

TO INVESTIGATE THE EFFECTIVE PARAMETERS ON THE BUCKLING RESISTANCE OF LAMINATED COMPOSITE FRP PLATES WITH AND WITHOUT HOLES

F. Shahabian

F. Shahabian, PhD, Civil Engineering Department,
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of
Mashhad, fshahabianm@yahoo.com.

A. Mejrissazan-Toosi

Amir Mejrissazan Toosi, MSc, Structural Engineer,
amejrissazant@yahoo.com.

Abstract: In recent years, composite materials have been widely used in the engineering structures due to light weight, high strength and corrosion resistance. In this paper, the buckling behavior of laminated composite FRP plates has been studied due to the important role of them as a major part of composite structures. The composite plates have been modeled as symmetric and anti-symmetric angle-ply orthotropic laminated plates as either simple or fixed boundary conditions, to carry out the buckling analysis. ANSYS finite element software has been used for structural analysis to investigate the effective parameters like as aspect ratio, boundary conditions and fiber orientation of the lamina on the buckling resistance of laminates. Also, the best direction of layers for optimum strength of laminates has been determined. To demonstrate the effect of holes on buckling resistance of laminates, the results of numerical analysis of plates with and without holes for different ratio of hole diameter to the plate width has been compared and the amount of buckling strength reduction has been determined.

بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت گمانشی صفحات چند لایه مرکب FRP با و بدون سوراخ

فرزاد شهابیان و امیر مجری سازان طوسی

چکیده: در سالهای اخیر استفاده از مواد مرکب در سازه‌ها به علت سبکی، مقاومت بالا و عملکرد مناسب در برابر خوردگی رایج گردیده است. در این مقاله رفتار گمانشی صفحات چند لایه FRP به عنوان یک جزء مهم تشکیل دهنده سازه‌های مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار، صفحات فوق به صورت صفحات اورتوتروپیک چندلایه متقارن و غیرمتقارن با شرایط مرزی ساده و یا گیردار مدل شده است. سپس با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ANSYS به بررسی عوامل مؤثر از جمله نسبت اضلاع، شرایط مرزی و جهت گیری مختلف الیاف بر مقاومت گمانشی این صفحات پرداخته شده و با توجه به اهمیت نحوه قرارگیری لایه‌ها مقدار بهینه جهت آنها نسبت به یکدیگر مشخص گردیده است. بررسی نتایج نشان می دهد که صفحات چند لایه با شرایط مرزی ساده و گیردار در نسبت ضلع ۰/۵، دارای بیشترین مقاومت در برابر گمانش بوده و با افزایش نسبت اضلاع، زاویه بهینه مربوط به جهت گیری الیاف به سمت ۴۵ درجه میل می کند. در این مقاله، همچنین اثر سوراخ بر روی مقاومت گمانشی صفحات چند لایه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار نتایج تحلیل صفحات با و بدون سوراخ برای نسبت‌های مختلف قطر سوراخ به عرض صفحه با یکدیگر مقایسه شده و مقدار

تاریخ وصول: ۸۵/۵/۲۲

تاریخ تصویب: ۸۷/۱۱/۱۹

دکتر فرزاد شهابیان، دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، fshahabiabnm@yahoo.com
امیر مجری سازان طوسی، کارشناس ارشد سازه، از دانشگاه فردوسی مشهد، amejrissazant@yahoo.com

کاهش مقاومت در هر مورد تعیین گردیده است. از جمله می توان به کاهش ۵۲ درصدی مقاومت صفحات چند لایه با شرایط مرزی گیردار و با زاویه الیاف ۸۰ درجه در اثر وجود سوراخی با قطری برابر با ۲۰ درصد عرض صفحه، اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: کماتش صفحات، صفحات مرکب FRP، صفحات چند لایه، صفحات سوراخدار.

۱. مقدمه

مواد مرکب به سبب دارا بودن خواص مکانیکی مناسب از قبیل وزن سبک، مقاومت بالا، رسانایی پایین حرارتی و الکتریکی و استحکام در برابر خوردگی در مقایسه با مواد ساده، کاربرد وسیعی در طراحی و ساخت سازه‌ها پیدا کرده است. از طرفی سازه‌ها در معرض خطر کماتش قرار دارند و توجه به رفتار صفحات به‌عنوان یکی از پرکاربردترین اجزاء تشکیل‌دهنده سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کماتش صفحات بیشتر از یک قرن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. راه‌حل‌های دقیق و تقریبی برای صفحات نازک ایزوتروپیک با رفتار کشسان وجود دارد که بسیاری از آنها توسط تیموشنکو [۱] بررسی و گردآوری شده است.

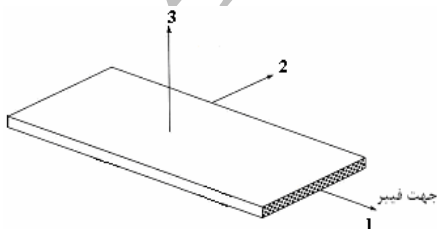
خواص مکانیکی مصالح مرکب معمولاً ارتوتروپیک در نظر گرفته می‌شود. اولین تحقیق درباره پایداری یک صفحه ارتوتروپیک با یک لبه آزاد توسط مارچ و تراپر (March, Trayer) با استفاده از روش انرژی در سال ۱۹۳۱ انجام گرفت [۲]. اشتن و وادویس (Ashton, Waddoups) با بکارگیری روش تقریبی رایلی ریتز، راه حل‌های تعیین بار کماتش صفحات مستطیلی را ارائه کردند [۳]. اشتن و ویتنی (Ashton, Whitney) بار کماتش تقریبی را برای صفحات چندلایه پیشنهاد نمودند. آنها از فن تبدیل صفحات چندلایه به یک صفحه معادل استفاده کردند [۴]. بائو، رابرت و جیانگ (Jiang, Bao, Robert) با استفاده از روش اجزای محدود، کماتش صفحات مستطیلی ارتوتروپیک را مورد بررسی قرار دادند [۵].

ورس و کولار (Veres, Kollar) روابط تقریبی را برای محاسبه بار کماتش صفحات مستطیلی ارتوتروپیک با لبه‌های گیردار و ساده پیشنهاد کردند که در مقایسه با راه‌حل‌های نسبتاً دقیق بدست آمده توسط ویتنی بار کماتش را در حدود ۸ درصد، بالاتر تخمین می‌زد [۶]. خدیر (Khdeir) پایداری صفحات چند لایه غیر متقارن را بررسی کرد. خدیر راه حل عمومیت داده شده لوی را به منظور تعیین بارهای کماتش صفحات مستطیل شکل بکار برد. او تاثیر تعداد لایه‌ها، جهت‌گیری لایه‌ها و نوع شرایط مرزی را بر روی بار کماتش صفحات مرکب، بررسی کرد [۷]. پاندی و شربون (Pandey, Sherboune) با استفاده از روش‌های انرژی، کماتش صفحات چند لایه متقارن را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. از نتایج این محاسبات می‌توان به تعیین زاویه بهینه جهت لایه‌ها برای کسب مقاومت کماتش بیشتر اشاره کرد [۸]. چن (Chen) کماتش صفحات چند لایه غیر متقارن را با استفاده از روش انرژی مورد بررسی قرار داد. وی تاثیرات جهت‌گیری لایه‌ها، نسبت اضلاع و

شرایط مرزی مختلف را بر روی تغییر مدهای کماتش در نظر گرفت [۹]. هدف اصلی این مقاله، بررسی رفتار کماتشی صفحات تشکیل‌دهنده اجزای سازه‌های مرکب تحت تنش‌های فشاری می‌باشد. برای این کار، صفحات فوق به صورت صفحات ارتوتروپیک چند لایه متقارن و غیر متقارن با شرایط مرزی ساده و یا گیردار در نظر گرفته شده است. آن‌گاه با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ANSYS به بررسی عوامل موثر بر مقاومت کماتشی این صفحات از جمله نسبت اضلاع، شرایط مرزی، جهت‌گیری الیاف و همچنین وجود سوراخ پرداخته شده است. در این پژوهش نظر به گسترش کاربرد مواد مرکب FRP در مهندسی سازه، جنس مواد مورد بررسی از همین نوع انتخاب شده است.

۲. خواص مکانیکی مواد مرکب

یک لایه از مواد مرکب لامینا نام دارد. میکرومکانیک علم مطالعه و شناخت خواص مکانیکی لامینا بر پایه خصوصیات اجزای سازنده‌اش می‌باشد. یک لامینا شامل دو جزء است: الیاف و رزین. لامینا در واقع یک ماده ناهمگن است، درحالی‌که میکرومکانیک، لامیناها را به عنوان یک ماده همگن ارتوتروپیک فرض می‌کند. برای توصیف خواص مکانیکی مواد ارتوتروپیک، شناخت چهار عامل مورد نیاز است. ضریب کشسان در جهت الیاف (E_1)، ضریب کشسان عمود بر جهت الیاف (E_2)، مدول برشی (G_{12}) و ضریب پواسون (ν_{12}). شکل (۱) نشان‌دهنده یک لامینا می‌باشد که در آن جهت الیاف با عدد (۱) و جهت عمود بر آنها با عددهای (۲) و (۳) نشان داده شده است. با استفاده از خصوصیات هر لامینا (که از اتصال آنها به یکدیگر یک لمینیت ساخته می‌شود) می‌توان مشخصات لازم برای تحلیل یک لمینیت را بدست آورد.



شکل ۱. محورهای اصلی یک لامینا

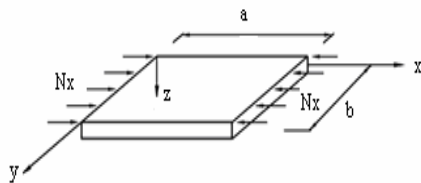
با آگاهی از خصوصیات مکانیکی اجزای یک لامینا، می‌توان با استفاده از میکرومکانیک، خواص آن را پیش‌بینی نمود. با مشاهده کردن شکل (۲) بهتر می‌توان علم میکرومکانیک را حس کرد. ضریب

۳. کمانش صفحات چند لایه FRP

کمانش صفحات چندلایه FRP یک موضوع پیچیده است و روابط پیشنهاد شده، فقط برای حالت‌های خاصی از این صفحات قابل استفاده هستند. یکی از روابط ارائه شده مربوط به صفحات ارتوتروپیک با تکیه‌گاه‌های ساده است (شکل (۵)). بار کمانشی برای لمینیت فوق‌الذکر با شرایط تکیه گاهی ساده توسط رابطه زیر تعیین می‌گردد [۱۰]:

$$(N_x)_{cr} = \frac{\pi^2 D_{22}}{b^2} \quad (1)$$

$$\left[m^2 \frac{D_{11}}{D_{22}} \left(\frac{b}{a} \right)^2 + 2 \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} + \frac{1}{m^2} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]$$



شکل ۵. یک صفحه تحت اثر نیروهای فشاری

که در آن a و b طول و عرض صفحه و m تعداد نیم موج‌ها در راستای x می‌باشد. D_{ij} ها اعضای ماتریس سختی خمشی هستند که لنگرهای داخلی را به انحنا صفحه میانی مربوط می‌سازد (رابطه (۲)). در این رابطه (\bar{Q}_{ij}) ماتریس ضرایب تنش-کرنش و z فاصله لامینا تا میان صفحه می‌باشد (شکل (۴)).

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (2)$$

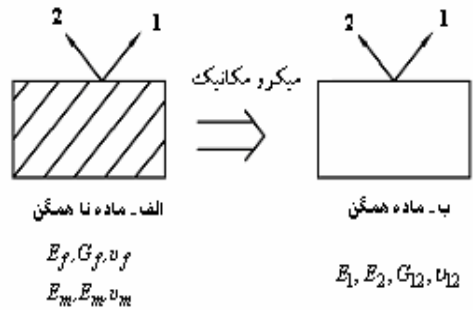
۴. محاسبه بار کمانشی صفحات با استفاده از نرم افزار

ANSYS

رابطه سازی کمانش صفحات مرکب چند لایه منجر به برپایی معادلات دیفرانسیلی خواهد شد که حل مستقیم آنها بسیار مشکل است. به جای این کار می‌توان از روش اجزای محدود استفاده کرد به همین دلیل در این مقاله از نرم افزار اجزای محدود ANSYS [۱۱] استفاده شده است.

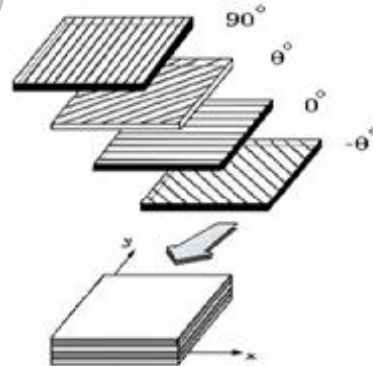
برای این کار، صفحات فوق به صورت صفحات ارتوتروپیک چند لایه متقارن و غیرمتقارن با شرایط مرزی ساده (SSSS) و یا گیردار

کشسان، مدول برشی و ضریب پواسون برای الیاف (بازیر نویس f) و برای رزین (بازیر نویس m) مشخص شده است.



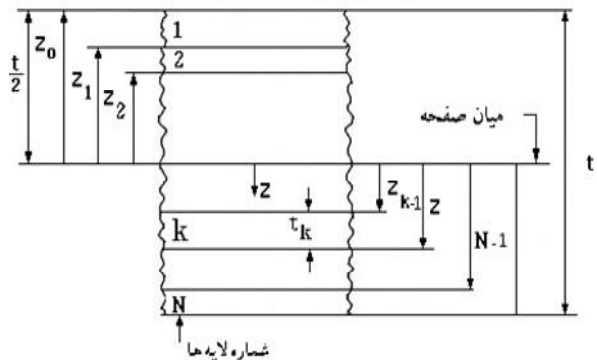
شکل ۲. پروسه میکرو مکانیک

یک لمینیت از تعدادی لامینای متصل به یکدیگر تشکیل شده است که با هم صفحه‌ای دارای سختی و ضخامت مطلوب می‌سازند. لامیناها بر اساس روش از پیش تعیین شده و با توجه به نیاز مورد نظر، روی هم قرار می‌گیرند. در مرحله ساخت، لامیناها توسط موادی نظیر رزین، به یکدیگر متصل می‌گردند. لامیناها ممکن است دارای جهات مختلفی باشند، منظور از جهت لامینا همان جهت الیاف در لامینا است (شکل (۳)).



شکل ۳. لمینیت ساخته شده از چند لامینا

یک لمینیت N لایه در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. نمایش یک لمینیت N لایه

دلیل وجود ضخامت لایه‌های اتصال که بار سازه‌ای را تحمل نمی‌کنند، ۰/۰۵ سانتیمتر از ضخامت صفحات کاسته شد.

چهار نسبت اضلاع ($\frac{a}{b}$) مختلف مورد بررسی قرار گرفت: ۱، ۱/۲، ۱/۵ و ۲. طول (a) مقدار ثابت ۱۵ و عرض (b) بین مقادیر ۱۰، ۷/۵، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتیمتر متغیر بود. جهت الیاف (θ) 0° ، 45° ، 90° ، 135° ، 180° ، 225° ، 270° و 315° بود که در آن θ برابر 0° ، 45° ، 90° ، 135° ، 180° ، 225° ، 270° و 315° در نظر گرفته شد. نمونه نتایج حاصل در جدول‌های (۱) و (۲) با رابطه (۱) مقایسه شده است.

لازم به ذکر است که رابطه (۱) برای نسبت‌های وجوه ۱/۵ و ۲ مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که با $m=2$ بارکمانشی کمتری نسبت به $m=1$ بدست می‌آید که مطابق با جواب ANSYS است. در نتیجه، به هنگام استفاده از این رابطه لازم است، کمترین مقدار (N_x)_{cr} برای m ‌های گوناگون مشخص شود، زیرا این مقدار با مقادیر مختلف نسبت اضلاع ($\frac{a}{b}$) تغییر می‌کند.

حداکثر مقاومت کمانشی لمینیت‌های دارای ضخامت ۰/۵۸ سانتیمتر با نسبت‌های اضلاع ۱، ۱/۲ و ۱/۵ برای الیاف در جهت $(0^\circ/90^\circ)$ ، $(45^\circ/135^\circ)$ ، $(90^\circ/0^\circ)$ ، $(135^\circ/45^\circ)$ ، $(180^\circ/0^\circ)$ ، $(225^\circ/45^\circ)$ ، $(270^\circ/0^\circ)$ و $(315^\circ/45^\circ)$ نسبت اضلاع، بیشترین مقاومت کمانشی را لمینیت‌های دارای جهت $30^\circ/30^\circ$ ، کسب نمودند.

(CCCC) و با استفاده از جزء 99 shell مدل شده است. در این مقاله از الیاف شیشه و رزین پلی استر با مشخصات زیر استفاده شده است:

$$G_f = 29/65 \text{ GPa}, \nu_f = 0/22, E_f = 72/40 \text{ GPa}$$

$$G_m = 1/24 \text{ GPa}, \nu_m = 0/38, E_m = 3/45 \text{ GPa}$$

با توجه به خصوصیات مکانیکی اجزاء تشکیل دهنده لامینا، می‌توان با استفاده از میکرومکانیک، خواص لامینای معادل آن را تعیین کرد. بدین ترتیب:

$$E_1 = 35/16 \text{ GPa}$$

$$E_2 = 6/14 \text{ GPa}, \nu_{12} = 0/3064, G_{12} = 2/23 \text{ GPa}$$

۴-۱. صفحات چند لایه FRP نامتقارن

این نوع لمینیت‌ها دارای جفت لایه‌هایی با جهات نامتقارن مواد نسبت به میان صفحه هستند، اما خصوصیات و ضخامت مواد نسبت به میان صفحه متقارن است.

ضخامت‌های مختلف استفاده شده در این تحلیل، عبارت بودند از: ۰/۵۸، ۰/۹۰ و ۱/۲۲ سانتیمتر. نکته قابل ذکر آن است که صفحات FRP دارای ضخامت ۰/۶۳، ۰/۹۵ و ۱/۲۷ سانتیمتر بودند ولی به

جدول ۱. بار کمانشی لمینیت ($0^\circ/90^\circ$ ، $15^\circ/15^\circ$ ، $15^\circ/45^\circ$ ، $45^\circ/15^\circ$) با شرایط مرزی (SSSS)

a (cm)	$\frac{a}{b}$	t (cm)	بارکمانشی بحرانی (N_x) _{cr} (KN/m) رابطه (۱)	بار کمانشی بحرانی (N_x) _{cr} (KN/m) ANSYS	درصد خطا (%)
۱۵	۱	۰/۵۸	۳۹۲/۴۴	۴۰۷/۶۷	۳/۸
۱۵	۱/۲	۰/۵۸	۵۸۱/۵۷	۶۳۴/۱۰	۶
۱۵	۱/۵	۰/۵۸	۱۰۲۶/۱۹	۱۰۵۸/۰۶	۳/۱
۱۵	۲	۰/۵۸	۱۵۷۰/۲۸	۱۶۹۸/۶۴	۷/۵
۱۵	۱	۰/۹۰	۱۴۴۳/۵۰	۱۵۸۰/۲۶	-۶/۸
۱۵	۱/۲	۰/۹۰	۱۲/۲۱۱	۲۲۵۴/۸۲	۵/۴
۱۵	۱/۵	۰/۹۰	۲۱۳۸/۳۷	۲۱/۳۶۰	-۰/۸
۱۵	۲	۰/۹۰	۵۷۷۳/۹۹	۳۷۴۰/۵۲	-۰/۹
۱۵	۱	۱/۲۲	۳۵۶۸/۲۰	۲۱/۵۰۶	۵/۵
۱۵	۱/۲	۱/۲۲	۵۲۸۶/۱۱	۳۷۶۶/۰۹	۱/۱
۱۵	۱/۵	۱/۲۲	۹۳۲۶/۰۸	۸۸۴۸/۳۶	-۵/۱
۱۵	۲	۱/۲۲	۱۴۲۲۲/۹۹	۱۳۲۶۸/۵۲	-۷

جدول ۲. بار کمانشی لمینیت (۰/۹۰/+۴۵/-۴۵/+۴۵/-۴۵/۰/۹۰) با شرایط مرزی (SSSS)

a (cm)	a/b	t (cm)	بار کمانشی بحرانی (N _x) _{cr} (KN/m) رابطه (۱)	بار کمانشی بحرانی (N _x) _{cr} (KN/m) ANSYS	درصد خطا (%)
۱۵	۱	۰/۵۸	۴۱۱/۷۰	۴۲۹/۰۴	۴/۲
۱۵	۱/۲	۰/۵۸	۶۲۰/۴۴	۶۹۵/۲۲	۳/۵
۱۵	۱/۵	۰/۵۸	۱۰۵۲/۲۸	۱۱۰۳/۲۴	۴/۸
۱۵	۲	۰/۵۸	۱۶۴۷/۱۶	۱۷۹۱/۲۸	۸/۷
۱۵	۱	۰/۹۰	۱۵۱۴/۴۲	۱۶۶۰/۲۹	۸/۴
۱۵	۱/۲	۰/۹۰	۲۲۸۱/۶۱	۲۴۶۰/۴۱	۷/۸
۱۵	۱/۵	۰/۹۰	۳۸۰۶/۳۶	۳۹۱۱/۴۴	۲/۷
۱۵	۲	۰/۹۰	۶۰۵۸/۰۳	۶۲۰۸/۲۸	۲/۴
۱۵	۱	۱/۲۲	۳۷۴۳/۸۵	۴۰۲۳/۱۶	۷/۴
۱۵	۱/۲	۱/۲۲	۵۶۴۰/۳۸	۵۹۰۱/۴۸	۴/۶
۱۵	۱/۵	۱/۲۲	۹۴۰۹/۴۴	۹۱۰۳/۱۶	-۳/۲
۱۵	۲	۱/۲۲	۱۴۹۷۵/۵۷	۱۴۲۰۸/۰۲	-۵/۱

۴-۲. صفحات FRP متقارن

یک لمینیت متقارن نوعی لمینیت است که لایه‌های آن با ضخامت و خصوصیت و جهت الیاف یکسان به طور قرینه با توجه به مرکز سطح لمینیت قرار داده شده‌اند. صفحات تحلیل شده دارای جهت برابر $[\pm\theta]_{2s} = [+ \theta / - \theta / + \theta / - \theta / + \theta / - \theta / + \theta]$ بود که در آن θ برابر ۰، ۱۰، ۳۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شد و با شرایط مرزی ساده و گیردار مورد تحلیل قرار گرفتند. رزینی که برای این تحلیل در نظر گرفته شد از نوع اپوکسی و الیاف از نوع شیشه با خصوصیات زیر بودند.

$$E_2 = 11 \text{ GPa}, U_{12} = 0.25, G_{12} = 4.48 \text{ GPa},$$

$$E_1 = 128 \text{ GPa}$$

ضخامت مجموع لایه‌ها برابر ۰/۶ میلی‌متر، طول صفحه (a) برابر ۱۰، ۵ و ۴۰ سانتی‌متر و عرض صفحه (b) ۱۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. در مجموع، ۶۰ صفحه متقارن FRP با نسبت اضلاع ($\frac{a}{b}$) برابر ۰/۵، ۱ و ۴ با دو شرایط مرزی ساده و گیردار، مورد تحلیل قرار گرفتند. و نتایج با نتایج هو و تی زنگ (Hu, Tzang) که همین صفحات را با روشهای دیگر بررسی و با روش رایلی ریتز مقایسه کرده و خطای بسیار کمی داشته‌اند، مقایسه گردید [۱۲].

نتایج در شکل (۸) برای شرایط مرزی ساده و در شکل (۹) برای شرایط مرزی گیردار نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در نسبت اضلاع ($\frac{a}{b} = 0.5$)، لمینیت‌های با شرایط مرزی ساده و گیردار دارای بیشترین مقاومت در برابر کمانش هستند و با افزایش نسبت اضلاع، زاویه بهینه به سمت ($\pm 45^\circ$) در هر دو شرایط مرزی ساده و گیردار سوق خواهد یافت.

هنگامی که صفحات چند لایه FRP کمانش می‌کنند، شماره مد کمانشی آنها مشخص نیست. به عبارت دیگر با تغییر نسبت اضلاع ($\frac{a}{b}$)، شماره مد کمانشی تعیین کننده بار بحرانی، تغییر می‌کند. در این پژوهش با انجام تحلیل‌های مکرر، نمودارهایی رسم شد که با استفاده از آنها بتوان با توجه به نسبت اضلاع صفحه، مد کمانشی را تعیین نمود. برای این کار از رابطه (۳) استفاده شده است.

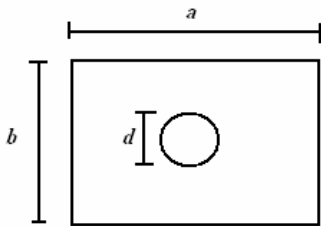
$$\bar{N}_x = \frac{(N_x)_{cr} b^2}{\pi^2 D_{22}} \quad (3)$$

در این رابطه \bar{N}_x پارامتر بدون بعد کمانشی و $(N_x)_{cr}$ بار کمانشی محاسبه شده است. به عنوان نمونه شکل‌های (۶) و (۷) پدیده تغییر مد کمانشی را برای لمینیت‌های (۰/۹۰/-۱۵/+۱۵/-۱۵/+۱۵/۰/۹۰) و (۰/۹۰/+۱۵/-۱۵/+۱۵/-۱۵/۰/۹۰) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر مد لمینیت‌های دارای جهت ($15^\circ/-15^\circ$) در نسبت ضلع ۱/۶ رخ داد.

این اتفاق در مورد لمینیت‌های دارای جهت ($45^\circ/-45^\circ$) و در نسبت ضلع ۱/۴ واقع شد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت مد کمانشی FRP‌های (۰/۹۰/+۱۵/-۱۵/+۱۵/-۱۵/۰/۹۰) در نسبت اضلاع ($\frac{a}{b} < 1/6$) و ($\frac{a}{b} < 2/7$) و برای FRP‌های (۰/۹۰/-۴۵/+۴۵/-۴۵/۰/۹۰) در نسبت اضلاع ($\frac{a}{b} < 1/4$) و ($\frac{a}{b} < 2/7$) به ترتیب ۱ و ۲ می‌باشد.

۳-۴. صفحات FRP سوراخدار

در بعضی موارد به دلیل شرایط خاصی از قبیل عبور لوله های تاسیساتی، بازشوها و یا تقویت یک ستون در اطراف تکیه گاه ها، باید از صفحات دارای سوراخ استفاده شود. در این بخش اثرات سوراخ بر روی مقاومت کمانشی صفحات چند لایه FRP که در بخش قبل مورد مطالعه قرار گرفت، بررسی می شود. یعنی صفحات با نسبت اضلاع ۰/۵، ۱ و ۴ و نسبت قطر سوراخ به عرض صفحه $(\frac{d}{b})$ ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ تحلیل شدند (شکل (۱۰)).

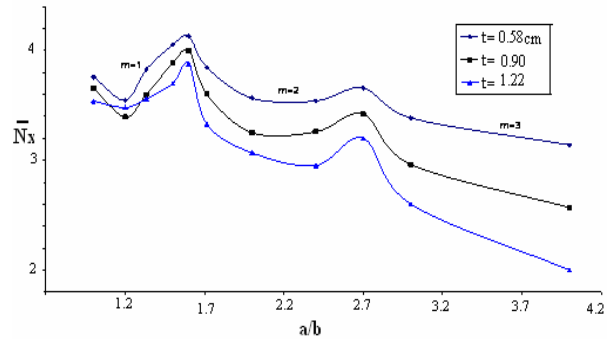


شکل ۱۰. لمینیت سوراخدار

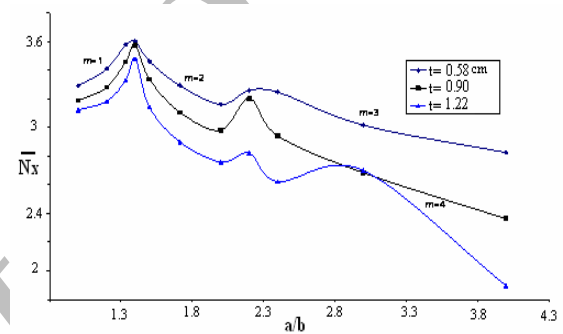
نمونه نتایج حاصل از تحلیل در شکل های (۱۱) تا (۱۴) نشان داده شده است. به طور کلی مشاهده می شود که با افزایش قطر سوراخ، مقاومت کمانشی کاهش پیدا کرده است. در شکل (۱۱)، نتایج مربوط به بار کمانشی مربوط به صفحات با $(\frac{a}{b} = 0.5)$ و شرایط مرزی ساده نشان داده شده است، ملاحظه می شود که میزان کاهش مقاومت در صفحات با $(0^\circ \leq \theta < 40^\circ)$ بیشتر از صفحات با $(40^\circ \leq \theta < 90^\circ)$ می باشد. به طوری که برای صفحات با $(\frac{d}{b})$ ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و $(\theta = 0^\circ)$ مقاومت کمانشی ترتیب ۲۸٪، ۵۱٪ و ۹۴٪ نسبت به صفحات بدون سوراخ کاهش پیدا کرده است و برای صفحات با $(\theta = 90^\circ)$ این کاهش مقاومت به ترتیب برابر با ۲۵٪، ۱۴٪ و ۷۹٪ بوده است. در شکل (۱۲) نتایج مربوط به بار کمانشی مربوط به صفحات با $(\frac{a}{b} = 1)$ و شرایط مرزی ساده نشان داده شده است. ملاحظه می شود که کاهش مقاومت کمانشی برای نسبت های $(\frac{d}{b})$ ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ حدود ۲۱/۵٪، ۳۷٪ و ۷۱/۵٪ نسبت به نمونه های بدون سوراخ خود می باشد.

شکل (۱۳) نتایج حاصل از تحلیل لمینیت های با $(\frac{a}{b} = 0.5)$ و شرایط مرزی گیردار را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد در $(\theta = 0^\circ)$ برای $(\frac{d}{b})$ ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ به ترتیب ۲۹٪، ۴۹٪ و ۹۳/۵٪ کاهش می یابد، ولی با افزایش (θ) ، کاهش مقاومت، کمتر شده، تا اینکه در $(\theta = 80^\circ)$ به ۲٪، ۱۰٪ و ۵۲٪ می رسد.

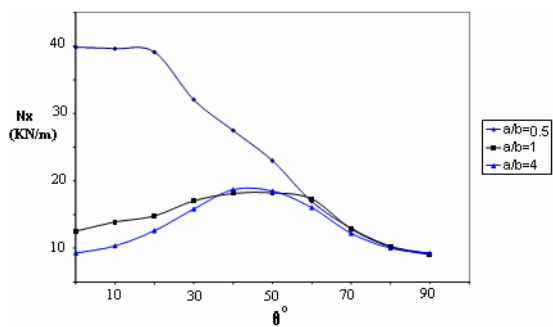
همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می شود، صفحات با $(\frac{a}{b} = 1)$ نیز شرایطی مشابه به شرایط صفحات با نسبت ضلع ۰/۵ دارند با این



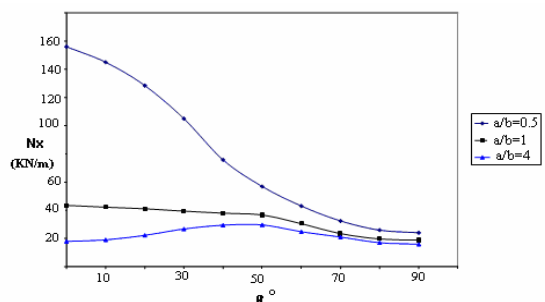
شکل ۶. نمودار کمیت بدون بعد بار کمانشی برای لمینیت های $(0.90/0.15/-15/+15/-15/+15/0.90)$ با شرایط مرزی (SSSS)



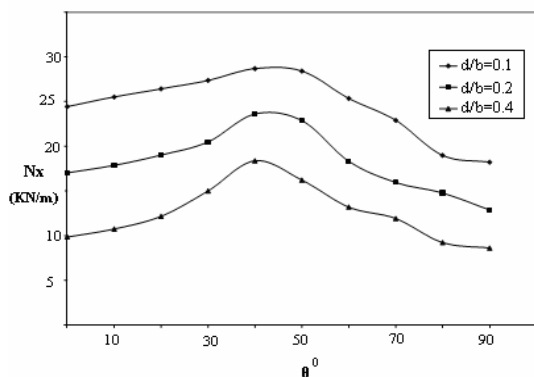
شکل ۷. نمودار کمیت بدون بعد بار کمانشی برای لمینیت های $(0.90/0.45/-45/+45/-45/0.90)$ با شرایط مرزی (SSSS)



شکل ۸. نمودار بار کمانشی لمینیت $[\pm\theta]_{2s}$ با شرایط مرزی (SSSS)



شکل ۹. نمودار بار کمانشی لمینیت $[\pm\theta]_{2s}$ با شرایط مرزی (CCCC)



شکل ۱۴. نمودار مقاومت کمانشی لمینیت‌های سوراخدار با شرایط مرزی (CCCC) ($\frac{a}{b} = 1$)

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار کمانشی صفحات چند لایه مرکب FRP با شرایط مرزی ساده و گیردار مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. برای این کار با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ANSYS، عوامل مؤثر بر مقاومت کمانشی این صفحات از جمله نسبت اضلاع، شرایط مرزی، جهت الیاف و وجود سوراخ مورد توجه قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل عبارتند از:

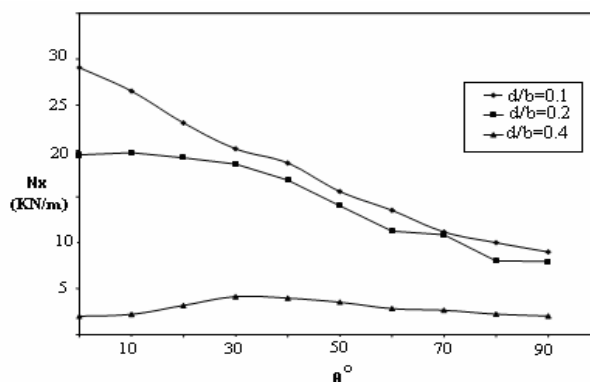
۱- حداکثر مقاومت کمانشی لمینیت‌های دارای ضخامت ۰/۵۸ سانتیمتر با نسبت‌های اضلاع ۱، ۱/۲ و ۱/۵ برای الیاف در جهت $(0/90/+45/-45/+45/0/90)$ رخ داد. ولی با افزایش ضخامت و نسبت اضلاع، بیشترین مقاومت کمانشی را لمینیت‌های دارای جهت $(+30/-30)$ کسب نمودند.

۲- نتایج تحلیل نشان داد که با تغییر نسبت اضلاع، شماره مد کمانشی تعیین‌کننده بار بحرانی، تغییر می‌کند از جمله، مد کمانشی FRP های $(0/90/+15/-15/+15/-15/0/90)$ در نسبت اضلاع $(\frac{a}{b} < 1/6)$ و $(\frac{a}{b} < 2/7)$ و برای FRP های $(45/0/90/-45/0/90/+45/-45/+45/0/90)$ در نسبت اضلاع $(\frac{a}{b} < 1/4)$ و $(\frac{a}{b} < 2/2)$ و $(\frac{a}{b} < 1/4)$ به ترتیب ۱ و ۲ می‌باشد.

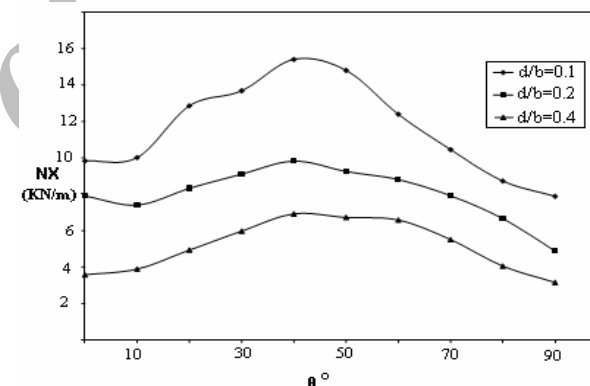
۳- پس از بررسی نتایج مشاهده شد که لمینیت‌های با شرایط مرزی ساده و گیردار در نسبت ضلع ۰/۵ دارای بیشترین مقاومت در برابر کمانش بودند و با افزایش نسبت اضلاع، زاویه بهینه به سمت ۴۵ میل کرد.

۴- میزان کاهش مقاومت در صفحات دارای سوراخ با شرایط مرزی ساده و $(0 < \theta < 40)$ بیشتر از سایر صفحات بود. مقاومت کمانشی صفحات با نسبت اضلاع ۰/۵ برای $(\frac{d}{b})$ برابر با ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ در $(\theta = 0)$ مقدار ۲۸٪، ۵۱٪ و ۹۴٪ نسبت به صفحات بدون سوراخ کاهش پیدا کرد، در حالی که برای صفحات با $(\theta = 90)$ این کاهش مقاومت به ترتیب برابر با ۲/۵٪، ۱۴٪ و ۷۹٪ بود.

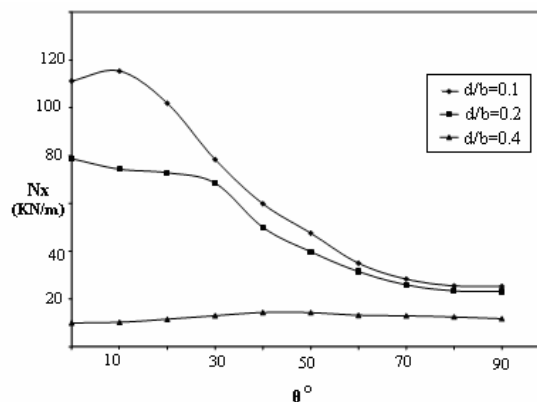
تفاوت که میزان کاهش مقاومت آنها کمتر است. کاهش مقاومت این صفحات در $(\theta = 0)$ برای $(\frac{d}{b})$ ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴، به ترتیب ۴۳/۸٪، ۶۰/۹٪ و ۷۷٪ و برای $(\theta = 90)$ ، ۳٪، ۳۲٪ و ۵۴٪ نسبت به صفحات بدون سوراخ می‌باشند.



شکل ۱۱. نمودار مقاومت کمانشی لمینیت‌های سوراخدار با شرایط مرزی (SSSS) و $(\frac{a}{b} = 0/5)$



شکل ۱۲. نمودار مقاومت کمانشی برای لمینیت‌های سوراخدار با $(\frac{a}{b} = 1)$ و شرایط مرزی (SSSS)



شکل ۱۳. نمودار مقاومت کمانشی لمینیت سوراخدار با شرایط مرزی (CCCC) $(\frac{a}{b} = 0/5)$

۵- میزان کاهش مقاومت در صفحات دارای سوراخ با شرایط مرزی گیردار در $\theta=0^\circ$ برای $(\frac{d}{b})$ (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۴۹ و ۰/۹۳/۵) بود، ولی با افزایش θ کاهش مقاومت کمتر شد. تا اینکه در $(\theta=80^\circ)$ به ۰/۲، ۰/۱۰ و ۰/۵۲ رسید و صفحات دارای $(\theta=10^\circ)$ با $(\frac{a}{b}=0/1)$ و $(\theta=45^\circ)$ با $(\frac{d}{b}=0/4)$ حداکثر مقاومت را در برابر کمانش از خود نشان دادند.

مراجع

- [1] Timoshenko, S.P., "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill, New York, 1961.
- [2] Barbero, E.I., "Introduction to Composite Material Design", Taylor & Francis, Philadelphia, PA, 1998.
- [3] Ashton, J.E., Waddoups, M.E., "Analysis of Anisotropic Plates", Journal of Composite Materials, Vol. 3, 1969, pp. 148 -165.
- [4] Ashton, J.E., Whitney, J.M., "Theory of Laminated Plates", Technomic, Stamford, Con., 1970.
- [5] Bao, G., Jing, W., Robert, J.C., "Analytic and Finite Element Solution for Bending and Buckling of Orthotropic Rectangular Plate"s, Journal of Solid Structures, Vol. 34, No. 14, 1997, pp. 1797 – 1822.
- [6] Veres, I.A., Kollar, L.P., "Buckling of Rectangular Orthotropic Plates Subjected to Biaxial Normal Forces", Journal of Composite Materials, Vol. 35, No. 7, 2001, pp. 625 - 635.
- [7] Khدير, A.A., "Stability of Antisymmetric Angle-Ply Laminated Plate"s, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 115, No. 5, 1989, pp. 952 – 963.
- [8] Pandey, M.D, Sherbourne, A.N., "Buckling of Anisotropic Composite Plates Under Stress Gradient", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 117, No. 2, 1991, pp. 260-275.
- [9] Chen, W., "Buckling Mode Chang of Antisymmetric Angle - Ply Laminate"s, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 12, No. 3, 1994, pp. 661 - 669.
- [10] Jones, R.M., "Mechanics of Composite Material", Taylor & Francis, Philadelphia, PA, 1994.
- [۱۱] جاھدمطلق، ح.، نوبان، م. و اشراقی، م.، اجزاء محدود ANSYS انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.
- [12] Hu, H.T, Tzeng, W.L, "Buckling Analysis of Skew Laminate Plates Subjected to Uniaxial Inplan Loads", Thin-Walled Structures, Vol. 38, 2000, pp. 53- 77.