

## بررسی و تحلیل اثر تقویت کننده های طولی بر بار کمانشی پوسته کامپوزیتی گرافیت-اپوکسی

امیر محمد دهقانی<sup>۱\*</sup>، اعظم قاسمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران Amir.de69@yahoo.com

شماره تماس : ۰۹۱۳۲۸۸۵۳۷۵

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران A\_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir

امیر محمد دهقانی (Amir Mohamad Dehghani) دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

اعظم قاسمی (Azam Ghassemi) دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

### چکیده

پوسته های تقویت شده به عنوان عنصر سازه ای در صنایع دریایی، هوافضا و نظامی شناخته شده می باشند. به دلیل اینکه اینگونه سازه ها در محدوده سازه های جدار نازک قرار می گیرند، تحلیل کمانشی آن ها یکی از معیارهای مهم طراحی محسوب می شود. هدف از مقاله حاضر بررسی تاثیر نوع، تعداد و آرایش های مختلف تقویت کننده ها و همچنین بررسی اثر تعداد لایه ها در صفحه کامپوزیتی و تقویت کننده ها، بر بار بحرانی کمانشی می باشد. ماده در نظر گرفته شده از جنس گرافیت - اپوکسی است که در پوسته و تقویت کننده ها یکسان می باشد. شرایط مرزی برای پوسته کامپوزیتی به صورت یک سرگیردار فرض شده که طرف مقابل آن در معرض بارگذاری لبه ای می باشد. طبق تحلیل های صورت گرفته مشخص گردید افزایش تعداد لایه های صفحات تقویتی تاثیر بیشتری بر افزایش بار کمانش نسبت به افزایش تعداد لایه های ورق اصلی دارد. همچنین چیدمان متقارن تقویتی ها بسیار بهتر از متمرکز کردن آنها در وسط ورق است. در ضمن تقویتی ها با سطح مقطع T شکل موثرتر از مستطیلی شکل است.

**کلمات کلیدی:** تقویت کننده، بار بحرانی کمانشی، پوسته کامپوزیتی، تعداد لایه، چیدمان تقویت کننده ها

## ۱- مقدمه

استفاده گسترده و روز افزون از مواد مرکب در چند دهه اخیر پیش بینی های قبلی را در ظهور این مواد به عنوان رقیبی جدی برای مواد سنتی محقق کرده است. یکی از مباحث مهم در خصوص پوسته های استوانه ای، مخروطی و مستطیلی و... وزن این سازه ها می باشد، که باید تلاش شود تا حد امکان کم شود. بدین منظور استفاده از مواد کامپوزیتی به سرعت در حال گسترش است و شاید سرعت این کاربردها بیش از پیش بینی ها نیز باشد. خواص مناسب، که به طور عمده در نسبت های بالای مقاومت به وزن، سفتی به وزن و نیز خواص ویژه و ممتاز محیطی همچون مقاومت در مقابل خوردگی و دماهای بسیار بالا خلاصه می شوند، مواد مرکب را به عنوان جایگزینی مناسب در بسیاری از مصارف روزمره مطرح کرده اند. پوسته های تقویت شده با هندسه های مختلف، با توجه به کاربردهای خاص خود به عنوان عنصر سازه ای، در صنایع نظامی، دریایی، هوافضا و... شناخته شده می باشند. لذا با توجه به اهمیت کاربرد این سازه ها تحلیل کمانش آن ها معیار مهمی محسوب می شود. بنابراین تاکنون کوشش زیادی صورت گرفته که بتوان تا حد امکان بار بحرانی کمانشی این سازه ها را افزایش داد. عمده راه مقابله برای جلوگیری از کمانش پوسته های کامپوزیتی اعمال تقویت کننده ها به بدنه آن ها می باشد. یکی دیگر از خواص اعمال تقویت کننده ها کاهش وزن سازه ها می باشد که این امر در پارامتر طراحی بسیار خوشایند خواهد بود. پس می توان اظهار داشت که تقویت کننده ها باعث کاهش وزن پوسته در یک بار مشخص اعمالی خواهند بود. در سال ۱۹۹۵ اسرینیواسان و همکاران [۱] اقدام به مطالعه ای اثر مواد غیر خطی بروی کمانش و پس کمانش صفحات و پوسته های کامپوزیتی لمینت در مقابل بارهای مکانیکی کردند. آن ها روش تحلیلی خود را بر پایه روش اصلاح شده ریکس پایه گذاری نمودند. در سال ۱۹۹۷ سریده هاران و آلبرت [۲] به بررسی مدل های عددی کمانش استوانه های تقویت شده پرداختند. برای بررسی کمانش استوانه های تقویت شده روش های مختلفی مورد استفاده قرار گرفت و کدهای کامپیوتری به منظور محاسبه بار کمانش تهیه شد و نتایج بدست آمد. نرم افزارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل بوسور<sup>۱</sup> و آباکوس<sup>۲</sup> بود که نتایج حاصل از آن ها با کدهای کامپیوتری مورد مقایسه واقع شد. در سال ۲۰۰۲ جواهری و اسلامی [۳] تحقیقات تحلیلی خود را درباره کمانش صفحات کامپوزیتی تابعی تحت نیروهای فشاری صفحه ای شروع کردند. معادلات و روابط پایداری صفحات کامپوزیتی بر اساس تئوری کلاسیک صفحات استخراج شد. در سال ۲۰۰۳ وودسنبت و همکاران [۴] به طراحی بهینه پنل های<sup>۳</sup> کامپوزیتی تقویت شده به منظور افزایش بار بحرانی کمانشی پرداختند. آن ها پژوهش خود را بر پایه سه روش تجربی، تحلیلی و عددی پایه گذاری نمودند. در حل تحلیلی، نیروهای کمانشی توسط روش ریلی ریتز<sup>۴</sup> بدست آمدند و همچنین کلیه نیروهای وارد بر تقویت کننده های ایزوگرید نیز بدست آمد. در سال ۲۰۰۶ زیمرمان و همکاران [۵] به تحقیق تجربی و عددی در مورد کمانش و پس کمانش پنل های تقویت شده مستطیلی انحنادار پرداختند. آن ها با استفاده از حالت های مختلف استرینگرها، بار کمانش را بدست آوردند و به بررسی بهترین حالت ممکن پرداختند. برای شبیه سازی عددی از نرم افزار آباکوس استاندارد استفاده کردند و المان S4R نیز در این تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۲۰۰۸ شوفرین و همکاران [۶] کمانش صفحات لمینتی را با شرایط مرزی ساده و گیردار، تحت ترکیب بارهای کششی، فشاری و برشی مورد بررسی قرار دادند. آن ها از روش نیمه تحلیلی برای بدست آوردن کمانش و پس کمانش صفحات مستطیلی استفاده کردند و روابط خود را بر اساس مدل کانتورویچ پایه گذاری نمودند. روابط تحلیلی بدست آمده با استفاده از نرم افزار متلب<sup>۵</sup> حل شد و همچنین در ادامه برای تحلیل عددی از نرم افزار المان محدود انسیس<sup>۶</sup> بهره برده شد. در سال ۲۰۰۹ قاسمی توتشامی و جعفری [۷] به بررسی اثر پارامترهای مختلف تقویت کننده های رینگ و استرینگر بر روی بار کمانش پوسته استوانه ای کامپوزیتی پرداختند. ماده کامپوزیتی مورد استفاده لمینت و از جنس کربن/اپوکسی

<sup>1</sup>Bosore<sup>2</sup>Abaqus<sup>3</sup>Panel<sup>4</sup>RilyRithz<sup>5</sup>Matlab<sup>6</sup>Ansys

با تعداد لایه ۳ و زوایای ۳۰/۹۰/۳۰ انتخاب شد. در سال ۲۰۱۰ پاندا و راماکاندرا [۸] کمانش صفحات مستطیلی با شرایط مرزی مختلف، تحت بارگذاری غیر یکنواخت صفحه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به دو روش تحلیلی و عددی، به انجام پژوهش خود پرداختند و به منظور اطمینان از نتایج بدست آمده، تحقیقات قبلی نیز مورد مقایسه و بررسی واقع شد. حل عددی را توسط نرم‌افزار المان محدود انسیس انجام دادند و به منظور المان‌بندی، از المان پوسته‌ای ۹۳ با وجود ۸ گره و ۶ درجه آزادی در هر گره استفاده کردند. در سال ۲۰۱۰ ماریسینوسکی [۹] به تحقیق در مورد کمانش پوسته‌های استوانه‌ای طویل تحت فشار محوری پرداخت. پژوهش صورت گرفته با استفاده از سه روش تحلیلی، عددی و تجربی انجام شد که در حل عددی از نرم‌افزار المان محدود Cosmos/M بهره برده شد. در سال ۲۰۱۱ هانگ و همکاران [۱۰] رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تابعی<sup>۱</sup> را تحت بار خمشی خالص مورد پژوهش و بررسی قرار دادند. شرایط مرزی را برای استوانه به صورت تکیه‌گاهی ساده فرض کردند و بار اعمالی را نیز به صورت غیر یکنواخت در نظر گرفتند. در سال ۲۰۱۳ کوبرن و همکاران [۱۱] تحلیل کمانش دو پنل تقویت شده زاویه دار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها شرایط تکیه‌گاهی را ساده در نظر گرفته و برای حل تحلیلی مساله از روش ریلی ریتز بهره بردند. به منظور مقایسه نتایج و تعیین صحت آن‌ها به کمک روش حل عددی، از نرم‌افزار تحلیلگر آباکوس استفاده کردند. در انتخاب نوع المان برای پوسته از المان S4R و برای تقویت کننده‌ها نیز از المان S4 استفاده شد. در ادامه نتایج بدست آمده توسط حل عددی و تحلیلی با یکدیگر مقایسه شد، که نتایج حاکی از خطایی حدود ۲ تا ۳ درصد برای کمانش محلی و ۳ تا ۱۰ درصد برای کمانش کلی بود. در سال ۲۰۱۴ چن و کیو [۱۲] به تحلیل پس کمانش صفحات کامپوزیتی تحت ترکیب نیروهای فشاری و برشی با استفاده از روش تفاضل محدود پرداختند. ماده کامپوزیتی مورد نظر کربن/اپوکسی در نظر گرفته شد و لایه‌ها نیز با زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ چیده شد. به منظور تحلیل عددی از روش المان محدود استفاده شد که این کار به کمک نرم افزار تحلیلگر آباکوس انجام شد و المان‌بندی نیز توسط المان S4R صورت پذیرفت. در نهایت نتایج تحلیل تفاضل محدود با نتایج حاصل از حل عددی نرم‌افزار اعتبارسنجی شد.

در این پژوهش با اعمال تقویت‌کننده‌ها به پوسته به منظور افزایش بار بحرانی، چندین وضعیت تقویت کننده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا نوع آنها به دو صورت مستطیلی و T شکل مقایسه شده و در ادامه افزایش و سپس کاهش تعداد لایه‌های تقویتی‌ها نسبت به صفحه اصلی نیز بررسی گردیده است. همچنین چندین چیدمان تقویتی‌ها روی صفحه اصلی مورد مقایسه قرار گرفته که نتایج در ادامه ارائه گردیده است.

## ۲- مدل‌سازی المان محدود

در مقاله حاضر تحلیل انجام شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت گرفته است. مقادیر بارهای بحرانی کمانشی در حالات مختلف تقویت کننده‌ها بدست آمده و بهترین حالات ارائه شده است. صفحه کامپوزیتی مورد نظر با ابعاد طول و عرض ۱ متر در نظر گرفته شده که مدل سازی آن بصورت پوسته انجام شده است. ماده مورد استفاده گرافیت-اپوکسی می‌باشد که خواص آن در جدول ۱ آمده است. برای پوسته کامپوزیتی ۱۲ لایه با زوایای (45/-45/-45/45/0/90) و همچنین برای تقویت کننده‌ها ۱۰ لایه با زوایای لایه‌چینی (45/-45/-45/45/0) بصورت متقارن فرض شده است. لازم به ذکر است که ضخامت هر لایه ۱.۲۵ میلی‌متر می‌باشد. به منظور المان‌بندی پوسته کامپوزیتی از المان S4R که هم برای صفحات ضخیم و نازک مناسب می‌باشد، استفاده شده است.

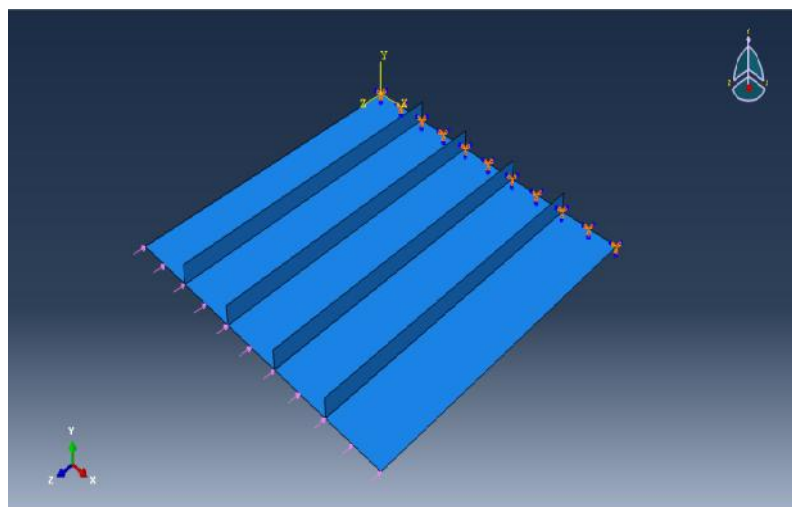
<sup>1</sup>Functionally graded Material

جدول (۱) خواص مواد مورد استفاده در پوسته کامپوزیتی

$V_{21}$	$V_{12}$	( $\text{kg/m}^3$ )	$G_{12}$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$E_1$ (MPa)
۰.۰۳۷۸	۰.۳۸۰۰	۱۵۲۲۰۰۰۰	۶۴۱۰	۱۳۰۰۰	۱۳۱۰۰۰

## ۲-۱- شرایط مرزی و بارگذاری

صفحه کامپوزیتی مدل شده در نرم افزار همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از لبه فوقانی دارای شرایط مرزی کاملاً گیردار می باشد و همچنین از سمت مقابل نیرویی معادل ۱ نیوتن بر متر به لبه پوسته وارد می شود و نوع بارگذاری در نرم افزار، نیروی لبه ای می باشد.



شکل (۱) شرایط مرزی و نوع بارگذاری پوسته کامپوزیتی

## ۲-۲- تقویت کننده ها و ابعاد آن ها

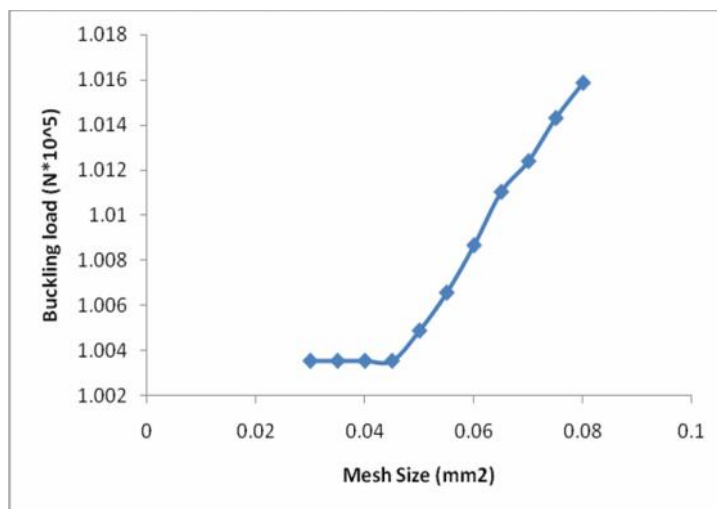
همان طور که گفته شد عمده راه مقابله با کماتش پوسته ها افزودن تقویت کننده ها به بدنه آن ها می باشد. در این پژوهش مواردی که مورد بررسی قرار خواهند گرفت شامل : ۱- تعداد تقویت کننده ها ۲- نوع سطح مقطع ۳- نحوه آرایش تقویت کننده ها می باشد. مشخصات تقویت کننده های در نظر گرفته شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲) ابعاد تقویت کننده ها

نوع تقویت کننده	طول (متر)	ضخامت هر لایه (متر)	ارتفاع (متر)	تعداد لایه
مستطیلی	۱	۰.۰۱۲۵	۰.۰۵	۱۰
T شکل	۱	۰.۰۱۲۵	۰.۰۵	۱۰

## ۲-۳- بررسی همگرایی مش بندی

المان مورد استفاده برای پوسته بصورت مربعی انتخاب شد که حساسیت به سایز مش بندی برای انتخاب مش مناسب در این مرحله مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا المان هایی با اندازه  $80 \times 80$  میلیمتر مربع انتخاب شد، سپس ابعاد المان کاهش یافت تا اینکه نتایج حاصل به عدد خاصی میل کردند و همگرا شدند که نتیجه آن انتخاب المان مربعی با اندازه  $30 \times 30$  میلیمتر مربع بود. در شکل شماره ۲ مقایسه ابعاد المان ها با نتایج حاصل ارائه شده است.



شکل (۲) حساسیت به سایز مش بندی

### ۳- بررسی و مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر روی بار بحرانی

با توجه به موارد ذکر شده، در این مرحله با استفاده از جداول و نمودارهای مختلف به مقایسه اثر پارامترهایی همچون تعداد تقویت کننده‌ها، تعداد لایه‌ها، نوع تقویت کننده‌ها، زاویه چینش آن‌ها و نیز آرایش تقویت کننده‌ها خواهیم پرداخت.

### ۳-۱- بررسی اثر تعداد و نوع تقویت کننده بر روی بار کمانشی

به منظور بررسی میزان افزایش بار بحرانی کمانشی پوسته کامپوزیتی، دو نوع تقویت کننده T شکل و مستطیلی به پوسته اعمال شده و این در حالی است که فواصل بین تقویت کننده‌ها یکسان می‌باشد. در ادامه در چهار حالت با تعداد مختلف، تقویت کننده‌ها به پوسته اعمال شد و نتایج بدست آمدند. نتایج حاصل بیانگر افزایش بیشتر میزان بار بحرانی کمانشی پوسته کامپوزیتی با تقویت کننده‌های T شکل نسبت به مستطیلی بود.

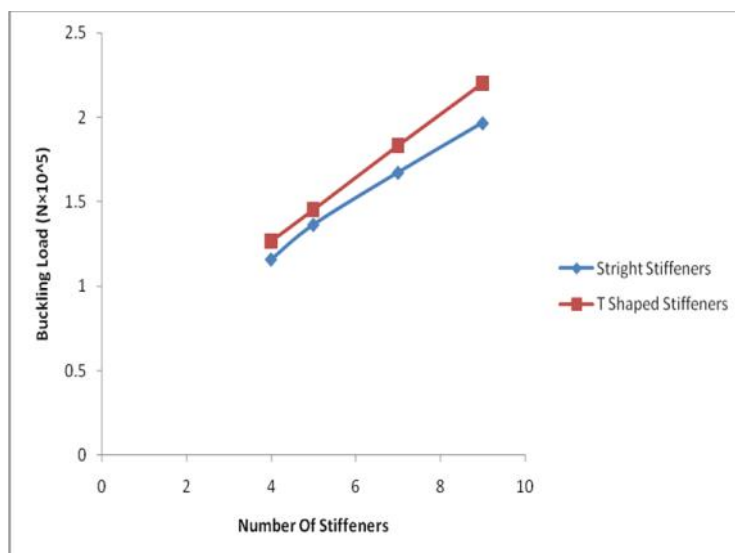
جدول (۳) بار بحرانی کمانشی با اعمال تقویت کننده‌های مستطیلی

فاصله اولین تقویت کننده از لبه (متر)	فواصل بین تقویت کننده‌ها (متر)	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن × ۱۰ <sup>۵</sup> )	تعداد تقویت کننده‌ها
۰.۲	۰.۲	۱.۱۵۹	۴
۰.۱	۰.۲	۱.۳۶۴	۵
۰.۱۲۵	۰.۱۲۵	۱.۶۷۳	۷
۰.۱	۰.۱	۱.۹۶۶	۹

جدول (۴) بار بحرانی کمانشی با اعمال تقویت کننده های T شکل

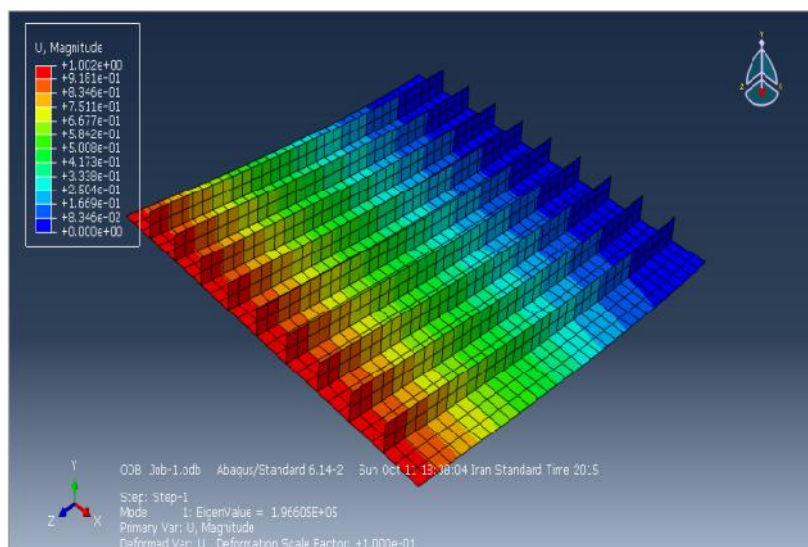
تعداد تقویت کننده ها	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	فاصله بین تقویت کننده ها (متر)	فاصله اولین تقویت کننده از لبه (متر)
۴	۱.۲۶۸	۰.۱۵	۰.۱۷۵
۵	۱.۴۵۴	۰.۱۵	۰.۰۷۵
۷	۱.۸۳۳	۰.۰۷۵	۰.۱
۹	۲.۲۰۱	۰.۰۵	۰.۰۷۵

به منظور بررسی و مقایسه هرچه بهتر نتایج جداول فوق، نمودار شکل ۳ ارائه شده است که اثر بیشتر تقویت کننده های T شکل را به وضوح مشخص می کند.

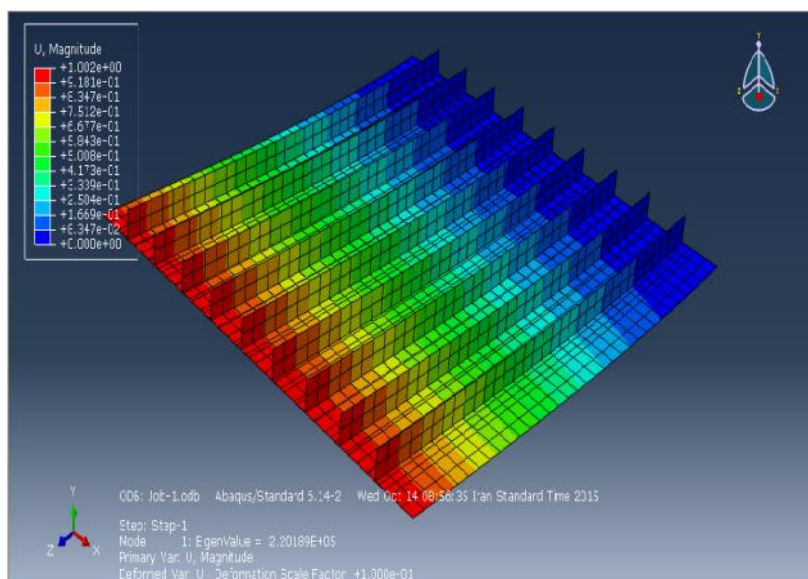


شکل (۳) نمودار اثر تعداد و نوع تقویت کننده ها بر بار کمانشی

در ادامه به عنوان نمونه تصویر کانتور مودهای اول پوسته های کامپوزیتی با تعداد ۹ تقویت کننده مستطیلی و T شکل آورده شده است.



شکل (۴) مود اول پوسته کامپوزیتی با ۹ تقویت کننده مستطیلی



شکل (۵) مود اول پوسته کامپوزیتی با ۹ تقویت کننده T شکل

### ۳-۲- بررسی اثر کاهش تعداد لایه های پوسته بر بار کمانشی

کاهش تعداد لایه های پوسته سبب سبک تر شدن سازه مورد نظر خواهد شد هر چند این امر تا زمانی که منجر به شکست سازه نشود مقبول خواهد بود. در تحلیل صورت گرفته هدف مقایسه بین کاهش میزان بار بحرانی کمانشی با کاهش لایه های پوسته و تقویت کننده خواهد بود که قسمت دوم در مرحله بعدی بررسی شده است. تحلیل انجام شده فقط برای پوسته های با تعداد تقویت

کننده های ۷ و ۹ تایی انجام شده است. در ادامه به منظور بررسی اثر زاویه چینش لایه ها نیز نتایج در دو حالت مختلف زوایا مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول (۵) اثر کاهش تعداد لایه های پوسته بر بار کمانشی با ۷ تقویت کننده (۴۵/۴۵-۰/)

تعداد لایه کاهش یافته	زاویه لایه ها	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	تقویت کننده T شکل
۲	۴۵	۱.۳۷۱	۱.۵۸۳	مستطیلی
۴	-۴۵/۴۵	۱.۰۹۳	۱.۳۷۳	
۶	۰/-۴۵/۴۵	۰.۶۵۱	۱.۰۸۴	

جدول (۶) اثر کاهش تعداد لایه های پوسته بر بار کمانشی با ۹ تقویت کننده (۴۵/۴۵-۰/)

تعداد لایه کاهش یافته	زاویه لایه ها	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	تقویت کننده T شکل
۲	۴۵	۱.۶۱۲	۱.۹۱۹	مستطیلی
۴	-۴۵/۴۵	۱.۲۸۴	۱.۶۷۸	
۶	۰/-۴۵/۴۵	۰.۷۶۲	۱.۳۵۰	

جدول (۷) اثر کاهش تعداد لایه های پوسته بر بار کمانشی با ۷ تقویت کننده (۹۰/۴۵-۰/)

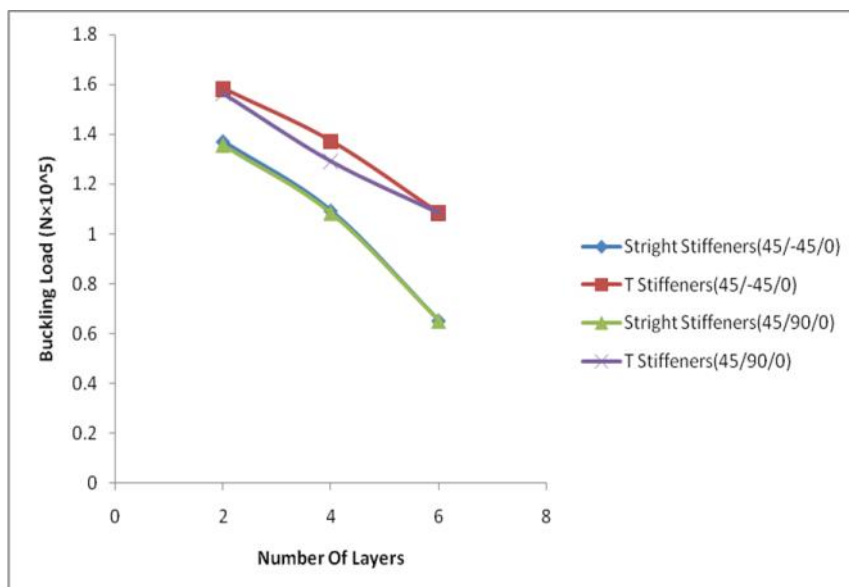
تعداد لایه کاهش یافته	زاویه لایه ها	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	تقویت کننده T شکل
۲	۹۰	۱.۳۵۸	۱.۵۶۶	مستطیلی
۴	۰/۹۰	۱.۰۸۴	۱.۲۹۲	
۶	۰/۹۰/۴۵	۰.۶۵۵	۱.۰۸۳	



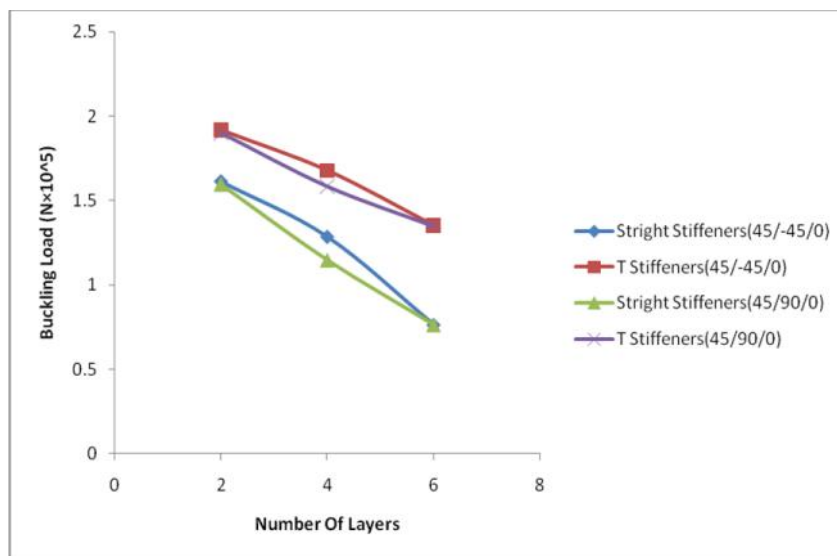
جدول (۸) اثر کاهش تعداد لایه های پوسته بر بار کمانشی با ۹ تقویت کننده (۰/۹۰/۴۵)

تعداد لایه کاهش یافته	زاویه لایه ها	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن $\times 10^5$ )	تقویت کننده T شکل مستطیلی
۲	۹۰	۱.۵۹۶	۱.۸۹۸	
۴	۰/۹۰	۱.۱۴۵	۱.۵۸۳	
۶	۰/۹۰/۴۵	۰.۷۶۷	۱.۳۴۸	

در ادامه برای نمایش و مقایسه بهتر، نتایج در دو نمودار مختلف بر اساس تعداد تقویت کننده ها ارائه شده است.



شکل (۶) نمودار تاثیر کاهش تعداد لایه های پوسته با ۷ تقویت کننده



شکل (۷) نمودار تاثیر کاهش تعداد لایه های پوسته با ۹ تقویت کننده

### ۳-۳- بررسی اثر کاهش تعداد لایه های تقویت کننده بر بار کمانشی

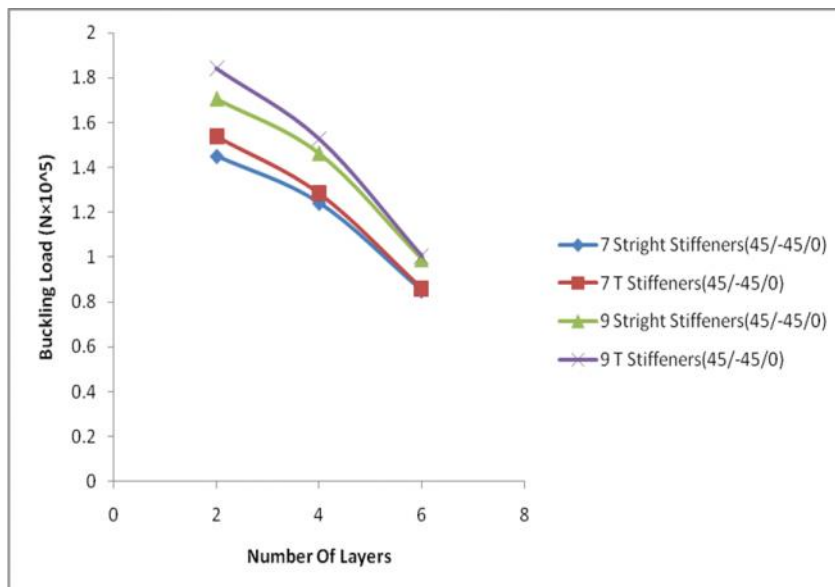
در این مرحله با کاهش تعداد لایه های تقویت کننده میزان بار بحرانی کمانشی را بدست آوردیم که تاثیر آن نسبت به کاهش تعداد لایه های پوسته به مراتب بیشتر بود و این یعنی تاثیر لایه ها در تقویت کننده ها بسیار بیشتر از پوسته خواهد بود. لازم به ذکر است که در این مرحله صرفا لایه ها با زوایای (۰/-۴۵/۴۵) مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول (۹) اثر کاهش تعداد لایه های تقویت کننده بر بار کمانشی با ۷ تقویت کننده

تعداد لایه کاهش یافته	زاویه لایه ها	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن × ۱۰ <sup>۵</sup> )	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن × ۱۰ <sup>۵</sup> )	تقویت کننده T شکل مستطیلی
۲	۴۵	۱.۴۵۱	۱.۵۴۰	
۴	-۴۵/۴۵	۱.۲۴۲	۱.۲۸۵	
۶	۰/-۴۵/۴۵	۰.۸۵۰	۰.۸۵۹	

جدول (۱۰) اثر کاهش تعداد لایه های تقویت کننده بر بار کمانشی با ۹ تقویت کننده

تعداد لایه کاهش یافته	زاویه لایه ها	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن × ۱۰ <sup>۵</sup> )	بار بحرانی کمانشی در مود اول (نیوتن × ۱۰ <sup>۵</sup> )	تقویت کننده T شکل مستطیلی
۲	۴۵	۱.۷۰۸	۱.۸۴۱	
۴	-۴۵/۴۵	۱.۴۶۴	۱.۵۲۷	
۶	۰/-۴۵/۴۵	۰.۹۹۱	۱.۰۰۴	



شکل (۸) نمودار تاثیر کاهش تعداد لایه های تقویت کننده

### ۳-۴- بررسی اثر چیدمان تقویت کننده ها بر بار بحرانی کمانشی

به منظور بررسی اثر نحوه توزیع استرینگرها بر روی پوسته فقط حالت تقویت کننده های مستطیلی با تعداد ۷ و ۹ تقویت کننده بررسی شد که به دلیل نوع بارگذاری یکنواخت در لبه پوسته نتایج حاصل کمتر از حالت متقارن بدست آمدند و به همین جهت برای حالات مختلف دیگر روند تحلیل و بررسی ادامه نیافت.

جدول (۱۱) بررسی اثر نحوه چیدمان تقویت کننده های مستطیلی

تعداد تقویت کننده	تمرکز در میانه (نیوتن $\times 10^5$ )	تمرکز در لبه ها (نیوتن $\times 10^5$ )	حالت متقارن (نیوتن $\times 10^5$ )
۷	۱.۵۷۹	۱.۵۵۳	۱.۶۷۳
۹	۱.۸۱۶	۱.۸۲۴	۱.۹۶۶

### ۴- نتایج

با توجه به بررسی های صورت گرفته بار بحرانی در حالات مختلف تقویت کننده ها متغیر خواهد بود و مواردی شامل: تعداد تقویت کننده ها، هندسه سطح مقطع آن ها، چیدمان و... مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند که در نهایت با توجه به شرایط فرض شده حالتی که تقویت کننده ها بصورت T شکل باشند و چیدمان آن ها بصورت متقارن صورت گیرد بهترین بازده را خواهد داشت و اما در مورد افزایش تعداد آن ها نیز تا جایی که شرایط اجازه دهند به افزایش بار بحرانی کمک خواهند کرد. نتایج کلی بدست آمده پس از بررسی و مقایسه جداول و نمودارهای مختلف به طور خلاصه در قسمت بعدی ارائه شده است.

### ۵- نتیجه گیری و جمع بندی

با توجه به تحلیل های صورت گرفته نتایج زیر را می توان ارائه نمود:

- ✓ تقویت کننده‌های طولی سبب افزایش بار بحرانی کمانشی پوسته‌ها می‌شود.
- ✓ هرچه تعداد استرینگرها افزایش یابد، بار بحرانی به طرز قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند.
- ✓ با توجه به استفاده از دو نوع هندسه مختلف مستطیلی و T شکل در تقویت کننده‌ها، نتیجه حاصل، حاکی از اثر بیشتر تقویت کننده‌های T شکل بر افزایش بار بحرانی کمانشی بود.
- ✓ پس از بررسی کاهش تعداد لایه‌های پوسته با زوایای مختلف مشخص شد که زاویه ۹۰ درجه نسبت به ۴۵ درجه تاثیر بیشتری در کاهش بار بحرانی دارد و دلیل آن صرفاً بخاطر چینش الیاف در راستای بارگذاری در حالت ۹۰ درجه می‌باشد.
- ✓ پس از کاهش تعداد لایه‌های تقویت کننده‌ها و بدست آمدن نتایج مشخص شد که تاثیر کاهش لایه‌های تقویت کننده خیلی بیشتر نسبت به پوسته‌ها خواهد بود و بار بحرانی در این حالت بیشتر کاهش خواهد داشت.
- ✓ به دلیل بارگذاری متقارن در لبه پوسته کامپوزیتی پس از تغییر در چینش تقویت کننده‌ها و تمرکزشان در لبه و میانه با کاهش بار کمانشی روبرو خواهیم شد.

#### ۶- فهرست منابع

- [۷] قاسمی توتشامی، برومند...، جعفری، علی اصغر، ۱۳۸۷ "بررسی اثر تقویت کننده‌ها بر بار کمانش پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی"، نشریه بین-المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۳، صفحه ۱۳۹-۱۴۹.
- [1] Srinivasan, S., Wang, S.S., Hu, T.U., Hajali, R., 1995. "Effect of material nonlinearity on buckling and postbuckling of fiber composite laminated plates and cylindrical shells". *Composite Structures*, vol. 33, pp. 7-15.
- [2] Sridharan, S., Alberts, J., 1997. "Numerical modeling of buckling of Ring Stiffened Cylinders", *AIAA Journal*, Vol. 35, pp. 187-195.
- [3] Javaheri, R., Eslami, M.R., 2002. "Buckling of Functionally Graded Plates under In-plane Compressive Loading", vol. 82, pp. 277-283.
- [4] Wodesenbet, E., Kidan, S., Pang, S.S., 2003. "Optimization for buckling loads of grid stiffened composite panels, *Composite Structures*", *Composite Structures*, vol. 60, pp. 159-169.
- [5] Zimmermann, R., Klein, H., Kling, A., 2006. "Buckling and postbuckling of stringer stiffened fibre composite curved panels – Tests and computations", *Composite Structures*, vol. 73, pp. 150-161.
- [6] Shufrin, I., Rabinovitch, O., Eisenberger, M., 2008. "Buckling of laminated plates with general boundary conditions under combined compression, tension, and shear—A semi-analytical solution", *Thin-Walled Structures*, vol. 46, pp. 925-938.
- [8] Panda, S.K., Ramachandra, L.S., 2010. "Buckling of rectangular plates with various boundary conditions loaded by non-uniform inplane loads", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 52, pp. 819-828.
- [9] Marcinowski, J., 2010. "Buckling Resistance Assessment of a Slender Cylindrical Shell Axially Compressed", *Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 14, pp. 309-316.
- [10] Huang, H., Han, Q., Wei, D., 2011. "Buckling of FGM cylindrical shells subjected to pure bending load", *Composite Structures*, vol. 93, pp. 2945-2952.
- [11] Coburn, B.H., Wu, Z., Weaver, P., 2013. "Buckling analysis of stiffened variable angle tow panels", *Composite Structures*, vol. 11, pp. 259-270.
- [12] Chen, Q., Qiao, P., 2014. "Post-buckling analysis of composite plates under combined compression and shear loading using finite strip method", *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 83, pp. 33-42.