_0^t F(\tau) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin(A' p \Omega)}{\Omega} dp d\phi d\tau \quad (1)$$

که:

$$\Omega = (D_{11} p^2 \cos^4 \phi + 2(D_{12} + 2D_{66}) p^2 \cos^2 \phi \sin^2 \phi + D_{22} p^2 \sin^4 \phi + 4D_{16} p^2 \cos^3 \phi \sin \phi + 4D_{26} p^2 \cos \phi \sin^3 \phi + N_x \cos^2 \phi + N_y \sin^2 \phi)^{1/2} \quad (2)$$

$$A' = \frac{t-\tau}{\sqrt{\rho h}} \quad (3)$$

معادله (۱) یک معادله انتگرالی غیر خطی است که برای یافتن نیروی برخورد در زمان های مختلف، با روش مرحله ای (step by step) تیموشینکو حل شده است [۹].

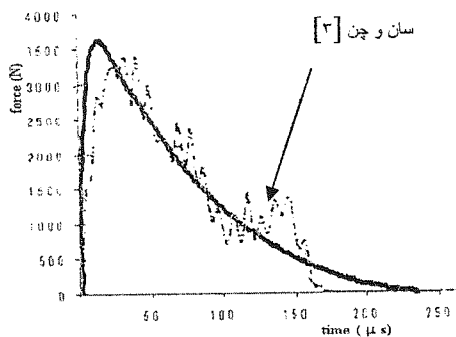
۳- آنالیز خیز صفحات کامپوزیتی متقارن تحت اثر نیروی ضربه عرضی در حضور نیروهای کششی و فشاری اولیه

معادله دیفرانسیل حرکت یک صفحه کامپوزیت با ابعاد نامحدود، که تحت بار ضربه عرضی گسترده $f(x, y, t)$ بر

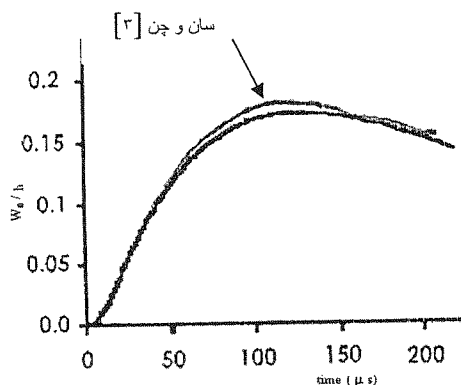
اکثر تحقیقات انجام شده بر روی عکس العمل صفحات کامپوزیت الیافی تحت ضربه عرضی با این فرض است که این صفحات فارغ از تنش های اولیه باشند [۱]. در حالی که تنش های اولیه تاثیر عمده ای بر روی حداکثر نیروی برخورد، زمان برخورد و خیز مرکزی صفحات کامپوزیتی دارد [۲]. تنش های اولیه بر اثر عوامل مختلفی مانند فرآیندهای تولید، روش های مونتاژ و یا تاثیر محیط ایجاد می شوند. برای مثال، پوسته های کامپوزیتی در سازه های ساندویچی ممکن است تحت بارهای اولیه قرار گرفته و یا تیغه های توربین موتور جت در معرض نیروهای گریز از مرکز قرار گیرند. در بررسی اثر تنش های اولیه بر روی پارامترهای پاسخ صفحات کامپوزیتی تحت ضربه عرضی در سرعت های پایین (سرعت های کمتر از ۱۰۰ متر بر ثانیه) مهم ترین تحقیق انجام شده به روش عددی به وسیله سان و چن [۳] صورت گرفته است. آنها تنها به بررسی تاثیر تنش های اولیه به صورت دو محوری در حالت های کششی و فشاری پرداخته اند و مقایسه ای از تاثیر این تنش ها در حالت های تک محوری و همچنین تاثیر آنها در امتداد و عمود بر الیاف در هر لایه ارائه نشده است. همچنین سان و چاتوپادیبای [۴] و دویننز [۵] با استفاده از روش برخورد هرتز و تئوری کلاسیک صفحات با روش المان محدود، ضربه صفحات خاص کامپوزیتی را با حضور تنش های اولیه بررسی کردند. راب و همکارانش [۶] با مطالعه تجربی تاثیر تنش های اولیه صفحه ای را بر روی نیروی برخورد ارزیابی کردند و همان نتایج سان و چن را به دست آوردند. تاکنون فعالیت و تحقیقاتی در این زمینه به روش تحلیلی مشاهده نشده است [۷]. در این تحقیق، تاثیر تنش های اولیه به صورت تک محوری و دو محوری در حالت های کششی و فشاری بر روی پاسخ صفحات کامپوزیتی تک لایه و چند لایه متقارن، تحت ضربه عرضی با روش تحلیلی بررسی شده است. منظور از پاسخ صفحه زمان برخورد، نیروی برخورد، حداکثر نیروی برخورد و خیز صفحه در نقاط مختلف است. در ضربه های با سرعت پایین به علت این که امواج تنشی حاصل از ضربه زمان کافی برای رسیدن به مرزها را ندارد و در نتیجه، مرزها را تحت تاثیر قرار نمی دهند، می توان صفحه کامپوزیتی را به صورت صفحه ای با ابعاد بی نهایت مدل کرد. در اینجا نیز در بررسی اثر ضربه های با سرعت پایین، مدل صفحه بی نهایت در نظر گرفته شده است. به علت غیر ایزوتروپیک بودن صفحات کامپوزیتی از قانون برخورد

در شکل (۱) منحنی نیروی برخورد ناشی از برخورد گلوله ای به جرم $8.4gr$ ، شعاع $3.175mm$ و سرعت $30m/s$ بر روی صفحه با مشخصات ذکر شده در بالا با وجود نیروهای کششی دو محوری $240.6KN/m$ با مدل حاضر و نتایج سان و چن [۳] نشان داده شده است. منحنی با خط پیوسته نتایج به دست آمده از مدل حاضر است. ماکزیم نیروی برخورد حاصل از این مدل $3624.68N$ است که با مقدار به دست آمده به وسیله سان و چن، ۴ درصد خطا دارد.

در شکل (۲) نیز نتایج خیز مرکزی مدل حاضر با نتایج مرجع فوق برای ضربه زنده ای به جرم $8.4gr$ و سرعت $10m/s$ بر صفحه ای با نیروهای کششی دو محوری اولیه $240.6KN/m$ نشان داده شده است. منحنی پر رنگ تر حاصل تحقیق حاضر است و منحنی کم رنگ تر نتایج تحقیق سان و چن [۳] را نشان می دهد. همان طور که از شکل (۲) پیداست، نتایج هر دو تحقیق با اختلاف بسیار کمی (کمتر از ۳ درصد) بر هم منطبق هستند. در واقع، به کارگیری مدل حاضر (در نظر گرفتن صفحه ای با ابعاد نامحدود) در سرعت های پایین تقریب بسیار خوبی برای بررسی اثر ضربه عرضی بر روی صفحات کامپوزیتی است.



شکل (۱): منحنی نیروی برخورد بر حسب زمان



شکل (۲): منحنی خیز مرکزی به ضخامت صفحه بر حسب زمان

روی سطح تماس و بارهای یکنواخت N_x ، N_y در سطح میانی صفحه قرار دارد، به صورت زیر به دست می آید [۷]:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w_0(x, y, t)}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w_0(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w_0(x, y, t)}{\partial y^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w_0(x, y, t)}{\partial x^3 \partial y} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w_0(x, y, t)}{\partial x \partial y^3} + \rho h \frac{\partial^2 w_0(x, y, t)}{\partial t^2} = f(x, y, t) + N_x \frac{\partial^2 w_0(x, y, t)}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w_0(x, y, t)}{\partial y^2} \quad (4)$$

با حل معادله فوق به روش تبدیل فوریه [۱۱]، با فرض ناچیز بودن w_0 و مشتقات آن در فاصله خیلی دور از محل برخورد در یک صفحه نامحدود و یک سری ساده سازی ها، معادله زیر برای خیز نقاط مختلف صفحه در زمان های مختلف به دست می آید:

$$w_0(x, y, t) = \frac{3}{4\pi^2 \sqrt{\rho h}} \int_0^t F(\tau) d\tau$$

$$\int_0^{2\pi\infty} \int_0^{2\pi\infty} \cos[(x \cos \varphi + y \sin \varphi) p] g(A) \frac{\sin(A' p \Omega)}{\Omega} dp d\varphi d\tau \quad (5)$$

$$g(A) = \frac{1}{A^2} \left(\frac{\sin A}{A} - \cos A \right) \quad (6)$$

$$A^2 = a^2 p^2 (1 - \varepsilon^2 \sin^2 \theta) \quad (7)$$

معادله خیز مرکزی صفحه با قرار دادن مقدار صفر به جای x و y در معادله (۵) به صورت زیر به دست می آید:

$$w_0(0, 0, t) = W_0(t) = \frac{3}{4\pi^2 \sqrt{\rho h}} \int_0^t F(\tau) \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{2\pi\infty} g(A) \frac{\sin(A' p \Omega)}{\Omega} dp d\varphi d\tau \quad (8)$$

۸- ارزیابی مدل

در اینجا برای ارزیابی و دقت مدل، صفحه چند لایه متقارن تحت نیروی ضربه عرضی و با حضور نیروهای کششی اولیه که به وسیله سان و چن [۳] به روش المان محدود ارزیابی شده است، در نظر می گیریم و با روش حاضر حل کرده و نتایج آنها را با هم مقایسه می کنیم. این صفحه ۲۰ لایه به صورت $[0/45/0/-45/0]_{2S}$ و ابعاد محسود $15.24 \times 10.16 \times 0.269cm$ دارد که قبل از ضربه تحت نیروهای کششی دو محوری اولیه $240.6KN/m$ است. این ورق از جنس کربن - اپوکسی با مشخصات زیر است:

$$E_1 = 120GPa, E_2 = E_3 = 7.9GPa, G_{12} = G_{13} = G_{23} = 5.5GPa$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = \nu_{32} = 0.3, \nu_{31} = \nu_{21} = 0.01975$$

$$h = 0.269cm, \rho = 1580kg/m^3$$

نتایج حاصل از حل معادلات اسوکلو به صورت زیر است:

[۷]

$$\varepsilon^2 = 0.916$$

$$\frac{K}{\sqrt{r_s}} = 2.42 \times 10^9 \left(\frac{N}{m^2} \right), \frac{Fr_s}{a^3} = 1.647 \times 10^{10} \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

۵- تاثیر نیروهای کششی و فشاری صفحه ای اولیه بر روی نیروی برخورد، زمان برخورد و خیز مرکزی در یک صفحه کامپوزیتی تک لایه

در بررسی چگونگی تاثیر نیروهای کششی و فشاری صفحه ای اولیه بر روی نیروی برخورد، زمان برخورد و خیز مرکزی، ضربه زنده ای کروی از جنس فولاد و یک صفحه کامپوزیت تک لایه و تک جهت با ابعاد نامحدود از جنس کربن-اپوکسی با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است. (محور x در جهت الیاف و محور y در جهت عمود بر الیاف است).

۵-۱- مشخصات ضربه زنده فولادی

$$E_S = 211(GPa), G_S = 82.46(GPa), \nu_S = 0.28,$$

$$\rho = 7850\left(\frac{Kg}{m^3}\right), r_S = 25.4(mm)$$

۵-۲- مشخصات صفحه کامپوزیت الیاف کربن-اپوکسی

$$E_{11} = 123(GPa), E_{22} = E_{33} = 9.5(GPa),$$

$$G_{12} = G_{13} = 4.7(GPa)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = 0.3, \nu_{31} = \nu_{21} = 0.023, \nu_{32} = \nu_{23} = 0.48$$

$$D_{11} = 5284(Nm), D_{22} = 408(Nm),$$

$$D_{12} + 2D_{66} = 524(Nm), D_{16} = D_{26} = 0$$

$$h = 8(mm), \rho = 1515\left(\frac{Kg}{m^3}\right), V_f = 0.6$$

نتایج تئوری برخورد اسوکلو - هرتز عبارتند از:

$$\varepsilon^2 = -0.418$$

$$\frac{Fr_S}{a^3} = 2.325 \times 10^{10} \left(\frac{N}{m^2}\right), K = 277 \times 10^7 \left(\frac{N}{m^{3/2}}\right)$$

در اینجا تاثیر نیروهای کششی و فشاری اولیه در حالت های تک محوری و دو محوری بر روی نیروی برخورد، حداکثر نیروی برخورد، زمان برخورد و خیز مرکزی یک صفحه کامپوزیتی تک لایه و تک جهت ناشی از ضربه عرضی گلوله ای کروی شکل به جرم $m_S = 0.2199Kg$ و سرعت $v_S = 0.25m/s$ بررسی شده است. نیروهای کششی و فشاری برابر با شدت $300KN/m$ در حالت های تک محوری و دو محوری در راستای الیاف و عمود بر آن در نظر گرفته شده است و با حالتی که صفحه کامپوزیتی فارغ از نیروهای اولیه است، مقایسه شده اند.

در شکل های (۳) و (۴) تاثیر نیروهای کششی و فشاری اولیه در حالت های تک محوری و دو محوری بر روی نیروی برخورد و حداکثر نیروی برخورد نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، نیروهای کششی اولیه باعث افزایش نیروی برخورد می شوند در حالی که نیروهای فشاری اولیه نتیجه معکوسی را نشان می دهند؛ اما نتیجه حائز

اهمیت از مقایسه تاثیر نیروهای تک محوری این است که چه در حالت کششی و چه در حالت فشاری تاثیر نیروهای تک محوری در راستای عمود بر الیاف از تاثیر نیروهای راستای الیاف به مراتب بیشتر است. در واقع، عمده تاثیرات نیروهای دو محوری کششی و فشاری اولیه را می توان ناشی از تاثیر این نیروها در جهت عمود بر الیاف دانست، چرا که نیروهای کششی و فشاری در جهت الیاف تاثیر ناچیزی بر روی حداکثر نیروی برخورد می گذارند.

تاثیر نیروهای تک محوری و دو محوری کششی و فشاری اولیه بر روی خیز مرکزی صفحه در شکل (۵) نشان داده شده است و با حالتی که صفحه تنها تحت ضربه عرضی قرار گرفته، مقایسه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود و انتظار می رود، نیروهای کششی اولیه باعث کاهش خیز مرکزی صفحه می شوند، در حالی که نیروهای فشاری اولیه باعث افزایش خیز مرکزی صفحه می شوند. نکته جالبی که می توان از نمودارهای خیز مرکزی صفحه مشاهده کرد این است که در حالتی که صفحه تحت نیروهای کششی اولیه واقع می شود، حداکثر خیز در پایان برخورد روی نمی دهد؛ به این معنا که زمان رسیدن به حداکثر خیز کمتر از زمان برخورد است. در حالی که در صفحه ای بدون نیروهای اولیه و نیز در حالت هایی که صفحه نیروهای فشاری اولیه دارد، خیز مرکزی تا موقعی که نیرو به صفر بر می گردد، افزایش می یابد. همانند مقایسه تاثیر نیروهای کششی و فشاری تک محوری اولیه بر روی نیروی برخورد، در اینجا نیز مشاهده می شود که تاثیر نیروهای اولیه در راستای عمود بر الیاف بر روی خیز مرکزی از تاثیر نیروهای راستای الیاف بیشتر است.

در مورد تاثیر نیروهای کششی اولیه بر روی زمان برخورد از شکل (۳) مشاهده می شود که این نیروها زمان برخورد را کاهش می دهند. تاثیر نیروهای فشاری اولیه بر روی زمان برخورد را می توان از دو جهت بررسی کرد. اول این که چنانچه مسأله برخورد را تا زمان برگشت نیروی برخورد به مقدار صفر در نظر بگیریم، این نیروها زمان برگشت نیروی برخورد به مقدار صفر را کاهش می دهند. این موضوع با توجه به نمودارهای شکل (۳) پیداست. دوم این که با توجه به نمودارهای تاثیر نیروهای فشاری اولیه بر روی خیز مرکزی صفحه در شکل (۵)، دیده می شود که برخلاف حالت کششی و حالتی که صفحه تنها تحت تاثیر ضربه عرضی است، خیز مرکزی صفحه تا موقعی که نیروی برخورد به صفر بر می گردد سیر صعودی داشته و زمان رسیدن خیز به مقدار حداکثر برخلاف حالت های یاد شده بسیار بیشتر است.

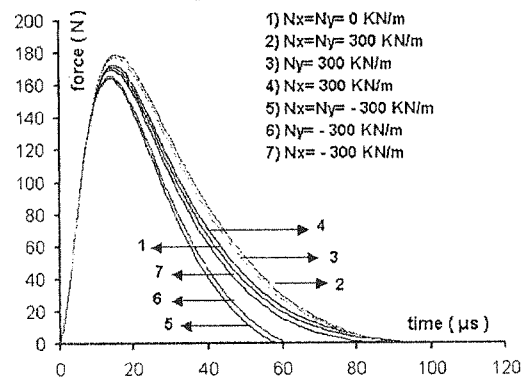
۶- تاثیر لایه چینی های مختلف بر پاسخ صفحه کامپوزیتی تحت ضربه عرضی با وجود تنش های اولیه تک محوری و دو محوری

بعد از بررسی تاثیر نیروهای صفحه ای اولیه بر رفتار یک صفحه کامپوزیت تک لایه، تاثیر این نیروها بر روی یک صفحه چند لایه بررسی می شود. برای بررسی تاثیر لایه چینی های مختلف صفحه بر روی واکنش صفحه در مقابل ضربه عرضی در حضور نیروهای اولیه، صفحه متقارن ۱۰ لایه با چهار لایه چینی متفاوت به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

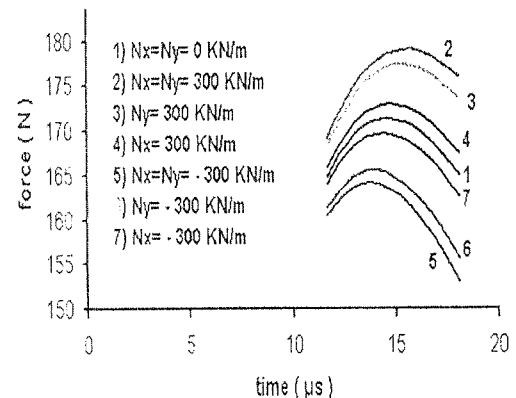
- ۱- صفحه ای با لایه های تک جهت (نوع اول): $[(0)_0]_r$
- ۲- صفحه متقارن کراس پلای (نوع دوم): $[0/90/0/90/0]_s$
- ۳- صفحه متقارن و بالانس (نوع سوم): $[0/45/0/-45/0]_s$
- ۴- صفحه متقارن در حالت کلی (نوع چهارم): $[0/60/30/45/90]_s$

مشخصات صفحات و خصوصیات آنها از قبیل ماتریس-های C ، D و غیره در مرجع [۷] به دست آمده است. نتایج حاصل از مقایسه اثر نیروهای کششی اولیه در حالت های تک محوری و دو محوری بر روی حداکثر نیروی برخورد، زمان برخورد و خیز مرکزی صفحه در جدول (۱) ارائه شده است که اثر لایه چینی های مختلف را بر روی پارامترهای فوق نشان می دهد. همچنین درصد افزایش حداکثر نیروی برخورد و کاهش زمان برخورد و خیز مرکزی صفحه نسبت به صفحه ای بدون بارهای اولیه در همین جدول نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان می دهد که هر چه صفحات کششی اولیه بر روی پارامترهای فوق کمتر خواهد شد. بالعکس چنانچه الیاف در راستایی به غیر از نیروهای اولیه قرار گیرند تاثیر بسزایی در مقادیر پارامترهای فوق خواهند داشت. در شکل (۶) نسبت خیز مرکزی صفحات کامپوزیتی با وجود تنش های اولیه و ضربه عرضی به خیز مرکزی؛ که تنها تحت ضربه رخ می دهد، نشان داده شده است. با توجه به وجود لایه های صفر درجه الیاف در صفحات، تاثیر N_y در کاهش خیز مرکزی بیشتر به چشم می خورد. تاثیر N_x و N_y در صفحه نوع دوم با توجه به وجود لایه های صفر و نود درجه الیاف تقریباً نزدیک به هم است. در شکل (۶) مشاهده

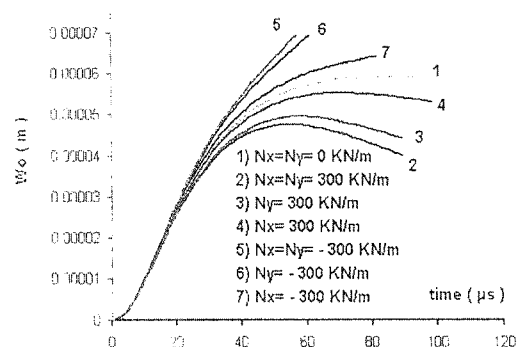
اگر مسأله برخورد با این دید بررسی شود، مشاهده می شود که نیروهای فشاری اولیه، زمان رسیدن به حداکثر خیز را افزایش می دهند. در این بحث نیز مشابه بحث های گذشته، تاثیر نیروهای دو محوری فشاری از نیروهای تک محوری بیشتر است. با مقایسه حالت های تک محوری نیز مشاهده می شود که تاثیر نیروهای فشاری عمود بر الیاف خیلی بیشتر از تاثیر نیروهای فشاری در راستای الیاف است.



شکل (۳): تاثیر نیروهای کششی و فشاری تک محوری و دو محوری اولیه بر روی نیروی برخورد

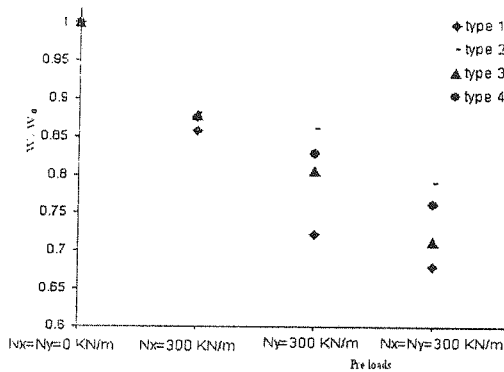


شکل (۴): تاثیر نیروهای کششی و فشاری تک محوری و دو محوری اولیه بر روی حداکثر نیروی برخورد



شکل (۵): تاثیر نیروهای کششی و فشاری تک محوری و دو محوری اولیه بر روی خیز مرکزی صفحه

می شود که تاثیر نیروهای دو محوری بیشتر از نیروهای تک محوری است.



شکل (۴): اثر لایه چینی های مختلف بر روی خیز مرکزی صفحه با وجود نیروهای اولیه

۴- در حالتی که صفحه تنها تحت نیروی ضربه عرضی یا تحت نیروهای ضربه و فشاری اولیه باشد خیز مرکزی صفحه تا لحظه ای که نیروی برخورد به صفر بر می گردد افزایش می یابد؛ اما تاثیر نیروهای کششی اولیه بر روی خیز مرکزی صفحه به گونه ای است که حداکثر خیز قبل از پایان برخورد روی می دهد. در واقع با وجود نیروهای کششی اولیه زمان حداکثر خیز صفحه از زمان برخورد کمتر می شود.

۵- با بررسی صفحات چند لایه و لایه چینی آنها مشاهده می شود که وجود الیاف در راستای اعمال نیروهای اولیه باعث کاهش اثرات در رفتار صفحات می شود.

۶- با توجه به درصد خطای ناچیز نتایج مدل حاضر با نتایج حل عددی و تجربی، می توان با تقریب بسیار خوبی مدل حاضر را در آنالیز صفحات تحت ضربه به کار برد.

۸- فهرست علائم

پارامتر هرتز - اسوکلو برای تماس	K
سرعت ضربه زننده	v_s
جرم ضربه زننده	m_s
دانسیتته ماده صفحه	ρ
نیروی ضربه عرضی وابسته به زمان	$f(x, y, t)$
ضخامت صفحه	h
نیروی اولیه وارد بر صفحه در جهت الیاف	N_x
نیروی اولیه وارد بر صفحه در جهت عمود بر الیاف	N_y
خیز سطح میانی صفحه	$w_0(x, y, t)$
نیم محورهای اصلی منطقه بیضی تماس	b و a
شعاع ضربه زننده	r_s
حداکثر خیز صفحه	W_{0max}
حداکثر زمان ضربه یا برخورد	T_{max}
حداکثر نیروی ضربه یا برخورد	F_{max}
سفتی های خمشی صفحه به ترتیب در امتداد و عمود بر جهت الیاف	D_{22} و D_{11}
$D_3 = D_{12} + 2D_{66}$ سفتی موثر صفحه	
کوپل خمشی - پیچشی	D_{26} و D_{16}
مدول ارتجاعی صفحه کامپوزیت در جهات مختلف	E_i
نسبت های پواسون صفحه کامپوزیت	ν_{ij}
مدول های برشی صفحه کامپوزیت	G_{ij}
مدول ارتجاعی ماده هم سانگرد	E
نسبت پواسون ماده هم سانگرد	ν

۷- نتیجه

در تحقیق حاضر به روش تحلیلی و با به کارگیری تئوری تماس اسوکلو در برخورد الاستیک اجسام غیر ایزوتروپیک، معادلات حاکم در آنالیز خیز صفحات کامپوزیتی الیافی با وجود نیروهای کششی و فشاری اولیه تحت بارهای ضربه عرضی به دست آمده و از حل آنها نتایج زیر حاصل شده است:

۱- با در نظر گرفتن نیروهای کششی مساری و به صورت های تک محوری و دو محوری بر صفحه کامپوزیتی، نتیجه جالبی حاصل می شود که عمده تاثیرات در کاهش یا افزایش پارامترهای مربوط به ضربه به واسطه اعمال نیروهای کششی اولیه در جهتی است که صفحه مقاومت کمتری دارد. به نظر می رسد که این نیروها باعث افزایش سفتی صفحه در امتداد اعمال نیروها می شوند.

۲- در بررسی تاثیر نیروهای فشاری به صورت تک محوری و دو محوری بر روی عکس العمل صفحه کامپوزیتی در مقابل ضربه مشخص شد که این نیروها برخلاف نیروهای کششی باعث کاهش نیروی برخورد و زمان نیروی حداکثر می شوند و خیز مرکزی صفحه را همان طور که انتظار می رفت، افزایش می دهند. در بررسی اثر نیروهای تک محوری یا دو محوری نتیجه ای مشابه با نیروهای کششی حاصل می شود که در این حالت نیز تاثیر نیروها در جهت مقاومت کم صفحه از تاثیر این نیروها در جهتی که صفحه مقاومت بیشتری دارد، بر روی رفتار صفحه در مقابل ضربه بیشتر است.

۳- تاثیر نیروهای دو محوری بیشتر از نیروهای تک محوری است.

جدول (۱): اثر لایه چینی های مختلف صفحه بر روی پارامترهای مختلف

نیروهای اولیه	پارامترهای محاسبه شده	صفحه نوع اول	صفحه نوع دوم	صفحه نوع سوم	صفحه نوع چهارم
$N_x = N_y = 0$ (kN/m)	F_{max} (N)	329.19	407.37	375.38	383.29
	T_{max} (μS)	402.532	241.85	298.77	280.33
	W_0_{max} (μm)	223.62	167.73	186.20	181.16
$N_x = N_y = 300$ (kN/m)	F_{max} (N)	353.23	424.2	402.26	402.58
	% ΔT_{max}	7.3	4.13	7.1	5.32
	T_{max} (μS)	242.62	217.12	224.16	225.37
	% ΔW_{max}	-39.73	-10.22	-24.97	-19.6
	W_0_{max} (μm)	152.054	132.95	132.76	138.10
$N_y = 300$ (kN/m)	% ΔW_{0max}	-32	-20.73	-28.7	-23.76
	F_{max} (N)	347.44	414.22	389.26	394.21
	% ΔF_{max}	5.54	1.68	3.7	2.85
	T_{max} (μS)	250.89	230.86	235.095	236.36
	% ΔT_{max}	-37.69	-4.54	-21.31	-15.68
	W_0_{max} (μm)	161.72	144.36	149.95	149.88
$N_x = 300$ (kN/m)	% ΔW_{0max}	-27.68	-13.93	-19.46	-17.27
	F_{max} (N)	334.12	415.96	381.64	389.26
	% ΔF_{max}	1.5	2.1	1.67	1.56
	T_{max} (μS)	339.11	225.36	270.63	255.6
	% ΔT_{max}	-15.75	-6.81	-9.41	-8.82
	W_0_{max} (μm)	191.91	147.75	163.65	158.49
	% ΔW_{0max}	-14.18	-11.91	-12.11	-12.51

۹- مراجع

- [۱] خلیلی، سید محمدرضا؛ آنالیز ضربه عرضی یک جسم متحرک بر روی صفحه ارتوتروپیک و بررسی بعضی از پارامترهای موثر در آن، مجله علمی و پژوهشی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شماره ۵۰، ص ۲۹۵ تا ۳۰۶، بهار ۱۳۸۱
- [۲] خلیلی، سید محمدرضا؛ محمدپناه، ناصح، "آنالیز ضربه بر روی صفحات کامپوزیتی در حضور تنش های اولیه"، مجموعه مقالات دهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، جلد چهارم، ص ۲۲۲۳ تا ۲۲۳۰، خرداد ۱۳۸۱
- [۳] Sun, C.T.; Chen, J.K.; "On the Impact of Initially Stressed Composite Laminates", JI. of Composite Materials, Vol. 19, pp 490-504, 1985
- [۴] Sun, C.T.; Chattopadhyay, S.; "Dynamic Response of Anisotropic Laminated Plates Under Initial Stress to Impact of A Mass", JI. of Applied Mechanics, Vol. 42, pp 693-698, 1975
- [۵] Dobyns, A.L.; "Analysis of Simply Supported Orthotropic Plates", JI. of AIAA, Vol 19, pp 642-650, 1981
- [۶] Robb, M.D.; Arnold, W.S.; Marshal, I.H.; "The Damage Tolerance of GRP Laminates Under Uniaxial Pre-Stresses", JI. of Composite Structures, Vol. 32, pp 141-149, 1995
- [۷] محمدپناه، ناصح، آنالیز ضربه بر روی صفحات کامپوزیت با حضور تنش های اولیه، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، بهار ۱۳۸۱
- [۸] Sveklo, V.A.; "Hertz Problem of Compression of Anisotropic Bodies", JI. of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 38, 1023-1027, 1974
- [۹] Khalili, M.R.; "Analysis of The Dynamic Response of Large Orthotropic Elastic Plates to Transverse Impact and Its Application to Fibre Reinforced Plates", Ph.D. Thesis, I.I.T. Delhi, May, 1992
- [۱۰] Mittal, R.K.; Khalili, M.R.; "Dynamic Response of Composite Plates Subjected to Moving Body", JI. of AIAA, Vol. 32, 850-858, 1994
- [۱۱] Sneddon, I.N.; "Fourier Transform", Mc-Graw Hill, New York, 1951