

# مطالعه کمانش پانل‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با حضور و بدون حضور

## گشودگی به روش‌های تجربی و عددی

علی مظفری<sup>۱</sup>، مهناز ذاکری<sup>۲</sup>، محمدامین کتیرایی<sup>۳</sup> و تقی شجاعی<sup>۴</sup>

دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۲۰)

### چکیده

در این مقاله، تأثیر اندازه گشودگی دایروی، جهت الیاف و اندازه‌ی لبه تقویت‌کننده بر روی رفتار کمانشی صفحات کامپوزیتی به صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود. نمونه‌ها دارای شرایط مرزی گیردار در لبه‌های L شکل و آزاد در دو لبه‌ی دیگر می‌باشند. در بخش تجربی، نمونه‌های L شکل شیشه-اپوکسی در حضور و عدم حضور گشودگی دایروی در سه لایه‌چینی مختلف تحت بارگذاری فشاری تک‌محوره قرار می‌گیرند و نیروهای کمانش و شکست آنها تعیین می‌گردند. در بخش دوم، تأثیر تغییر اندازه‌ی لبه تقویت‌کننده و اندازه گشودگی دایروی بر بار کمانش صفحات کامپوزیتی در چهار لایه‌چینی مختلف با همان خصوصیات مواد در قسمت تجربی، به روش حل عددی (انسیس ۱۰) بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع بهینه‌ای برای لبه تقویت‌کننده در شرایط مختلف وجود دارد که افزایش آن، تنها منجر به افزایش وزن و هزینه شده و تأثیر چشم‌گیری بر بار کمانش ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** بار کمانش، شیشه اپوکسی، چندلایه کامپوزیتی، گشودگی دایروی

## Study of Stiffened Composite Panels Buckling With and Without Cutouts by Experimental and Numerical Methods

A. Mozaffari, M. Zakeri, M.A. Katirae and T. Shojae

Aerospace Engineering Department

K.N. Toosi University of Technology

(Received: 7/July/2014; Accepted: 11/November/2014)

### ABSTRACT

In this article the effect of circular cutout size, fiber orientation, and reinforcer edge size on buckling behavior of composite plates is investigated by experimental and numerical. Samples have clamped boundary conditions on L-shaped edges and free on other two sides. In the experimental method, the E-glass/epoxy L-shaped samples with and without circular cutout is applied in three different lay-up under uni-axial compression. Then the buckling and failure loads will be recognized. In the second method, according to numerical method (Ansys 10), the effect of reinforcer edge size changing and size of circular cutout on composite plate buckling in four different lay-ups with the same experimental materials properties is investigated. The results show that there is the optimum height for reinforcer edge during different conditions that increasing this size just causes the extra weight and cost and does not have a good effect on buckling load.

**Keywords:** Buckling Load, E-Glass/Epoxy, Composite Laminate, Circular Cutout

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): mozaffari@kntu.ac.ir

۲- استادیار: m\_zakeri@iust.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری: amin.katirae@gmail.com

۴- دانشجوی دکتری: taghishojaee@yahoo.com

## ۱- مقدمه

امروزه مواد مرکب به خاطر نسبت‌های بالای استحکام به وزن، سفتی به وزن و همچنین خصوصیات سازه‌ای مطلوب‌تر آنها در مقایسه با مواد متعارف، در شکل‌ها و انواع مختلف در اغلب کاربردهای مهندسی مدرن به کار گرفته می‌شود.

استفاده از این مواد در صنایع هوافضا، راه‌حلی برای کاهش وزن و بهبود کارایی بوده و در این راه پیشرفت‌های چشم‌گیری حاصل شده است. نیاز به کاهش وزن، دسترسی جهت بازیابی، تعمیر، تعویض قطعه، عبور لوله و سیم، ایجاد پنجره یا درب و امثال آن، طراح را ملزم به ایجاد گشودگی‌هایی با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف در سازه می‌کند. به جز مواردی که گشودگی‌ها جهت کاهش وزن ایجاد می‌شوند؛ وجود آنها وزن سازه را افزایش می‌دهد [۱] چراکه با ایجاد گشودگی‌ها می‌بایست سازه‌های مجاور را به‌منظور تحمل بار اعمال‌شده، تقویت کرد. به‌خصوص باید کمانش سازه در نظر گرفته‌شده و پاسخ‌های قانع‌کننده‌ای برای آن ارائه شود تا از ایمنی سازه اطمینان حاصل گردد.

با توجه به نوع قطعه و بار اعمالی بر آن، رفتار کمانشی متفاوت بوده و اولویت‌بندی خواهند شد. گروهی از آنها اجازه کمانش نداشته و در بعضی دیگر به بررسی و تحلیل رفتار پس از کمانش پرداخته می‌شود. عموماً صفحات جدار نازک قبل از رسیدن به حد تسلیم، دچار کمانش شده و باربری واقعی خود را از دست می‌دهند. لذا، آنالیز کمانش در آنها ضروری است.

روش تحلیلی دقیق و جامعی برای آنالیز صفحات کامپوزیتی دارای گشودگی وجود ندارد. گروهی از محققین روش‌های تقریبی، عده‌ی کثیری با روش‌های المان محدود و تنها عده‌ی کمی مطالعات تجربی را بر روی کمانش و شکست صفحات کامپوزیتی انجام داده‌اند.

تحقیقات مارتین<sup>۱</sup> [۲]، از اولین مطالعات بر روی رفتار کمانش و پس‌کمانش یک صفحه کامپوزیتی مستطیلی دارای گشودگی است که بر روی دو لبه روبه‌رو تحت بارگذاری فشاری تک‌محوره قرار داشت.

لارسون<sup>۲</sup> [۳]، رفتار کمانشی صفحات ارتوتروپ مستطیلی الاستیک خطی با گشودگی دایروی مرکزی را که تحت

بارگذاری تک‌محوره و دومیحوری در شرایط مرزی گیردار و ساده قرار گرفته‌اند، به‌روش المان محدود و تجربی بررسی کرد. نمث<sup>۳</sup> [۴]، به بررسی تجربی کمانش و پس‌کمانش صفحات ایزوتروپ و کامپوزیتی مربعی دارای گشودگی‌های دایروی مرکزی و بدون گشودگی از جنس گرافیت-اپوکسی، تحت بارگذاری فشاری پرداخت.

بریت<sup>۴</sup> [۵]، به آنالیز تقریبی کمانش فشاری و برشی پانل‌های ایزوتروپ با گشودگی بیضوی مرکزی پرداخت که نتایج آن در دو قسمت پیش‌کمانش و کمانش ارائه شد. همچنین اثر نسبت منطری پانل، اندازه و جهت گشودگی، ایزوتروپی چندلایه و بارگذاری ترکیبی را بر روی بار کمانش مورد بررسی قرار داد.

بایلی<sup>۵</sup> و وود<sup>۶</sup> [۶]، با به‌کارگیری روش المان محدود (توسط نرم‌افزار انسیس)، رفتار پس‌کمانشی پانل‌های گرافیت-اپوکسی مربعی را تحت بارگذاری فشاری مطالعه کردند. این پانل‌ها با گشودگی دایروی، مربعی مرکزی و خارج از مرکز در شرایط مرزی گیردار تحت بارگذاری جابه‌جایی قرار داشت. همچنین برای صحت‌سنجی نتایج المان محدود یک نمونه تست محدود نیز انجام دادند.

جانکی<sup>۷</sup> [۷]، نتایج آنالیز خرابی پیش‌رونده را برای صفحات کامپوزیتی تخت و دارای انحنا از جنس گرافیت-اپوکسی با و بدون گشودگی تحت بار برشی درون‌صفحه‌ای و بار فشاری تحلیل کرد. سپس نتایج حاصل از روش‌های المان محدود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود.

جین<sup>۸</sup> و کومار<sup>۹</sup> [۸]، به‌روش المان محدود، اثر اندازه و شکل گشودگی (دایروی مرکزی و بیضوی) را بر بارهای کمانش و شکست لایه اول چندلایه‌های مربعی متقارن تحت بار تک‌محوری فشاری ارائه کردند.

اُترکاس<sup>۱۰</sup> و همکاران [۹]، کمانش صفحات کامپوزیتی با یک گشودگی دایروی تقویت‌شده در دو طرف صفحه که در معرض بارگذاری فشاری یکنواخت و غیریکنواخت قرار دارند را به‌روش حل نیمه‌تحلیلی بررسی کردند.

3- Nemeth  
4- Britt  
5- Baily  
6- Wood  
7- Jaunky  
8- Jain  
9- Kumar  
10- Oterkus

1- Martin  
2- Larsson

تحت بارگذاری فشاری محوری و ترکیب آن با بار درون صفحه‌ای برشی مورد بررسی قرار گرفت.

لپاتین<sup>۱۰</sup> و مُروزو<sup>۱۱</sup> [۱۸]، به حل مسئله کمانش صفحات ساندویچی کامپوزیتی مستطیلی تحت فشار یکنواخت براساس اصل لاگرانژ و تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول پرداختند. شرایط مرزی ساده در دو لبه موازی و شرایط مرزی گیردار و آزاد در دو لبه دیگر) بود که با استفاده از روش گالرکین به یک فرمول تحلیلی برای بارهای بحرانی رسیدند.

ملک‌زاده‌فرد و همکارانش [۱۹]، به تحلیل کمانش پانل‌های ساندویچی مستطیلی با دو رویه چندلایه کامپوزیتی و هسته میانی از جنس مواد هدفمند متقارن به‌روش تئوری مرتبه بالای بهبودیافته پرداختند. آنها اثرات تغییر نسبت طول به عرض پانل، ضخامت کل به طول و یا عرض، نسبت مدول الاستیسیته ماده طرفین هسته به مرکز آن و نوع تابع توزیع خواص ماده هدفمند با انواع توان‌های توزیع را بر بار بحرانی کمانش مورد مطالعه قرار دادند.

مظفری و جعفری [۲۰]، پارامترهای مؤثر بر نیروی کمانش دهانه استوانه‌ای FML را با استفاده از تئوری FSDT مورد بررسی قرار دادند. آنها دهانه استوانه‌ای را از نوع گلر<sup>۱۲</sup> انتخاب کردند که تحت بار محوری با تکیه‌گاه‌های ساده در نظر گرفته شده و اثر پارامترهای مختلف FML، از جمله کسر حجمی فلز، زاویه الیاف، لایه‌چینی‌های متفاوت و ابعاد هندسی را بر روی نیرو و مودهای کمانش بررسی کردند.

همان‌گونه که ملاحظه شد کمانش صفحات مرکب حاوی گشودگی به‌شکل گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است و نشان می‌دهد که پارامترهایی همچون اندازه و شکل گشودگی، جهت الیاف، محل و نحوه اعمال بار بر رفتار کمانشی تأثیر می‌گذارد. اما اطلاعات لازم از تأثیر ترکیب این متغیرها همچنان محدود بوده و به‌خصوص در مورد صفحات کامپوزیتی تقویت‌شده نیاز به بررسی بیشتر است که در این مطالعه در دو بخش تجربی و المان محدود به آن پرداخته می‌شود.

بدین‌منظور، در این بررسی، ابتدا آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های L شکل تهیه‌شده از E-Glass/Epoxy در حضور و عدم حضور گشودگی دایروی، تحت بارگذاری فشاری

الادی<sup>۱</sup> و آلکا<sup>۲</sup> [۱۰]، به بررسی تجربی شکست پانل‌های کامپوزیتی L شکل کربن- اپوکسی دارای گشودگی و بدون گشودگی با لبه‌ی تقویت‌کننده با اندازه‌ی ثابت پرداختند و بارهای منجر به شکست آنها را (۱۸ نمونه تولیدشده به‌روش انتقال رزین در قالب) استخراج کردند.

قنادپور و همکارانش [۱۱]، با استفاده از روش المان محدود اثر گشودگی‌های بیضوی و دایروی را بر روی رفتار کمانشی صفحات کامپوزیتی چندلایه‌ای متعامد ساخته‌شده از ماتریس پلیمری مطالعه کردند. همچنین تأثیر اندازه گشودگی را در نسبت‌های منطقی متفاوت صفحه با لایه‌چینی متقاطع متقارن<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار دادند.

یازیکی [۱۲]، به بررسی اثرات اندازه و جهت گشودگی و شعاع گوشه‌های گشودگی بر رفتار کمانشی صفحات کامپوزیتی ساخته‌شده از ماتریس‌های پلیمری با تکیه‌گاه ساده برای لبه‌های بارگذاری شده و شرایط آزاد برای لبه‌های بدون بار به‌روش المان محدود پرداخت.

مؤمن<sup>۴</sup> و اسکافر<sup>۵</sup> [۱۳]، عبارات فرم بسته‌ای را به‌منظور تقریب‌زدن تأثیر گشودگی‌های تک و چندتایی بر روی تنش کمانش الاستیک بحرانی صفحه در شرایط خمش یا فشار توسعه دادند.

ترکان<sup>۶</sup> و اکتاس<sup>۷</sup> [۱۴]، رفتار کمانشی صفحات شیشه- اپوکسی چندلایه‌ی بافته‌شده‌ی شیاردار با اشکال مختلف گشودگی (دایروی، بیضوی، مربعی و مستطیلی) و بدون گشودگی را در سه سطح سفتی کم، متوسط و زیاد به‌روش المان محدود (نرم‌افزار انسیس) و تجربی بررسی کردند.

سینگ<sup>۸</sup> و کومار<sup>۹</sup> [۱۵-۱۷]، به بررسی اثرات شرایط مرزی، مرزی، شکل گشودگی، جهت بار برشی و لایه‌چینی بر پاسخ‌های کمانش و پس‌کمانش و همچنین بارهای شکست و خصوصیات شکست چندلایه شبه‌ایزوتروپ و ارتوتروپ توسط روش المان محدود پرداختند. نمونه‌های مدل‌شده توسط آنها

- 1- Elaldi
- 2- Aleca
- 3- Symmetric Cross-Ply
- 4- Moen
- 5- Schafer
- 6- Tercan
- 7- Aktas
- 8- Singh
- 9- Kumar

10- Lopatin  
11- Morozov  
12- Glare

در این نمونه‌ها، سه وضعیت مختلف لایه‌چینی مورد بررسی قرار می‌گیرند:

وضعیت ۱: شش نمونه سه لایه با آرایش  $[0/0/0]$ ،

وضعیت ۲: شش نمونه سه لایه با آرایش  $[0/45/0]$  و

وضعیت ۳: شش نمونه سه لایه با آرایش  $[+45/-45/+45]$ . قابل ذکر است که در هر وضعیت، سه نمونه دارای گشودگی و سه نمونه بدون گشودگی می‌باشد. در حین آماده‌سازی و لایه‌گذاری در مرحله ساخت نمونه‌ها، هیچ تقویت‌کننده‌ی اضافه‌ای در جهت ضخامت به کار نرفته است.

## ۲-۲- مواد به کاررفته و روش ساخت

پارچه‌ی استفاده شده برای آماده‌سازی قطعات L شکل، یک پارچه تک‌جهته<sup>۱</sup> شیشه‌ای<sup>۲</sup> ضخیم با وزن  $\frac{gr}{m^2}$  ۶۲۱ است. چسب به کاررفته یک نوع چسب اپوکسی دوقسمتی است. این اپوکسی از نوع LY5052 و سخت‌کننده آن از نوع HY5052 می‌باشد. نسبت اختلاط رزین با سخت‌کننده براساس برگه اطلاعات چسب<sup>۳</sup>، به ترتیب، ۱۰۰ گرم به ۳۸ گرم گرم است. همچنین به میزان ۴ گرم، پودر پرکننده ایزوپیل<sup>۴</sup> به ترکیب رزین و سخت‌کننده اضافه شده و نهایتاً پس از مخلوط کردن و ایجاد ترکیبی یک‌دست، جهت لایه‌چینی الیاف استفاده می‌شود.

با توجه به روش ساخت و نوع هندسه نمونه‌ها لازم است که قالب ویژه‌ای ساخته شود. این قالب از جنس فولاد کم‌کربن ST-37 بوده که به صورت دوتکه (نر و ماده) و توسط چهار پیچ (شکل ۲) بر روی یکدیگر بسته می‌شوند. درون قالب ماده سه‌منفذ به‌گونه‌ای طراحی شده است که پس از قرارگیری قالب نر بر روی قالب ماده و بستن پیچ‌ها، رزین مازاد جذب‌شده توسط نمونه، از قالب خارج شود. همچنین برای قالب، پله‌هایی تعبیه شده تا بتواند نمونه L شکل را ایجاد کند.

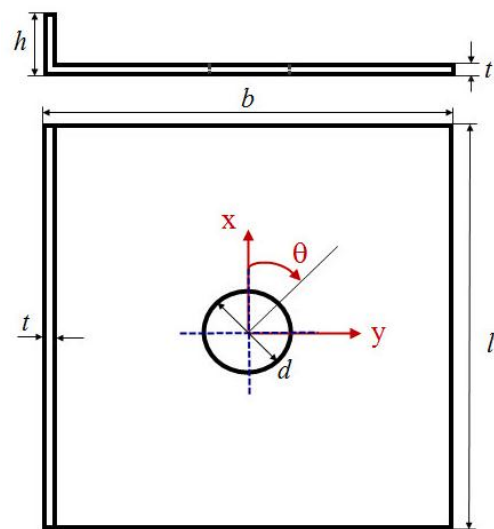
تک‌محوره انجام می‌گیرد و نیروهای کمانش و شکست آنها به‌طور تجربی تعیین می‌گردند. همچنین خواص مکانیکی این مواد با استفاده از کوپن‌های استاندارد مشخص می‌شوند. سپس، تأثیر تغییرات اندازه لبه تقویت‌کننده و اندازه گشودگی دایروی بر بار کمانش صفحات کامپوزیتی (با همان خصوصیات مواد ساخته‌شده در قسمت تجربی) برای چهار لایه‌چینی مختلف، به روش المان محدود بررسی می‌گردد.

## ۲- مطالعه تجربی

در این قسمت، اثرات حضور و عدم حضور گشودگی دایروی مرکزی و لایه‌چینی بر رفتار کمانشی و شکست پانل‌های L شکل از جنس E-Glass/Epoxy که با روش لایه‌چینی دستی ساخته شده‌اند، به روش تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۱- خصوصیات هندسی و وضعیت لایه‌چینی نمونه‌ها

هندسه قطعات L شکل که مورد تست قرار می‌گیرند، در شکل ۱ نشان داده شده است:



شکل (۱): نمایی شماتیک از هندسه نمونه‌های تست.

$l$  طول صفحه و  $b$  پهناى صفحه (به‌همراه ضخامت تقویت‌کننده) که هر دو ۱۰۰ میلی‌متر،  $h$  ارتفاع تقویت‌کننده (که شامل ضخامت صفحه نیز می‌شود) و برابر ۲۰ میلی‌متر و  $d$  قطر گشودگی دایروی مرکزی به‌اندازه ۲۰ میلی‌متر است. همچنین  $t$ ، ضخامت صفحه و تقویت‌کننده بوده که در همه‌جا به‌طور یکنواخت و به‌اندازه‌ی ۲ میلی‌متر می‌باشد.

1- UD From Metyx  
2- E-Glass  
3- Data Sheet  
4- Aerosil

همچنین، به‌منظور سوراخ‌کاری بهتر و دقیق‌تر یک جیگ سوراخ‌کاری از جنس پلی‌آمید که درون آن به‌اندازه‌ی ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر پله ایجاد شده است، ساخته می‌شود (شکل ۴).

دستگاه فرز به‌کاررفته از نوع لوانان<sup>۱</sup> با خط‌کش دیجیتال بسیار دقیق می‌باشد که با سرعت ۲۲۰ دور بر دقیقه، تحت فشار کم و منقطع، اقدام به سوراخ‌کاری نمونه‌ها می‌شود. نهایتاً، ۱۸ نمونه‌ی L شکل تولید می‌شود که در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): جیگ ساخته شده جهت سوراخ‌کاری.



شکل (۲): قالب و اجزای آن.

پس از لایه‌چینی الیاف در جهات موردنظر (شکل ۳)، هر نمونه به مدت ۲۰ ساعت درون قالب در دمای محیط (به‌طور متوسط ۲۷ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفته تا کاملاً خشک شده و نهایتاً از قالب خارج شود.



شکل (۳): لایه‌چینی درون قالب.



شکل (۵): نمونه‌های L شکل تولیدشده.

از سوی دیگر، آنالیز و طراحی هر سازه‌ای مستلزم دانستن مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی آن است. به این منظور، کوپن‌هایی در اندازه‌ها و جهات مختلف و به همان نسبت ترکیب مواد به‌کاررفته برای ساخت نمونه‌های اصلی، براساس استاندارد ASTM، D3039 [۲۱] و D3518 [۲۲] ساخته

سپس، نمونه‌ها باید در اندازه‌ی موردنظر برش زده شده و تریم شوند. روش‌های مختلفی از جمله واتر جت، لیزر، سنگ دستی، اره دستی، اره بادی و... برای برش و تریم نمونه‌ها وجود دارند. از بین این روش‌ها، استفاده از اره بادی انتخاب گردید چراکه دیگر موارد ذکر شده می‌تواند منجر به لایه‌لایه‌شدگی شدید، تغییر فرم، سوختگی الیاف، یا ایجاد سطح ناصاف در حین برش و تریم قطعه شوند. نهایتاً نمونه‌ها پس از برش، تریم می‌گردند.

در نیمی از نمونه‌ها باید گشودگی دایروی مرکزی به قطر ۲۰ میلی‌متر ایجاد گردد. از این‌رو، سوراخ‌کاری به‌وسیله‌ی تیغ فرز چهارپر HSS-Q20 انجام می‌شود که همزمان با براده‌برداری از کف و کناره، سوراخ یکنواختی ایجاد کرده و مانع از لایه‌لایه‌شدگی الیاف می‌شود.

1- Lunan



شکل (۶): فیکسچر طراحی شده به همراه اجزای آن.

#### ۴-۲- نتایج تجربی

در این قسمت، نتایج حاصل شده از تست کوپن‌های استاندارد و نمونه‌های L شکل بیان می‌گردد.

#### ۴-۲-۱- خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد

متوسط مقادیر خصوصیات مکانیکی به دست آمده از نتایج تست استاندارد صورت گرفته بر روی کوپن‌ها (شکل ۷)، در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین درصد وزنی رزین و الیاف در نمونه‌ها، به روش حذف رزین از الیاف اندازه‌گیری شده است.

جدول (۱): متوسط نتایج به دست آمده از تست کوپن‌ها.

نماد	واحد	
$E_{11}$	(MPa)	۲۲/۴۷
$E_{22}$	(MPa)	۶/۲۸
$E_{33}$	(MPa)	۶/۲۸
$G_{12}$	(MPa)	۳/۵
$G_{13}$	(MPa)	۳/۵
$U_{12}$	-	۰/۲۷۵
$U_{13}$	-	۰/۲۷۵
$\rho$	( $\frac{Kg}{m^3}$ )	۱۸۰۰
$w_f$	-	۶۱/۵۳
$w_m$	-	۳۸/۴۷



شکل (۷): یک کوپن در حال تست.

و تست می‌شوند. لازم به ذکر است که از هر نمونه ۳ عدد کوپن ساخته شده که نهایتاً ۹ نمونه کوپن ایجاد می‌گردد.

به منظور پخت، نمونه‌های آزمایش و کوپن‌های استاندارد را درون کوره قرار داده و درب آن بسته می‌شود. دمای اولیه کوره ۲۶ درجه سانتی‌گراد و برابر دمای محیط است. سپس دما به گونه‌ای تنظیم می‌شود (براساس برگه اطلاعات رزین) که در هر ۱۵ دقیقه، ۴ درجه سانتی‌گراد، افزایش یابد تا دمای نهایی به ۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد. نمونه‌ها به مدت ۱۵ ساعت در این دما باقی می‌ماند. سپس دمای کوره با نرخ ۴ درجه در هر ۱۵ دقیقه کاهش می‌یابد تا دمای درون کوره به دمای محیط برگردد.

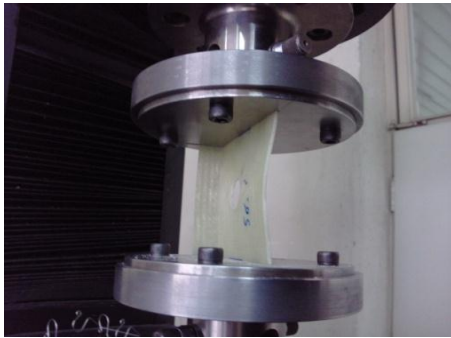
#### ۴-۲-۳- نحوه انجام تست

به منظور تست نمونه‌های L شکل لازم است یک فیکسچر مناسب به گونه‌ای طراحی و ساخته شود تا بار فشاری تک‌محوره‌ی یکنواخت بر نمونه‌ها اعمال شود. بدین منظور یک فیکسچر از جنس فولاد کم‌کربن ST37 به قطر ۱۵۰ میلی‌متر طراحی و ساخته می‌شود. در هر قسمت، یک صفحه دایروی با ضخامت ۸ میلی‌متری وجود دارد که توسط دستگاه وایرکات پنج‌محوره (Agie-cut 200) براساس ابعاد جانبی نمونه‌ها و به عمق ۸ میلی‌متر تخلیه شده است به گونه‌ای که در حین تست، مرکز هر نمونه در مرکز فیکسچر قرار گرفته و شیارها دقیقاً در مقابل هم واقع شوند. به منظور تست نمونه‌ها، هر دو لبه بالایی و پایینی قطعات L شکل، در قسمت‌های شیاری فیکسچر به عمق ۸ میلی‌متر، به صورت جاگذاری پرسی، گیردار شده‌اند.

دستگاه به کار گرفته شده برای تست نمونه‌های Instron-5500R است که دارای دو خصوصیت ذاتی هم‌راستا بودن فک‌ها و لودسل بسیار دقیق بوده و اخیراً کالیبره گردیده است. فیکسچر و نمونه L شکل به طور عمودی و هم‌راستا بر روی صفحه کار ماشین تست نصب می‌شود. هر نمونه در شرایط بارگذاری فشاری تک‌محوره براساس شرایط استاندارد ASTM-D6641 [۲۳] تحت بارگذاری جابه‌جایی<sup>۱</sup> با نرخ  $\frac{mm}{min}$  ۱/۳ قرار می‌گیرد. بارگذاری تا زمانی که شکست نهایی رخ دهد، ادامه می‌یابد. شکل ۶ فیکسچر طراحی شده و اجزای آن را نمایش می‌دهد.

1- Displacement Loading

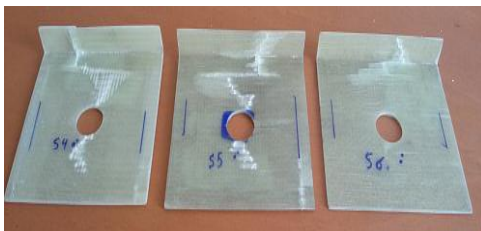




شکل (۹): نمونه S6 در حال تست.

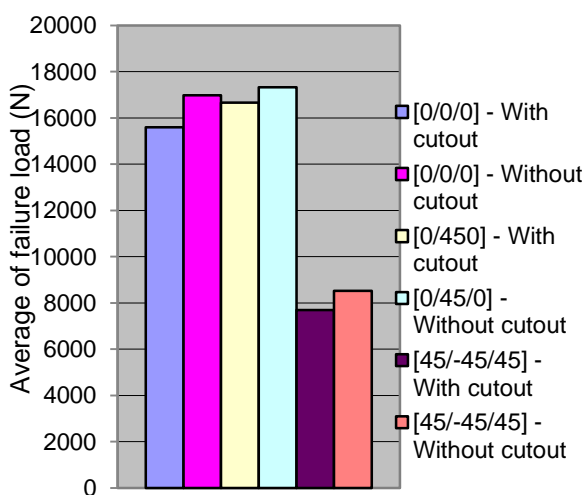


S16, S17, S18



S4, S5, S6

شکل (۱۰): نوع شکست دو گروه از نمونه‌ها.



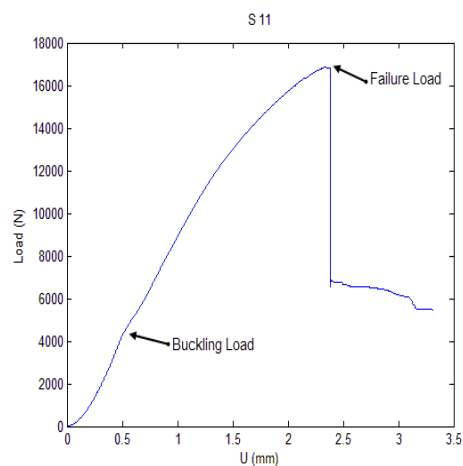
شکل (۱۱): تأثیر لایه‌چینی و حضور گشودگی بر بار شکست.

شایان‌ذکر است که برای تحلیل رفتار نمونه‌ها در نرم‌افزار، علاوه بر اطلاعات ذکرشده در جدول ۱، پارامترهای  $G_{23}$ ،  $G_{13}$  و  $U_{23}$  نیز موردنیاز می‌باشند. بدین منظور با مراجعه به کارهای صورت‌گرفته توسط محققان و دیگر منابع معتبر [۱۴] و [۲۴]، این پارامترها به‌صورت تقریبی  $G_{23,app} = 0.6 \times G_{13} = 2.31$  و  $U_{23,app} = 0.45$  مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۲-۴-۲- نتایج تست نمونه‌های L شکل

با استفاده از نمودار بار محوری به‌جابه‌جایی محوری در هر نمونه، بار بحرانی کمانش و بار شکست قطعات تعیین می‌شود. اکثر این نمودارها در نقطه اولیه کمانش تغییر شیب می‌دهند (شکل ۸) اگرچه، استخراج و شناسایی این نقطه در چهار مورد از نمونه امکان‌پذیر نبود. در جدول ۲، نتایج استخراج‌شده برای ۱۸ نمونه ارائه شده است.

در حین تست مشاهده شد که کلیه نمونه‌ها، قبل از رسیدن به شکست دچار کمانش می‌گردند. شکست در نمونه‌های دارای لایه‌چینی [0/0/0] و [0/45/0] همراه با صدای زیاد و افت ناگهانی بار اتفاق افتاد اما در نمونه‌های دارای لایه‌چینی [45/-45/45] با صدای کم و کاهش آرام بار صورت پذیرفت. شکل ۹ یک نمونه در حال تست را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نحوه شکست چند نمونه را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۱ متوسط نتایج بار تخریب قطعات برای ۶ حالت مختلف باهم مقایسه شده است.



شکل (۸): تغییر شیب نمودار در نقطه کمانش برای نمونه S11

S11

جدول (۲): نتایج تست برای نمونه‌های L شکل.

(۲-الف): بدون گشودگی.					
لایه چینی	نمونه‌ها	بار کمانش (N)	متوسط بار کمانش (N)	بار شکست (N)	متوسط بار شکست (N)
[0/0/0]	S1	*	۶۹۰۰	۱۶۱۰۶	۱۶۹۸۲
	S2	۷۰۰۰		۱۷۱۸۸	
	S3	۶۸۰۰		۱۷۶۵۱	
[0/45/0]	S7	۶۵۰۰	۶۳۵۰	۱۷۰۰۰	۱۷۳۲۱
	S8	*		۱۷۷۰۷	
	S9	۶۲۰۰		۱۷۲۵۷	
[+45/-45/+45]	S13	۲۹۵۰	۳۱۰۰	۸۶۲۴	۸۵۲۰
	S14	*		۸۱۶۶	
	S15	۳۲۵۰		۸۷۷۱	

(۲-ب): با گشودگی.					
لایه چینی	نمونه‌ها	بار کمانش (N)	متوسط بار کمانش (N)	بار شکست (N)	متوسط بار شکست (N)
[0/0/0]	S4	۵۸۰۰	۵۹۰۰	۱۴۳۴۴	۱۵۵۹۷
	S5	*		۱۵۹۹۱	
	S6	۶۰۰۰		۱۶۴۵۷	
[0/45/0]	S10	۴۵۰۰	۴۳۱۶	۱۶۴۹۰	۱۶۶۶۵
	S11	۴۲۵۰		۱۶۸۸۲	
	S12	۴۲۰۰		۱۶۶۲۵	
[+45/-45/+45]	S16	۲۱۰۰	۲۲۲۳	۸۰۳۲	۷۶۹۵
	S17	۲۰۷۰		۷۳۲۶	
	S18	۲۵۰۰		۷۷۲۹	

\* عدم تشخیص نقطه اولیه تغییر شیب نمودار



جدول ۴ نیروهای کمانش حاصل از تست و المان محدود مقایسه شده است.

جدول (۴): مقایسه بین نتایج به‌دست‌آمده از

تست و المان محدود.

(۴-الف): برای نمونه‌های بدون گشودگی.

نمونه‌ها	متوسط نیروهای کمانش تجربی (N)	نیروهای حاصل از المان محدود (N)	درصد خطا
S1 S2 S3	۶۹۰۰	۶۹۸۹	۱/۲
S7 S8 S9	۶۳۵۰	۶۵۴۲	۱/۳
S13 S14 S15	۳۱۰۰	۳۲۱۵	۳/۷

(۴-ب): برای نمونه‌های دارای گشودگی.

نمونه‌ها	متوسط نیروهای کمانش تجربی (N)	نیروهای حاصل از المان محدود (N)	درصد خطا
S4 S5 S6	۵۹۰۰	۶۰۳۸	۲/۳
S10 S11 S12	۴۳۱۶	۴۴۱۵	۲/۲
S16 S17 S18	۲۲۲۳	۲۲۹۲	۳/۱

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج به‌دست‌آمده از تست و نرم‌افزار انسیس با دقت خوبی هم‌خوانی دارند. پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی‌های المان محدود، آنالیز کمانش هر نمونه انجام می‌گیرد. سپس نتایج استخراج و بی‌بعد سازی شده و نمودار تغییرات آنها برحسب اندازه گشودگی (شکل ۱۳) و اندازه لبه تقویت‌کننده (شکل ۱۴) در لایه چینی‌های مختلف رسم می‌گردد. لازم به‌ذکر است که  $N_x$  نیروی کمانشی هر نمونه در واحد عرض است.

### ۳- مطالعه المان محدود

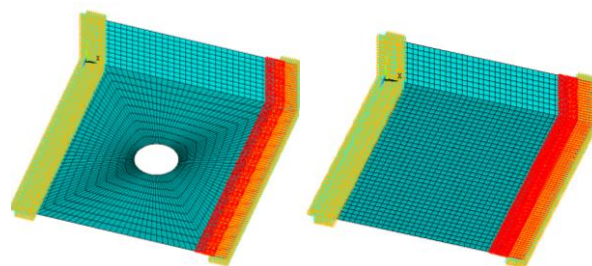
در این قسمت، ابتدا نمونه‌های آزمایش‌شده در بخش قبل، توسط نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی و تحلیل می‌شوند. پس از مقایسه نتایج و اطمینان از صحت مدل‌سازی‌ها، نمونه‌های متفاوتی با متغیر قراردادن ارتفاع لبه تقویت‌کننده و اندازه گشودگی دایروی در چهار لایه‌چینی مختلف (طبق جدول ۳) مدل‌سازی شده و نیروی کمانش آنها بررسی می‌شود.

جدول (۳): مقادیر مختلف متغیرهای هندسی برای نمونه‌های

مدل‌شده توسط نرم‌افزار المان محدود.

$h$ (mm)	۰	۴	۷	۱۲	۲۰	۲۵	۳۰	۴۰	۵۰
لایه چینی	[0/0/0] [0/45/0] [+45/-45/+45] [0/90/0]								
$d$ (mm)	۰	۵	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	

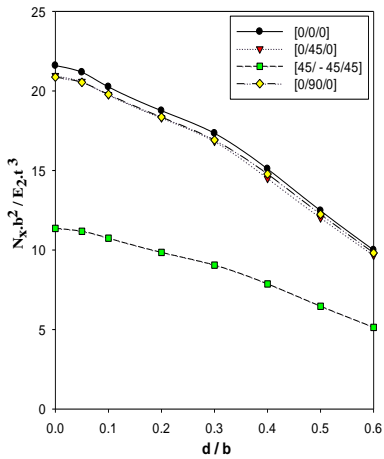
تمام مدل‌ها با المان Shell 91 [۲۵] مش‌بندی می‌شوند که یک المان پوسته‌ای سه‌بعدی ۸ گره‌ای با ۶ درجه آزادی در هر گره می‌باشد. به‌منظور ایجاد قیود تکیه‌گاهی مشابه با شرایط مرزی نمونه‌های تست‌شده، کلیه نودهای موجود بر لبه پایینی با عرض ۸ میلی‌متر به‌طور کامل کلمپ می‌شوند. اما در لبه بالا، با همان عرض ۸ میلی‌متر به‌گونه‌ای مقید می‌شود که تنها در راستای بار اعمالی، امکان جابه‌جایی محوری وجود داشته و بقیه درجات آزادی (دوران‌ها و جابه‌جایی‌ها) به‌طور کامل بسته شود. بارگذاری شامل یک بار فشاری تک‌محوره واحد است که به‌صورت یکنواخت بر روی نودهای لبه بالایی قطعات L شکل به عمق ۸ میلی‌متر توزیع می‌شود. شکل ۱۲ دو نمونه از مدل‌های المان محدود را نشان می‌دهد.



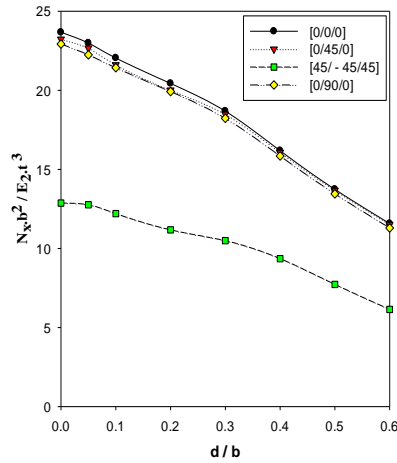
شکل (۱۲): دو نمونه مدل المان بندی شده به‌همراه بارگذاری و شرایط مرزی.

### ۳-۱- نتایج آنالیز المان محدود

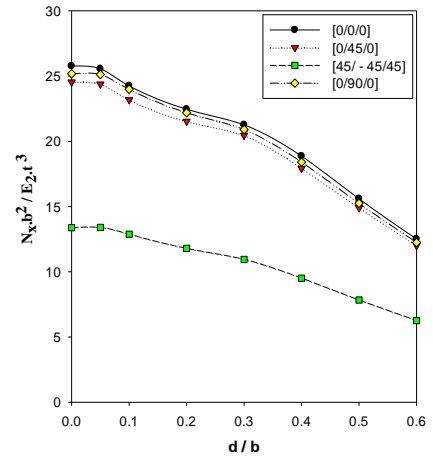
جهت بررسی نتایج، لازم است ابتدا مقایسه‌ای بین نتایج تست‌های آزمایشگاهی و آنالیز المان محدود صورت گیرد. در



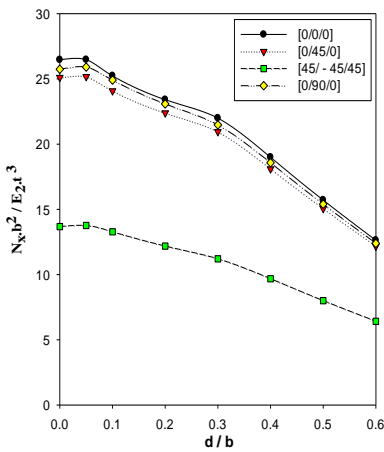
(a) :  $\frac{h}{b} = 0$



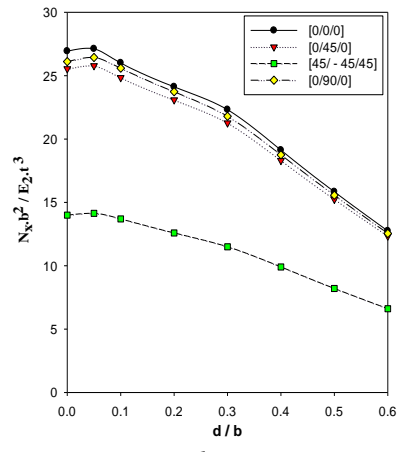
(b) :  $\frac{h}{b} = 0.04$



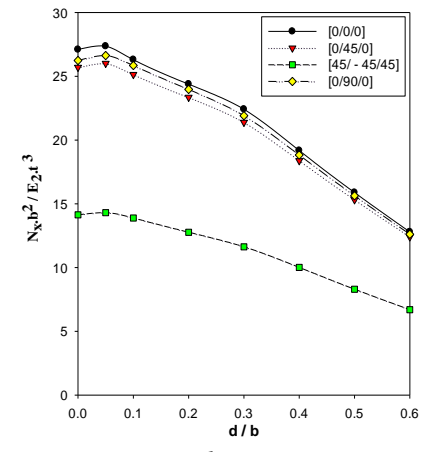
(c) :  $\frac{h}{b} = 0.07$



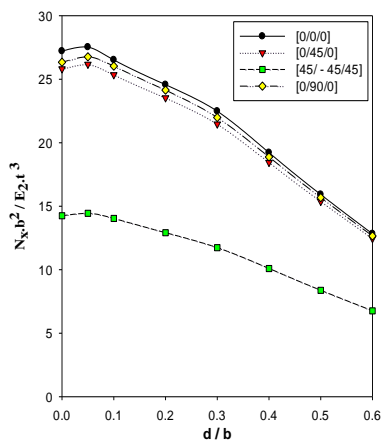
(d) :  $\frac{h}{b} = 0.12$



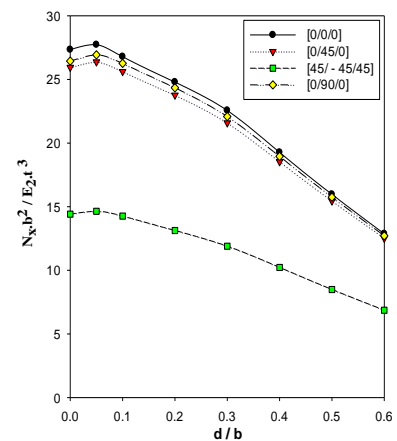
(e) :  $\frac{h}{b} = 0.2$



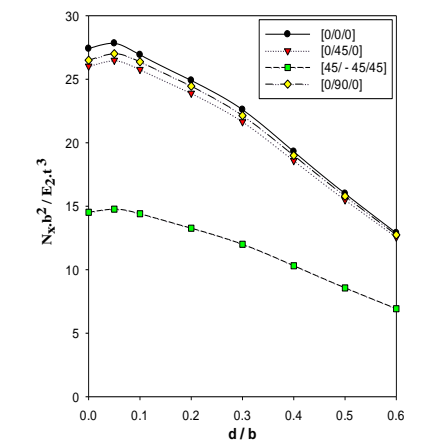
(f) :  $\frac{h}{b} = 0.25$



(g) :  $\frac{h}{b} = 0.3$

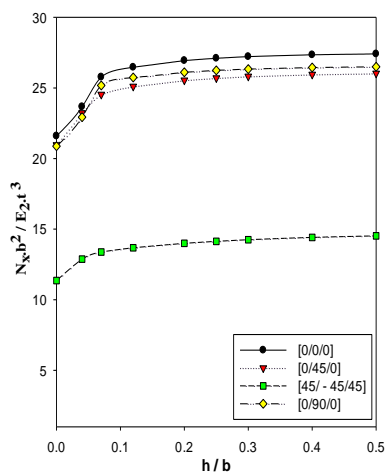


(h) :  $\frac{h}{b} = 0.4$

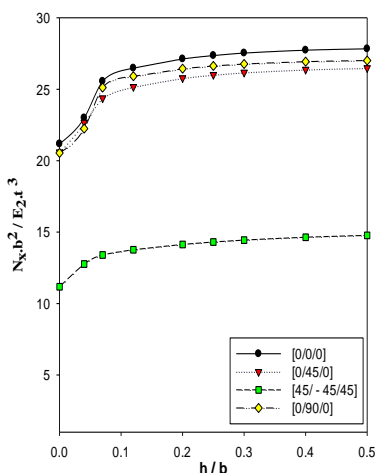


(i) :  $\frac{h}{b} = 0.5$

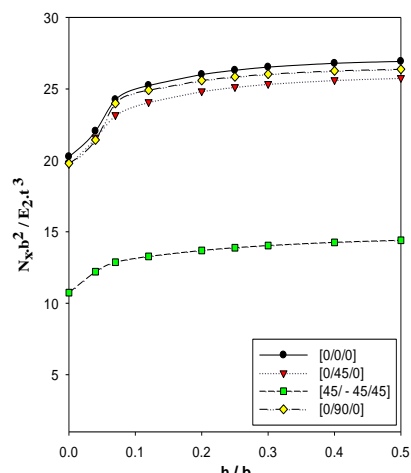
شکل (۱۳): تغییرات نیروهای کمانش براساس تغییرات اندازه گشودگی در اندازه‌های مختلف لبه تقویت‌کننده.



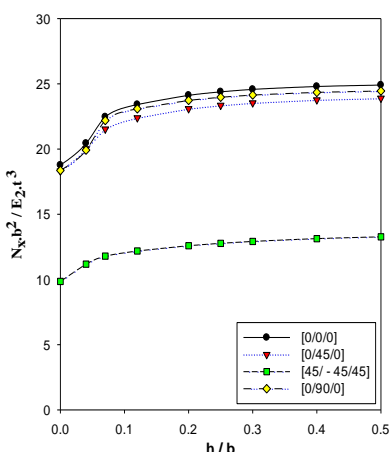
(a):  $\frac{d}{b} = 0$



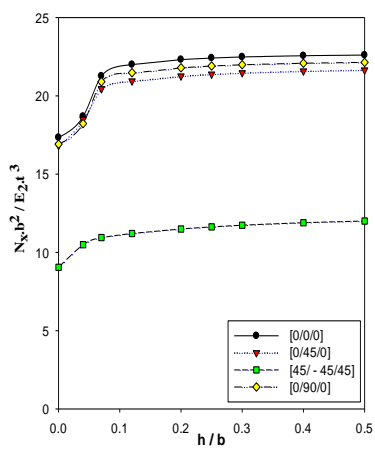
(b):  $\frac{d}{b} = 0.05$



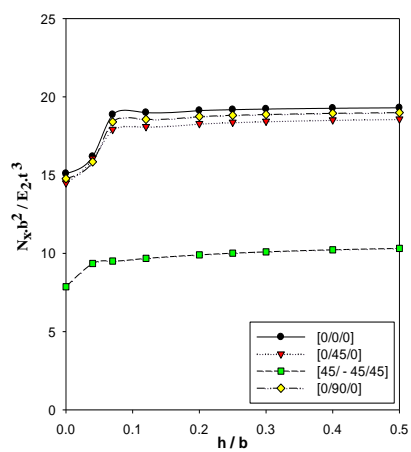
(c):  $\frac{d}{b} = 0.1$



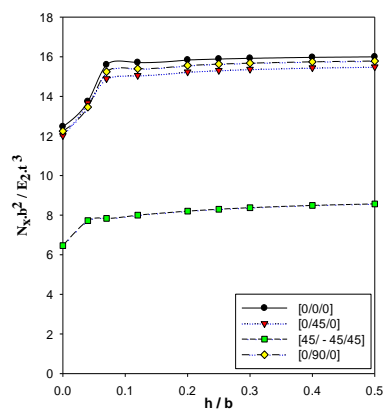
(d):  $\frac{d}{b} = 0.2$



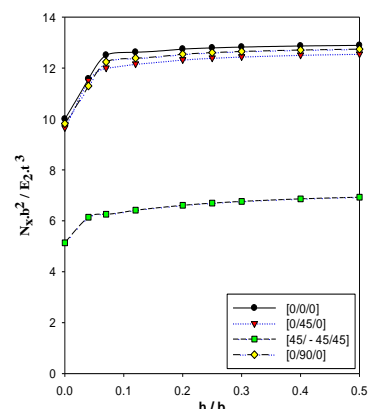
(e):  $\frac{d}{b} = 0.3$



(f):  $\frac{d}{b} = 0.4$



(g):  $\frac{d}{b} = 0.5$



(h):  $\frac{d}{b} = 0.6$

شکل (۱۴): تغییرات نیروهای کمانش براساس تغییرات اندازه لبه تقویت‌کننده در اندازه‌های مختلف گشودگی.

در برخی موارد تأثیر مثبت اندکی دارد که در مجموع می‌تواند نادیده گرفته شود.

۵. در صفحات با اندازه لبه‌ی تقویت‌کننده ثابت، بار کمانشی با افزایش قطر گشودگی، کاهش می‌یابد. اگرچه در یک اندازه گشودگی ثابت، با افزایش اندازه‌ی لبه تقویت‌کننده، در ابتدا بار کمانشی افزایش یافته و سپس ثابت می‌شود. بنابراین ارتفاع بهینه‌ای برای لبه تقویت‌کننده در شرایط مختلف وجود دارد و افزودن مقدار آن بعد از اندازه‌ی بهینه، تنها منجر به افزایش وزن و هزینه شده و تأثیر به‌سزایی بر بار کمانش ندارد. لازم به‌ذکر است که برای قطر گشودگی  $(d/b) = 0.12$  در نمونه‌های موردبررسی، نسبت ارتفاع بهینه  $(h/b)$  برابر  $0.125$  حاصل شد.

۶. از بررسی نسبت بار کمانش صفحه‌ی لبه‌دار به بار کمانش صفحه‌ی بدون لبه در یک اندازه گشودگی ثابت، ملاحظه می‌شود که حضور لبه با ارتفاع بهینه، می‌تواند تا ۳۰ درصد نیروی کمانشی را بهبود بخشد.

#### ۵- مراجع

1. Chun, M. and Niu, Y., "Airframe Structural Design", Lockheed Aeronautical System Company Burbank, California, 1988.
2. Martin, J., "Buckling and Post Buckling of Laminated Composite Square Plates with Reinforced Central Holes", Ph.D. Dissertation, Case Western Reserve University, 1972.
3. Larsson, P., "On Buckling of Orthotropic Stretched Plates With Circular Holes", Composite Structures, Vol. 11, No. 11, pp. 121-134, 1989.
4. Nemeth, P., "Buckling and Post Buckling Behavior of Square Compression-Loaded Graphite-Epoxy Plates with Circular Cutouts", NASA TP-3007, 1990.
5. Britt, V., "Shear and Compression Buckling Analysis for Anisotropic Panels with Centrally Located Elliptical Cutouts", AIAA, Vol. 32, No. 11, pp. 2293-2299, 1993.
6. Baily, R. and Wood, J., "Post Buckling Behavior of Square Compression Loaded Graphite Epoxy Panels with Square and Elliptical Cut-outs", Thin-Walled Structure, Vol. 28, No. 3, pp. 373-397, 1997.
7. Jaunky, N., "Progressive Failure Studies of Composite Panels with and Without Cutouts", NASA ICASE Report- 2001-27, 2001.
8. Jain, P., and Kumar, A. "Post Buckling Response of Square Laminates with a Central Circular-Elliptical Cutout", Composite Structures, Vol. 65, No. 2, pp. 179-185, 2004.
9. Oterkus, E., Barut, A., and Madenci, A., "Buckling of Composite Plates with a Reinforced Circular Cutout Subjected to Uniform and Non-Uniform Compression", 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC

همان‌گونه که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود افزایش اندازه گشودگی منجر به کاهش بار کمانش نمونه‌ها می‌شود. اگرچه وجود گشودگی‌های کوچک  $(d/b) \leq 0.05$  در برخی موارد منجر به بهبود بار کمانش می‌گردد که در حقیقت این نوع گشودگی‌ها همانند یک قید عمل می‌کنند. علاوه‌براین، در بین لایه‌چینی‌های به‌کار رفته، الیاف با زاویه  $0^\circ$  نسبت به محور اصلی در مقایسه با زاویه دیگر الیاف، بار کمانشی را افزایش می‌دهند.

همچنین همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود برای یک صفحه دارای گشودگی و بدون گشودگی افزایش اندازه لبه‌ی تقویت‌کننده در ابتدا منجر به بهبود بار کمانش در نمونه‌ها می‌گردد اما سپس بار کمانشی به مقدار ثابتی میل می‌کند. این امر بدین علت است که در اندازه‌های بزرگ‌تر از اندازه بهینه لبه‌ی تقویت‌کننده، خود لبه دچار کمانش زودرس می‌شود و دیگر تأثیر چشم‌گیری برافزایش بار کمانشی ندارد. همچنین اندازه بهینه لبه تقویت‌کننده متأثر از اندازه گشودگی بوده و در لایه‌چینی‌های مختلف تغییر می‌کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی کرد:

۱. نتایج حاصل از تست نمونه‌ها بیان‌گر این مطلب است که نمونه‌های دارای گشودگی، بار بحرانی کمانش و شکست کمتری نسبت به نمونه‌های بدون گشودگی دارند.
۲. در نمونه‌های باگشودگی و بدون گشودگی تست‌شده، بالاترین بار کمانش و شکست به‌ترتیب متعلق به نمونه‌های دارای لایه‌چینی  $[0/0/0]$  و  $[0/45/0]$  می‌باشد. حضور لایه ۴۵ درجه در بین دو لایه صفردرجه منجر به بهبود بار شکست نمونه‌ها گردیده است.
۳. لایه‌چینی  $[+45/-45/+45]$ ، به شکل چشم‌گیری کمترین مقادیر بار کمانش و شکست را برای نمونه‌های تست‌شده دارد. این امر نشان می‌دهد که افزایش درصد به‌کارگیری الیاف ۴۵ درجه همواره مفید نیست.
۴. نتایج حاصل از آنالیز المان محدود نشان می‌دهد اندازه گشودگی تأثیر به‌سزایی در نیروی کمانش دارد. در این نمونه‌ها با تغییر اندازه  $(d/b)$  از صفر تا  $0.16$  بار کمانشی تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. اگرچه گشودگی‌های کوچک  $(d/b) \leq 0.05$  تأثیر چندانی بر نیروی کمانش نداشته و حتی

- Test of a  $\pm 45^\circ$  Laminate - Designation D3518", ASTM International, West Conshohocken, 1995.
23. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminates Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture - Designation D6641", ASTM International, West Conshohocken, 1995.
  24. Department of Defense United States America, "The Composite Material Handbook-MIL 17: Polymer Matrix Composite Guidelines for Characterization of Structure Materials", ASTM International, Philadelphia, 2002.
  25. Desalvo, G., "ANSYS Engineering Analysis System Verification Manual", Swanson Analysis System, Houston, 1983.
- Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2004.
  10. Eladi, F. and Alecakir, S., "Damage Tolerance of Stiffened Composite Panels With Cutouts", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 25, No. 13, pp. 1341-1351, 2006.
  11. Ghannadpour, S.A.M., Najafi, A. and Mohammadi, B., "On The Buckling Behavior of Cross-ply Laminated Composite Plates Due to Circular-Elliptical Cutouts", Composite Structures, Vol. 75, No. 3, pp. 1-4, 2006.
  12. Yazici, M., "Influence of Cut-out Variables on Buckling Behavior of Composite Plates", Journal of Reinforced plastics and composites, Vol. 28, No. 19, pp. 2325-2339, 2008.
  13. Moen, C. and Schafer, B.W., "Elastic Buckling of Thin Plates With Holes in Compression or Bending", Thin-Walled Structures, Vol. 47, No. 12, pp. 1597-1607, 2009.
  14. Tercan, M. and Aktas, M., "Buckling Behavior of  $1 \times 1$  Rib Knitting Laminated Plates With Cutouts", Composite Structures, Vol. 89, No. 2, pp. 245-252, 2009.
  15. Singh, S.B. and Kumar, D., "Effects of Boundary Conditions on Buckling and Post Buckling Responses of Composite Laminate With Various Shaped Cutouts", Composite Structures, Vol. 92, No. 3, pp. 769-779, 2010.
  16. Singh, S.B. and Kumar, D., "Load Interaction Curves and Post-Buckling Response of Composite Laminate With Circular Cutout under Combined In-Plane Loading", Composites: Part B, Vol. 42, No. 5, pp. 1189-1195, 2011.
  17. Kumar, D., and Singh, S.B., "Stability and Failure of Composite Laminates With Various Shaped Cutouts under Combined In-Plane Loads", Composites: Part B, Vol. 43, No. 2, pp. 142-149, 2011.
  18. Lopatina, A.V., and Morozov, E.V., "Buckling of a Uniformly Compressed Rectangular SSCF Composite Sandwich Plate", Composite Structures, Vol. 105, No. 1, pp. 108-115, 2013.
  19. Malekzadeh Fard, K., Ebrahimi, M., Nazari, A. and Irani, S., "Buckling Analysis of Composite Sandwich Panel With Symmetric FGM Core Using Improved High-order Theory", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 8, No. 1, pp. 55-70, 2012 (in Persian).
  20. Mozaffari, A., and Jafari, H., "Investigation of the Effective Parameters on Buckling Load of FML Cylindrical Panel Using FSDT Shells Theory", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 6, No. 4, pp. 95-104, 2010 (in Persian).
  21. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials - Designation D3039", ASTM International, West Conshohocken, 2000.
  22. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile