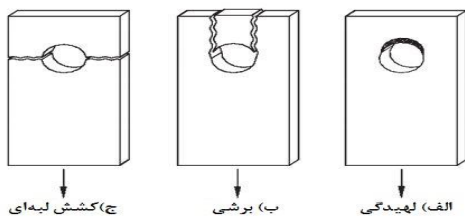


ارزیابی پارامترهای مؤثر بر استحکام لهدگی در اتصالات پیچی با ساختار گلاره به روش اجزای محدود

محمود ذبیح پور^{۱*}، حبیب رضائی قهرودی^۲ و میثم خاوندکار^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۶۰/۲۷	در تحقیق حاضر به شناسایی مکانیزم‌های واماندگی تنش لهدگی در اتصالات پیچی دوطرفه در ورقه‌های گلاره پرداخته می‌شود و تلاش می‌شود به کمک تکنیک اجزای محدود، از منظر پتانسیل ناحیه تخریب و معیارهای مناسب مربوطه، برای ساختار معرفی شده گلاره، تحلیل جامعی ارائه دهد. ورق گلاره بر طبق معیارهای استاندارد تست و ابعاد و اندازه‌های استاندارد طراحی شده و در یک اتصال پیچی تعبیه می‌گردد، سپس کوپن تست متصل به دستگاه تست کشش شبیه‌سازی می‌شود. تأثیر پارامتر فاصله از لبه بر استحکام لهدگی در اتصالات پیچی با ساختار گلاره به همراه تغییر قطر پیچ بررسی می‌گردد. به منظور استخراج پارامترهای مرتبط با لهدگی، کوپن تست گلاره به روش اجزای محدود و در نرم‌افزار شبیه‌ساز آباکوس توسعه داده شد. نتایج ارزیابی‌ها، نشان می‌دهد رفتار لهدگی اتصال پیچی و همچنین استحکام متناظر، تا محدوده خاصی به فاصله از لبه در گلاره‌ها، تعداد لایه‌ها و نوع لایه چینی وابسته است و تأخیر قابل ملاحظه در واماندگی این ورق‌ها را موجب می‌گردد.
واژگان کلیدی: اتصالات پیچی، هیبرید، گلاره، روش اجزای محدود، لهدگی، معیار تخریب.	

۱- مقدمه
صورت ناگهانی روی می‌دهد، ولی مودهای لهدگی^۴ و برشی^۵ متمایل به واماندگی نرم می‌باشند [۸-۲].



شکل (۱) - مدل شماتیک گسیختگی در اتصالات پیچی

ژانگ و کاوب، اثر فواصل سوراخ از لبه ورق، عرض ورق، گشتاور پیچ‌های اتصال، لایه‌چینی‌های مختلف و تعداد سوراخ‌های اتصالات را بررسی و آزمایش کردند و به این

پژوهش‌های بسیاری با موضوع طراحی بهینه از منظر تنش لهدگی برای اتصالات دولبه روی هم در ورق‌های هیبریدی موسوم به گلاره انجام شده است. عبدالله و حسنافزایش تعداد لایه‌های کامپوزیتی بین گلاره‌ها را بررسی کرده‌اند و نشان دادند که افزایش لایه‌های کامپوزیتی موجب افزایش تنش لهدگی در اتصالات دولبه روی هم خواهد شد [۱]. تحقیقات نشان می‌دهد، گسیختگی در اتصالات مکانیکی کامپوزیتی در چند مورد مختلف بزرگ مقیاس^۲ روی می‌دهد. در شکل (۱)، مهمترین مودهایی که معمولاً اتفاق می‌افتد نمایش داده شده است. مود کشش لبه‌ای خالص^۳ به

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: zabihpoor@mut.ac.ir

۱. استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا

۲. کارشناسی‌ارشد مهندسی هوافضا، سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا

² Macroscopic

³ Net Tension

⁴ Bearing

⁵ Shear Out

پرداخته است که با نسبت‌های فاصله مختلف از لبه ورق مورد آزمون قرار گرفته است [۱۶].

بررسی تاریخچه نشان می‌دهد، اگرچه تحقیقات مرتبط دیگری نیز در این حوزه انجام شده است [۱۷-۲۵]، اما تاکنون، ارزیابی جامعی از پارامترهای مؤثر بر استحکام لهیدگی در اتصالات پیچی با ساختار گلاره به روش اجزای محدود ارائه نشده است. تحقیق حاضر، تلاش دارد به کمک تکنیک اجزاء محدود، از منظر پتانسیل ناحیه تخریب و معیارهای مناسب مربوطه، برای ساختار معرفی شده گلاره، تحلیل جامعی ارائه دهد.

۲- بیان مساله

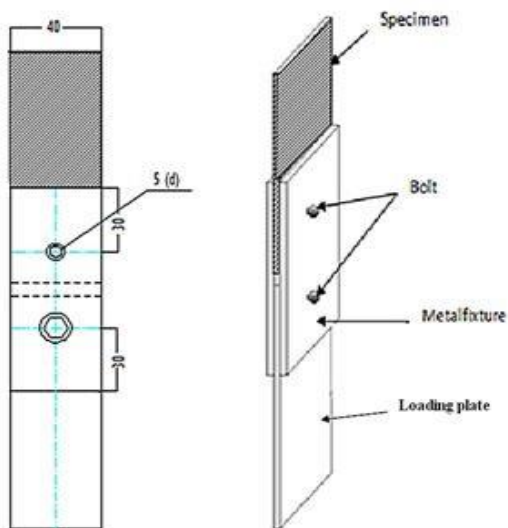
با گذر زمان و انجام تست‌های متفاوت روی این مواد کامپوزیتی مشخص شد، اگر چه این مواد در برابر بارگذاری استاتیکی رفتار بسیار مطلوبی را از خود نشان می‌دهند ولی بارهای دینامیکی و ضربه‌ای می‌توانند آسیب جدی به آن وارد نماید و در برابر این‌گونه بارها این مواد، در مواردی رفتار ترد را از خود نمایش می‌دهند. استفاده از صفحات آلومینیومی در برابر ضربه در زمان‌های گذشته امری بسیار مرسوم و تا حدی قابل توجیه بود. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ارزانی و همچنین خصوصیات مکانیکی خوب، استفاده‌های بسیار زیادی در صنایع مختلف از جمله صنایع نظامی دارند، لذا این نیاز احساس می‌شد که موادی ساخته شوند نه تنها در برابر بارگذاری استاتیکی بلکه در برابر بارگذاری خستگی و ضربه‌ای نیز مقاومت بالایی را داشته باشد. به همین سبب استفاده از مواد کامپوزیتی- فلزی (گلاره)، که به‌طور هم‌زمان دو نقش ترد بودن و چکش خوار بودن ماده را در یک ترکیب بازی خواهند کرد، مد نظر طراحان ساختارهای سازه و مواد قرار گرفت.

در این پژوهش یک اتصال پیچی با ساختار گلاره مد نظر قرار گرفت. بخش‌میان‌ی گلاره با یک لایه‌چینی کامپوزیتی و بخش رویه‌ها با ورق‌های آلومینیوم پوشانده شده است. در این تحقیق، لایه‌چینی کامپوزیتی از ورق‌های تک جهته فایبرگلاس/رزین اپوکسی با نسبت ترکیب ۴۰/۶۰ استفاده شده است. ساختار گلاره در شش حالت مختلف به جهت بررسی پارامترهای مؤثر در استحکام لهیدگی در اتصالات گلاره انتخاب می‌گردد، که در تمامی این شش حالت روکش‌های فلزی بالایی و پایینی از یک لایه ورق

نتایج دست‌یافتند که با افزایش فاصله سوراخ از لبه، تنش لهیدگی افزایش می‌یابد همچنین با افزایش عرض ورق، نسبت تنش لهیدگی افزایش خواهد داشت. با لایه‌چینی طولی الیاف در جهت کشش، تنش لهیدگی افزایش یافته و با افزایش گشتاور اتصالات پیچی نیز تنش لهیدگی، زیاد می‌گردد. همچنین با ایجاد یک سوراخ در راستای سوراخ اتصال و فاصله مناسب، می‌توان تنش لهیدگی را افزایش داد [۹]. جده و عثمان، سوراخ‌های دفاعی موسوم به سیستم سوراخ دفاعی^۱ (DHS) را بررسی کردند و به این نتیجه دست‌یافتند که فاصله سوراخ دفاعی و قطر آن از سوراخ اصلی، در افزایش تنش لهیدگی مؤثر است [۱۰]. اولمدو و سنتیوست، تأثیر واشر و گشتاور را برای اتصالات یک لبه بررسی کردند و یک معیار تخریب ارائه و آن را با معیار تخریب هشین مقایسه نمودند. علاوه بر آن، نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود را در کنار هم آورده و بررسی کردند [۱۱]. در ادامه، فلاح‌نژاد و اسکویی، به موضوع تعداد پیچ‌های اتصال‌دهنده و تأثیرگذاری آن بر تنش لهیدگی متمرکز شده‌اند و اثر افزایش عرض را در بالابردن تنش لهیدگی در اتصالات دو پیچه در مقایسه با یک پیچه تحلیل نمودند [۱۲]. دینکا و استفان، با افزایش ضخامت لایه‌های آلومینیوم و تغییر نوع کامپوزیت لایه و ماتریس میانی به بررسی کشش پرداخته، آن را با آلومینیوم تقویت‌نشده مقایسه کردند و آزمون خمش را نیز انجام دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که لایه‌های آلومینیوم تقویت‌شده با ورق‌های کربنی، بیشترین استحکام کششی را ایجاد می‌کنند [۱۳]. پاکدل، پارامترهای مهم و مؤثر بر تنش لهیدگی را در اتصالات یک‌لبه مطالعه کرده است. پارامترهای مهم این بررسی عبارتند از: قطر سوراخ، عرض ورق و فاصله از لبه، لایه‌چینی‌های مختلف، (گشتاور) پیچ‌های اتصال و بررسی مدهای تخریب پیش‌آمده [۱۴]. سینمازلیچ، در تحقیق خود به بررسی عوامل مؤثر بر تنش لهیدگی پرداخته است؛ عواملی مانند نوع بارگذاری، خواص مواد، ضریب اصطکاک، فاصله از لبه و نوع اتصال پیچی یا پینی. همچنین از ورق‌های فولادی در ساخت ورق‌های هیبریدی استفاده کرده و یک ساختار جدید ایجاد نمود که تنش لهیدگی را در آن‌ها بررسی و آزمون کرده است [۱۵]. در انتها، قنبری در پژوهش خود، به بررسی اثر گشتاور پیچ در اتصالات یک‌لبه روی هم

¹ Defense Hole System

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد، دو یا سه لایه کامپوزیتی تک جهته^۱ با چیدمان لایه‌ها به صورت [۰/۹۰] از جنس الیاف شیشه نوع ایی (E-Glass) و رزین اپوکسی/کامپوکسی (Kemapoxy) با اندازه‌های یکسان به ابعاد ۱۷۸×۴۰ میلی‌متر انتخاب گردیده‌است، که ضخامت هر کدام از دو لایه آلومینیوم ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت هر کدام از لایه کامپوزیتی ۰/۲۶۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین مقادیر استحکام تسلیم و نهایی آلومینیوم به ترتیب ۳۶۹ و ۸۱۴ مگاپاسکال انتخاب گردید. با هدف نزدیک‌تر شدن فرآیند شبیه‌سازی به حالت واقعی (آزمایش با دستگاه‌های تست کشش)، از دو صفحه از جنس تیتانیوم^۲ برای گرفتن ورق گلاره و پیچ و ایجاد کشش در آن، استفاده می‌گردد؛ مقادیر استحکام تسلیم و نهایی تیتانیوم به ترتیب ۹۰۷ و ۱۲۱۳ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. با توجه به آنکه دستگاه کشش از یک طرف ورق گلاره را مهار کرده و از طرف دیگر کشش را اعمال می‌کند، نیاز به یک صفحه انتقال دهنده نیروی کششی^۳ به ورق گلاره از جنس تیتانیوم است که از طریق فک‌های دستگاه به ورق‌های نگهدارنده و از طریق آنها اعمال نیرو به پیچ و ورق منتقل می‌گردد. شکل (۳)، نمای کلی قطعات مونتاژی به منظور تست کشش را نشان می‌دهد.



شکل (۳) - نمای مونتاژی قطعات به کار رفته در آزمون کشش (ابعاد به میلی‌متر)

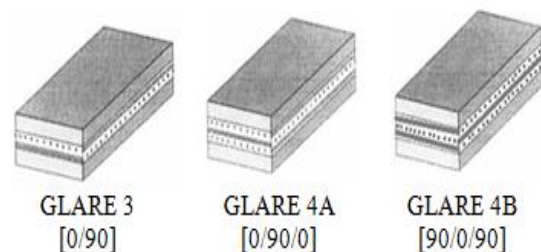
همچنین در جدول ۲، نام و شکل قطعات مدل شده به صورت جداگانه فهرست شده‌است.

آلومینیومی ۲۰۲۴ تی ۳ (Al 2024-T3)، ساخته شده‌است. در جدول ۱ شش حالت مختلف آزمون‌های کشش جهت ارزیابی استحکام لهیدگی را می‌توان مشاهده نمود.

جدول (۱) - شش حالت مختلف گلاره با تغییر در نحوه لایه‌چینی و قطر سوراخ و فاصله از لبه از سوراخ

شماره حالت	نوع گلاره	جهت تست کشش			حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم	حالت ششم
		فاصله از لبه (۱)	فاصله از لبه (۲)	فاصله از لبه (۳)						
۳	قطر پیچ (میلی‌متر)	E1 (میلی‌متر)	E2 (میلی‌متر)	E1 (میلی‌متر)	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۴A	۴B
۴A	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۴B	۴A
۴B	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۴A	۴B
۳	۶	۱۰	۱۵	۲۰	۲۰	۱۵	۱۰	۶	۴A	۴B
۴A	۶	۱۰	۱۵	۲۰	۲۰	۱۵	۱۰	۶	۴B	۴A
۴B	۶	۱۰	۱۵	۲۰	۲۰	۱۵	۱۰	۶	۴B	۴A

همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، یک حفره به قطر ۵ میلی‌متر در فاصله‌های $E = 10$ ، $E = 15$ و $E = 20$ میلی‌متر از لبه اتصال در گلاره ایجاد شده است؛ باید توجه داشت که یکی از اهداف این پژوهش، انتخاب طرح بهینه در اتصالات گلاره از نظر قطر پیچ به جهت جلوگیری از آسیب و تخریب‌های رایج در سازه‌های هوایی و فضایی می‌باشد. در محل اتصال نیز از یک پیچ فولادی به قطر ۵ میلی‌متر با مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ استفاده شده‌است. در ضمن گلاره را می‌توان بر اساس نحوه چیدمان لایه‌های لایه‌چینی کامپوزیتی در شکل (۲)، در سه نوع مختلف در نظر گرفت.



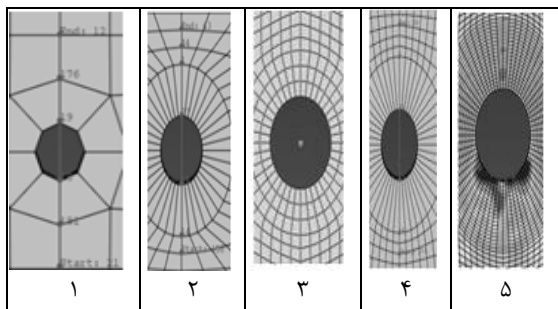
شکل (۲) - شماتیک چیدمان ورق‌های گلاره در سه مدل مختلف

³ Titanium Loading Plate

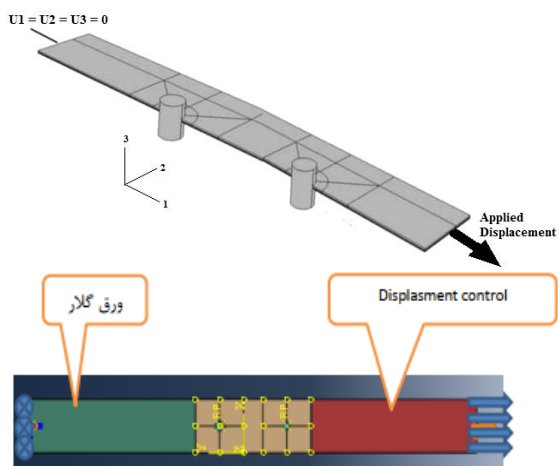
¹ Unidirectional

² Fix Plate Titanium

کامل استفاده می‌شود و توزیع تنش لهدیگی بر روی جداره سوراخ و بدنه پیچ به صورت یکنواخت فرض می‌گردد. مدل پیچ و ورق آلومینیوم با المان آجری یا Solid و مدل ورق کامپوزیت از نوع پوسته‌ای shell انتخاب شده‌است، در این مدل به دلیل محدودیت در مدل‌سازی تماس بدنه پیچ و سطح داخلی سوراخ متصل شونده در المان محدود، الزاماً سطح پیرو تماس، به جای سطح داخلی سوراخ، نقاط گره‌ای در اطراف سوراخ انتخاب می‌گردد. لذا با تغییر هندسی، توزیع تنش لهدیگی بر روی جداره سوراخ و بدنه پیچ تغییر می‌کند. جهت تحلیل شبکه‌بندی اجزای محدود به منظور همگرایی‌مش، تعدادی تحلیل همراه با تعداد المان‌های مختلف صورت گرفت؛ که در ابتدا یک تراکم مش‌بندی نسبتاً درشت بر اساس پیش‌فرض در نرم‌افزار انتخاب و سپس تحلیل شد، و در طی پنج مرحله با ریزتر کردن شبکه، مدل‌سازی تکرار گردید. در شکل (۴) پنج مرحله مش‌بندی را به‌طور واضح می‌توان مشاهده کرد. نتیجه نمودار همگرایی در بخش (۵-۳) و در شکل (۲۰) ارائه گردیده‌است.



شکل (۴) - نمایی از مش‌بندی اتصال در پنج حالت جهت بررسی همگرایی مش



شکل (۵) - تعریف بارگذاری

جدول ۲- قطعات مدل‌شده گلاره جهت تست کشش

شماره	نام قطعه	شکل ظاهری
۱	آلیاژ آلومینیوم T۳-۲۰۲۴	
۲	اتصال پیچ-مهره ۵ و ۶	
۳	لایه چینی پیش‌آغشته	
۴	صفحه تیتانیومی ثابت	
۵	صفحه تیتانیومی بارگذاری	

۳- مدل‌سازی اجزاء محدود

جهت تعیین پارامترهای مرتبط با لهدیگی، کوپن تست گلاره به‌روش اجزاء محدود و در نرم‌افزار شبیه‌ساز آباکوس توسعه داده‌شد. از المان پوسته‌ای (Shell) برای مش‌بندی لایه‌چینی کامپوزیتی و از المان توپر (Solid) برای مش‌بندی ورق‌های آلومینیوم استفاده گردیده و سایر قطعات، صلب در نظر گرفته شده‌اند. چیدمان لایه‌ها در نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض در راستای محور Z می‌باشد. به‌همین دلیل سطوح مدل در صفحه‌ی XY و در راستای Z صورت می‌پذیرد. همان‌طور که شکل (۳)، نمای کلی قطعات مونتاژی به منظور تست کشش را نشان می‌دهد، در این نوع اتصال، فرض اتصال اتکایی در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود و بدین معناست که از به‌کاربردن المان‌های تماسی و نیروی اصطکاک بین ورق‌ها خودداری شده‌است. در اتصال اتکایی، پیچ درون سوراخ قرار می‌گیرد و مهره بسته می‌شود؛ هنگامی که بار خارجی به پیچ وارد می‌گردد، قطعات اتصال تمایل به لغزش پیدا می‌کنند که در اثر آن، یک نیروی فشاری به لبه‌های اتصال وارد می‌شود و تبدیل به نیروی برشی در پیچ می‌گردد. بنابراین پیچ، فقط نیروی بین اعضای اتصال را منتقل می‌کند. در اتصالات اتکایی به محض وقوع لغزش بین ورق‌های اتصال، بدنه پیچ‌ها با جداره سوراخ تماس پیدا کرده و به آن فشار وارد می‌کنند که می‌توان این حالت را به صورت حالت Tie در نظر گرفت، برای محاسبه تنش لهدیگی در اتصالات پیچی از فرضیه خمیری

معمولاً از یک معیار محافظه کارانه و جامع استفاده می‌شود. این معیار در مواد و ساختارهای کامپوزیتی و ارتوتروپ (ناهمسان‌گرد)، تسای-هیل و در مواد فلزی (با فرض خواص ایزوتروپ)، معادل همسان‌گرد آن یعنی معیار وان‌مایسز می‌باشد.

جدول (۳) خواص مکانیکی مواد [۱] و [۲]

جنس ماده	مدول طولی (Gpa)	مدول عرضی (Gpa)	مدول برشی ۱-۲ (Gpa)	ضریب پواسون	مدول برشی ۱-۲ (Gpa)	مدول برشی ۲-۳ (Gpa)
آلومینیوم ۲۰۲۴ T۳	۷۰	۷۰	---	۰/۳۳	---	---
تیتانیوم الیاف شیشه - ای، تک چپته	۲۱۰	۲۱۰	۲۹/۲	۰/۳	---	---
رزین اپوکسی کامپوزیت پیش-آغشته	۲/۹۱	۲/۹۱	---	۰/۳۵	---	---
	۳۷/۹۶	۱۰/۲۶	۴/۴۳	۰/۲۹	۴/۴۳	۲/۹

جدول (۴) خواص مقاومتی مواد [۱] و [۲]

جنس ماده	مقاومت کششی طولی (MPa)	مقاومت کششی عرضی طولی (MPa)	مقاومت کششی عرضی (MPa)	مقاومت نهایی فشاری (MPa)	مقاومت نهایی فشاری (MPa)	مقاومت تسلیم (MPa)
آلومینیوم ۲۰۲۴ T۳	۸۱۴	---	---	---	---	۳۶۹
تیتانیوم الیاف شیشه - ای، تک چپته	۱۲۱۳	---	---	---	---	۹۰۷
رزین اپوکسی کامپوزیت پیش-آغشته	۵۵	۱۱۵	---	---	---	۳۴/۹
	۵۸۹/۷۸	۴۱۶/۳۹	۴۸/۶۸	---	---	۴۴/۲۷

در بررسی‌های دقیق‌تر در اجزاء فلزی یا همسان‌گرد یک ساختار ترکیبی در صورت وقوع رفتار نرم و توسعه قابل توجه ناحیه تسلیم حین بارگذاری مانند وضعیت لهیدگی در فلزات نرمی همچون صفحات آلومینیومی ساختار گلاره، لازم است از معیار دقیق‌تری مانند جانسون-کوک که در آن گسترش یافتگی ناحیه تسلیم در نظر گرفته شده است

نحوه بارگذاری به‌گونه‌ای است که مدل شبیه‌سازی شده تحت جابه‌جایی ۵ میلی‌متر در سه حالت مختلف تست کوپن (در فاصله‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از لبه اتصال) تهیه می‌شود. شکل (۵)، نحوه بارگذاری در جهت محور طولی را نشان می‌دهد. با توجه به این که نرخ کشش یا تغییر طول در واحد زمان در اغلب دستگاه‌ها معادل ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه می‌باشد و در تحلیل‌های تجربی می‌بایست زمان واقعی وارد گردد، لذا لازم است تغییر طول با توجه به سرعت کشش، به زمان واقعی تبدیل شود.

۴- تعیین خواص و فرضیات مساله

مقادیر خواص مکانیکی و استحکامی مواد استفاده‌شده در ساختار گلاره، صفحه انتقال دهنده نیروی کششی و ورق‌های نگهدارنده گلاره در جدول ۳ آورده شده‌است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد لایه‌چینی کامپوزیتی تک‌جهته با فرآیند لایه‌چینی آن به روش قالب-گیری پیش‌آغشته، ایزوتروپیک عرضی فرض گردیدند و مواد فلزی نیز ایزوتروپیک در نظر گرفته شدند.

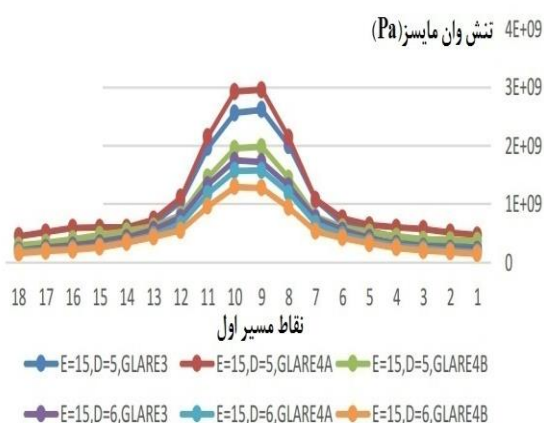
قطعاتی که نیاز به بررسی تحلیلی آنها نبود ولی نقش آنها در تحلیل و آزمایش انکار ناپذیر است، صلب در نظر گرفته شده‌اند (مانند پیچ یا صفحه انتقال دهنده نیرو) و همچنین رفتار ماده در محدوده الاستیک، خطی فرض گردید. از آن-جا که هدف مطالعه میزان آسیب و ارزیابی توزیع تنش‌های معیار در قطعه تحت لهیدگی می‌باشد، شرایط مرزی به گونه‌ای لحاظ شده‌است که مدل تحت جابه‌جایی ۵ میلی-متر در سه حالت مختلف تست کوپن (در فاصله‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از لبه اتصال) قرار گیرد. بدیهی است براساس مبانی اصلی تحلیل سازه‌ها، در فرایند کنترل جابجایی یا همان جابجایی ثابت، مطالعه شرایط و اثرات توزیع نیرویی/تنشی نتایج $(f=kx)$ که هدف این مقاله است، ممکن خواهد بود. در این وضعیت، در مقادیر مشخص و ثابتی از جابجایی (X)، مطالعه تغییرات نیرویی f (تنشی)، متناظر با تغییرات مشخصه‌های اصلی سازه مانند مولفه‌های ماتریس سفتی (k) ساختار می‌باشد، که با سهولت در نتایج، قابل استخراج و تعمیم است.

۵- بررسی و تحلیل

در برآورد اولیه و مسائل تحقیقاتی که غالباً رفتار ماده یا ساختار مورد بررسی کاملاً شناخته شده نیست در بررسی‌های اولیه و تحقیقاتی یک ساختار به‌عنوان یک برآورد،

پس از انجام تحلیل استاتیکی، توزیع تنش وان مایسز برای ۶ حالت تعریف شده، بدست آمد. با توجه توزیع تنش وان مایسز در شکل (۹) می‌توان نتیجه گرفت که در مسیر ۱، حالت ۶ کمترین تمرکز تنش و حالت ۱ بیشترین تمرکز تنش را دارا می‌باشند. بنابراین از عوامل تأثیرگذار در تمرکز تنش، اندازه قطر پیچ و لایه‌چینی در راستای اعمال بار در نظر گرفته خواهد شد. لازم به توجه است که مقادیر تنش وان مایسز تنها در اطراف ناحیه اطراف سوراخ در مسیر ۱ برای بررسی مساله حائز اهمیت و معنادار است. به عبارتی دیگر تمرکز تنش با قطر سوراخ رابطه عکس دارد و لایه-چینی در راستای اعمال بار باعث کاهش تمرکز تنش می‌گردد. علاوه بر آن، براساس اثر و تعداد لایه‌ها در راستای نیرو در هریک از ساختارهای گلاره در شکل (۲)، می‌توان انتظار داشت حساسیت تنشی و تمرکز تنش در گلاره 4A با تعداد لایه‌های بیشتر در راستای صفر در جهه قطره‌های کمتر سوراخ (۵ میلی‌متر) از دو ساختار دیگر بیشتر باشد. در حالت سوراخ ۶ میلی‌متر (سوراخ با قطر بیشتر)، غلبه اثر عدم تقارن لایه‌چینی و ایجاد مولفه‌های تنش سه‌بعدی بر ماکزیمم‌سازی تنش مؤثر (وان مایسز) در گلاره ۳، به وضوح قابل مشاهده است.

شکل (۱۰) نشان می‌دهد که در مسیر ۲ با افزایش تعداد لایه با جهت الیاف در راستای اعمال بار و تقویت در آن جهت، زاویه تمرکز تنش از ۹۰ درجه به اطراف انتقال پیدا می‌کند؛ از طرفی با افزایش اندازه قطر پیچ، تمرکز تنش از ۹۰ درجه به اطراف جابجا می‌شود.



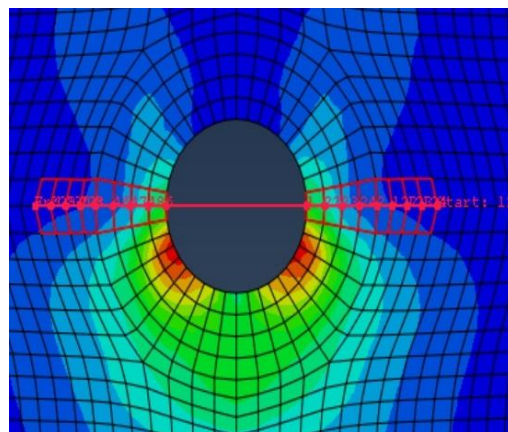
شکل (۹) - نمودار مقایسه‌ای تنش وان مایسز برای شش حالت در مسیر ۱

از شکل (۱۱) می‌توان به این نتیجه رسید که حالت ۲ و حالت ۴ بسیار به هم نزدیک هستند، به عبارتی، ۳ لایه بودن

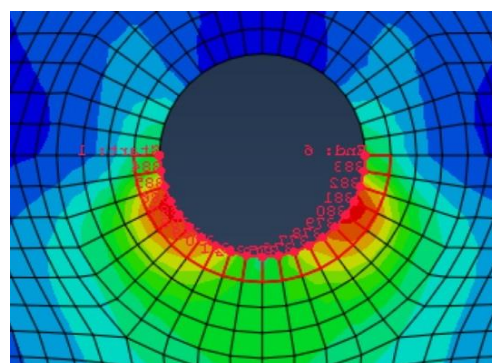
استفاده گردد. به‌کارگیری این سه معیار در ادامه در مقاله، تشریح گردیده‌است.

۵-۱- تحلیل تنش وان مایسز

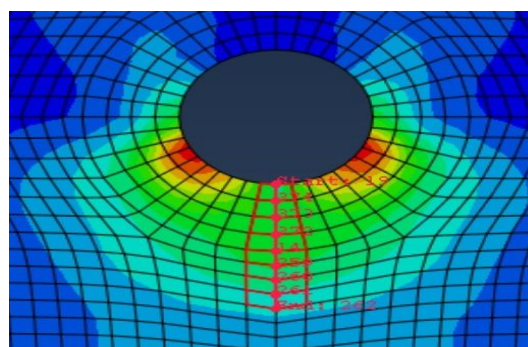
مدل در شش حالت مختلف برای حالتی که فاصله لبه از سوراخ برابر ۱۵ میلی‌متر باشد، در مسیرهای ۱، ۲ و ۳ مورد آنالیز دینامیکی صریح قرار داده شد. این مسیرها در شکل-های (۶)، (۷) و (۸) در فرم نمایش نرم‌افزار مورد استفاده معرفی شده‌اند. مسیرهای ۱، ۲ و ۳ مقادیر تنش وان مایسز برای هر کدام از شش حالت انتخابی مورد مقایسه قرار گرفت که در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) می‌توان مقایسه نمودارهای هر کدام از شش حالت را در مسیرهای مختلف مشاهده نمود.



شکل (۶) - تعریف مسیر ۱ (نقاط گرهی) در نرم‌افزار



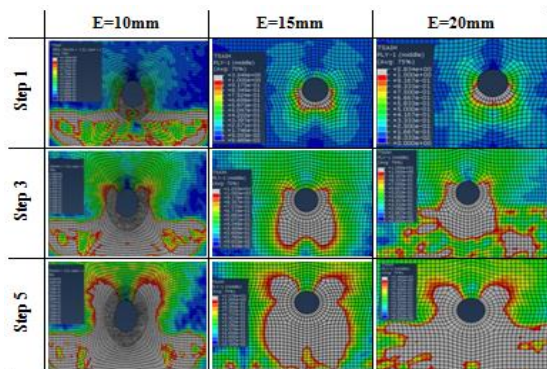
شکل (۷) تعریف مسیر ۲ (نقاط گرهی) در نرم‌افزار



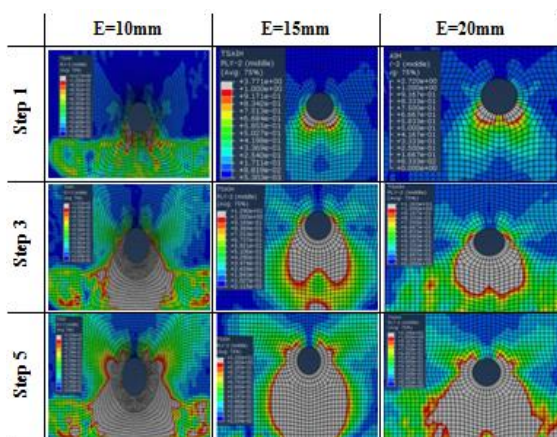
شکل (۸) تعریف مسیر ۳ (نقاط گرهی) در نرم‌افزار

الف) حالت اول

در این حالت، بررسی میزان معیار تخریب حاصل از مد تخریبی وارده به اتصال گلاره نوع ۳ با اندازه قطر پیچ ۵ میلی‌متر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در اتصال گلاره نوع ۳، دو لایه کامپوزیت تک‌جهته به ترتیب چیدمان [۰/۹۰] در نظر گرفته شده‌است، بر این اساس میزان تخریب در هر دو لایه متغیر بوده و باید مقدار معیار تخریب هر کدام از دو لایه را استخراج نمود. برای نمونه، شکل‌های (۱۲) و (۱۳) میزان تغییرات معیار تخریب تسای-هیل را در لایه ۱ و ۲ (به ترتیب لایه‌ها تحت زاویه صفر و ۹۰ درجه، الیاف چیدمان شده‌اند) برای حالت اول را نمایش می‌دهد؛ که نشان می‌دهد لایه ۲ به دلیل استحکام بالای طولی در جهت اعمال نیرو تخریب کمتری داشته ولی در لایه ۱ (با زاویه صفر درجه)، در کل سطح نیم دایره پایین (سطح تحت بار لهدیگی) تخریب رخ داده‌است.

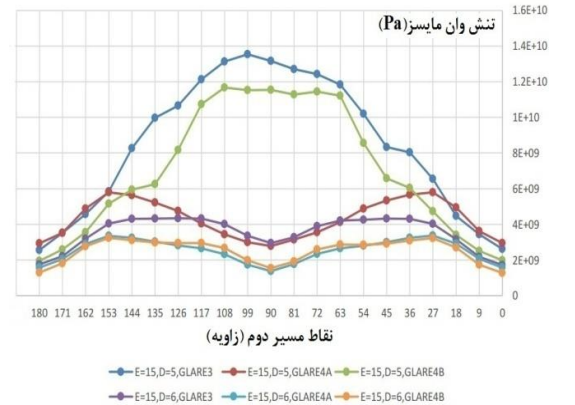


شکل (۱۲) - تغییرات معیار تخریب تسای-هیل برای لایه ۱ در حالت ۱

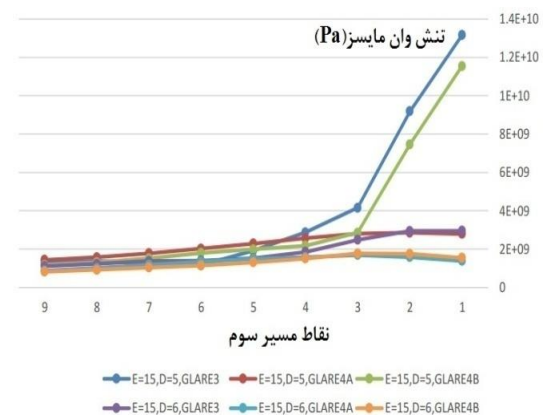


شکل (۱۳) - تغییرات معیار تخریب تسای-هیل برای لایه ۲ در حالت ۱

حالت ۲ آنچنان تأثیر در کاهش تنش نسبت به دو لایه بودن حالت ۴ ندارد و بهتر است به جای استفاده از حالت ۲ به جهت کاهش وزن از حالت ۴ استفاده شود. همچنین با دور شدن از سوراخ در راستای مسیر ۳، تنش سیر نزولی را طی خواهد کرد و نرخ کاهش برای قطر ۵ میلی‌متر بیشتر از ۶ میلی‌متر است.



شکل (۱۰) - نمودار مقایسه‌ای تنش وان مایسز برای شش حالت در مسیر ۲



شکل (۱۱) - نمودار مقایسه‌ای تنش وان مایسز برای شش حالت در مسیر ۳

۵-۲- تأثیر فاصله از لبه در مقدار تنش تسلیم

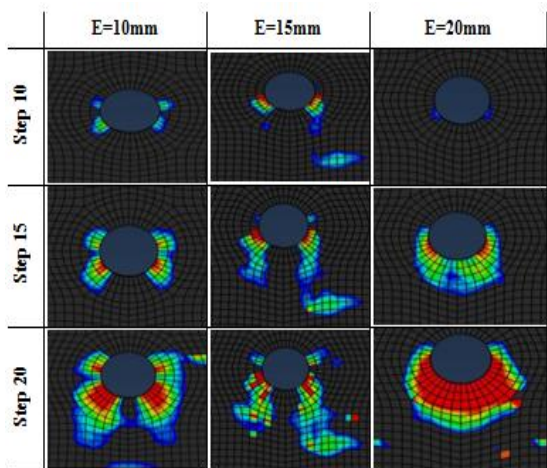
مطابق جدول (۱) که پیش‌تر به آن اشاره شد، شش حالت جهت تحلیل تست کشش انتخاب گردید، که هر حالت شامل سه زیر حالت (اندازه قطر پیچ، اندازه فاصله از لبه، نوع گلاره) می‌باشد و در مجموع ۱۸ زیرحالت مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین به ترتیب از حالت ۱ تا حالت ۶، تأثیر میزان تخریب در آن‌ها بر اساس معیار تخریب تسای-هیل (برای کامپوزیت‌ها) و معیار تخریب جانسون-کوک (برای فلزات) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

³ GLARE 3

¹ Tsai-Hill failure criterion

² Johnson-Cook failure criterion

بالایی و پایینی گلاره نوع ۴A، از معیار تخریب جانسون-کوک استفاده شد؛ شکل (۱۵) تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک را برای ورق‌های آلومینیوم در حالت دوم را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵)- تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک برای ورق‌های آلومینیومی در حالت ۲

بنابراین با توجه به شکل (۱۵) می‌توان زمان شروع تخریب در فاصله‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از لبه اتصال را در جدول (۶) استخراج نمود.

جدول (۶)- زمان شروع تخریب در حالت ۲

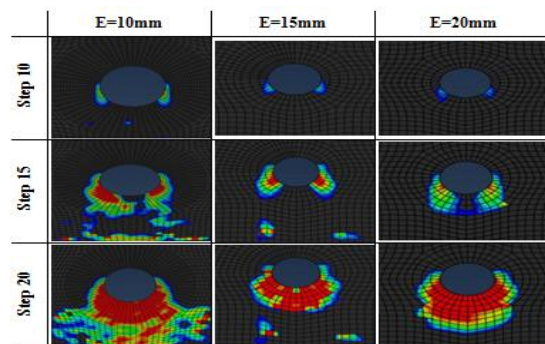
E (فاصله به میلی‌متر)	۱۰	۱۵	۲۰
اولین واماندگی	گام ۱۰	گام ۹	گام ۱۴

همچنین، انتقال مودهای تخریبی در اثر افزایش فاصله از لبه از مود گسیختگی کشش لبه‌ای خالص به سمت برش و سپس به سمت لهیدگی حرکت خواهد کرد.

ج) حالت سوم

در این حالت، بررسی میزان معیار تخریب حاصل از مود تخریبی وارده به اتصال گلاره نوع ۴B با اندازه قطر پیچ ۵ میلی‌متر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت؛ در اتصال گلاره نوع ۴B، سه لایه کامپوزیت تک‌جهته به ترتیب چیدمان [۹۰ / صفر / ۹۰] در نظر گرفته شده است، بر این اساس میزان تخریب در هر سه لایه متغیر بوده و باید مقدار معیار تخریب هر کدام از سه لایه را استخراج نمود. جهت استخراج تغییرات معیار تخریب ورق‌های آلومینیومی بالایی و پایینی گلاره نوع ۴B، از معیار تخریب جانسون-کوک استفاده شد؛ شکل (۱۶) تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک را برای ورق‌های آلومینیوم در حالت سوم نشان می‌دهد.

جهت استخراج تغییرات معیار تخریب ورق‌های آلومینیومی بالایی و پایینی ساختار گلاره، از معیار تخریب جانسون-کوک استفاده شد. شکل (۱۴) تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک را برای ورق‌های آلومینیوم در حالت اول را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، شروع تخریب بر اساس معیار جانسون-کوک با افزایش فاصله از لبه (افزایش فاصله از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر) به تأخیر افتاده است.



شکل (۱۴)- تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک برای ورق‌های آلومینیومی در حالت ۱

بنابراین با توجه به شکل (۱۴) می‌توان زمان شروع تخریب در فاصله‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از لبه اتصال را در جدول ۵ استخراج نمود.

جدول (۵)- زمان شروع تخریب در حالت ۱

E (فاصله به میلی‌متر)	۱۰	۱۵	۲۰
اولین واماندگی	گام ۱۰	گام ۱۲	گام ۱۴

در ضمن الگوی مود تخریبی بر اساس تغییرات معیار تخریب گلاره در حالت اول، برای فاصله ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متری لبه اتصال، مود تخریبی از نوع گسیختگی برشی بوده و برای فاصله ۲۰ میلی‌متری از لبه اتصال، مود تخریبی به سمت گسیختگی لهیدگی حرکت خواهد کرد.

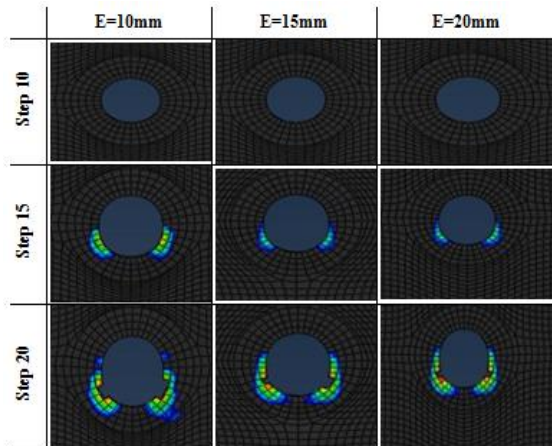
ب) حالت دوم

در این حالت بررسی میزان معیار تخریب حاصل از مود تخریبی وارده به اتصال گلاره نوع ۴A با اندازه قطر پیچ ۵ میلی‌متر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت؛ در اتصال گلاره نوع ۴A، سه لایه کامپوزیت تک‌جهته به ترتیب چیدمان [صفر / ۹۰ / صفر] در نظر گرفته شده است، بر این اساس میزان تخریب تسای-هیل در هر سه لایه متغیر بوده و باید مقدار معیار تخریب هر کدام از سه لایه را استخراج نمود. جهت استخراج تغییرات معیار تخریب ورق‌های آلومینیومی

² GLARE 4B

¹ GLARE 4A

بر اساس معیار جانسون- کوک با افزایش فاصله از لبه (افزایش فاصله از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر) به تأخیر افتاده‌است. همچنین میزان تغییرات معیار تخریب در حالت ۴ نسبت به حالت ۱ (که تنها در اندازه قطر سوراخ پیچ متفاوت هستند) حدود ۷۸ درصد کاهش یافته‌است.



شکل (۱۷)- تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک برای ورق‌های آلومینیومی در حالت ۴

بنابراین با توجه به شکل (۱۷)، می‌توان زمان شروع تخریب در فاصله‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از لبه اتصال را در جدول (۸) استخراج نمود.

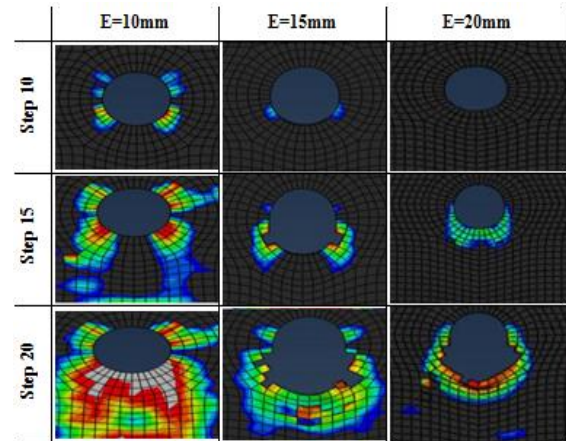
جدول (۸)- زمان شروع تخریب در حالت ۴

E (فاصله به میلی‌متر)	۱۰	۱۵	۲۰
اولین واماندگی	۱۵ گام	۱۷ گام	۱۸ گام

در ضمن الگوی مود تخریبی بر اساس تغییرات معیار تخریب گلاره در حالت چهارم، برای فاصله ۱۰ میلی‌متری لبه اتصال، مود تخریبی از نوع تنش برشی بوده و برای فاصله ۱۵ میلی‌متری از لبه اتصال، مود تخریبی از نوع تنش ترکیبی برشی- لهیدگی و برای فاصله ۲۰ میلی‌متری از لبه اتصال، مود تخریبی به سمت تنش برشی و تنش لهیدگی حرکت خواهد کرد.

ر) حالت پنجم

در این حالت بررسی میزان معیار تخریب حاصل از مود تخریبی وارده به اتصال گلاره نوع ۴A با اندازه قطر پیچ ۶ میلی‌متر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در اتصال گلاره نوع ۴A، سه لایه کامپوزیت تک‌جهته به ترتیب چیدمان [صفر/۹۰/صفر] در نظر گرفته شده‌است، بر این اساس میزان تخریب در هر سه لایه متغیر بوده و باید مقدار معیار



شکل (۱۶)- تغییرات معیار تخریب جانسون- کوک برای ورق‌های آلومینیومی در حالت ۳

بنابراین با توجه به شکل (۱۶) می‌توان زمان شروع تخریب در فاصله‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از لبه اتصال را در جدول (۷) استخراج نمود.

جدول (۷)- زمان شروع تخریب در حالت ۳

E (فاصله به میلی‌متر)	۱۰	۱۵	۲۰
اولین واماندگی	۱۰ گام	۱۲ گام	۱۳ گام

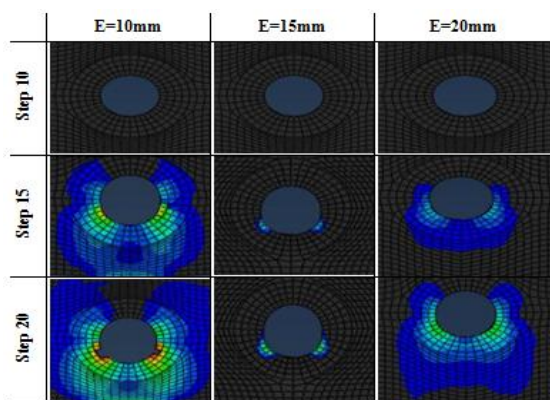
در ضمن الگوی مود تخریبی بر اساس تغییرات معیار تخریب گلاره در حالت سوم، برای فاصله ۱۰ میلی‌متری لبه اتصال، مود تخریبی از نوع مود ترکیبی^۱ تنش خالص- برشی بوده و برای فاصله ۱۵ و ۲۰ میلی‌متری از لبه اتصال، مود تخریبی به ترتیب به سمت تنش برشی و تنش لهیدگی حرکت خواهد کرد.

د) حالت چهارم

در این حالت بررسی میزان معیار تخریب حاصل از مود تخریبی وارده به اتصال گلاره نوع ۳ با اندازه قطر پیچ ۶ میلی‌متر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت؛ در اتصال گلاره نوع ۳، دو لایه کامپوزیت تک‌جهته به ترتیب چیدمان [صفر/۹۰/صفر] در نظر گرفته شده‌است، بر این اساس میزان تخریب در هر دو لایه متغیر بوده و باید مقدار معیار تخریب هر کدام از دو لایه را استخراج نمود. جهت استخراج تغییرات معیار تخریب ورق‌های آلومینیومی بالایی و پایینی ساختار گلاره، از معیار تخریب جانسون-کوک استفاده شد. شکل (۱۴) تغییرات معیار تخریب جانسون- کوک را برای ورق‌های آلومینیوم در در حالت چهارم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، شروع تخریب

¹ Mixed Mode

نوع ۴B، سه لایه کامپوزیت تک‌جهته به ترتیب چیدمان [۹۰ / صفر / ۹۰] در نظر گرفته شده است. جهت استخراج تغییرات معیار تخریب ورق‌های آلومینیومی بالایی و پایینی گلاره نوع ۴B، از معیار تخریب جانسون-کوک استفاده شد؛ شکل (۱۹) تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک برای ورق‌های آلومینیوم در حالت سوم را نشان می‌دهد. مجدداً در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود که شروع تخریب بر اساس معیار جانسون-کوک با افزایش فاصله از لبه (افزایش فاصله از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر) به تأخیر افتاده است. همچنین میزان تغییرات معیار تخریب در حالت ششم نسبت به حالت سوم (که در اندازه قطر سوراخ پیچ متفاوت می‌باشند) نزدیک به ۷۲ درصد کاهش یافته است.



شکل (۱۹)- تغییرات معیار تخریب جانسون - کوک برای ورق‌های آلومینیومی در حالت ۶

بنابراین با توجه به شکل (۱۹) می‌توان زمان شروع تخریب در فاصله‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از لبه اتصال را از جدول (۱۰) تعیین نمود.

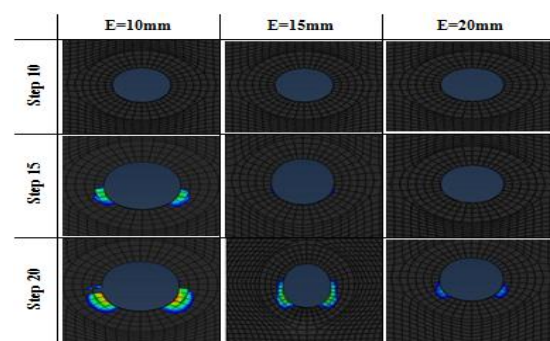
جدول (۱۰)- زمان شروع تخریب در حالت ۶

E (فاصله به میلی‌متر)	۱۰	۱۵	۲۰
اولین واماندگی	گام ۱۲	بدون آسیب	بدون آسیب

در ضمن، الگوی مود تخریبی بر اساس تغییرات معیار تخریب گلاره در حالت پنجم، برای فاصله ۱۰ میلی‌متری لبه اتصال، مود تخریبی از نوع تنش برشی بوده و برای فاصله ۱۵ میلی‌متری از لبه اتصال، مود تخریبی از نوع تنش ترکیبی برشی-لهدیگی و برای فاصله ۲۰ میلی‌متری از لبه اتصال، مود تخریبی به سمت تنش لهدیگی حرکت خواهد کرد.

بنابراین، نتایج تحقیقات برای تمامی شش حالت انتخابی

تخریب هر کدام از سه لایه را استخراج نمود. جهت استخراج تغییرات معیار تخریب ورق‌های آلومینیومی بالایی و پایینی گلاره نوع ۴A، از معیار تخریب جانسون-کوک استفاده گردید. شکل (۱۸) تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک را برای ورق‌های آلومینیوم در حالت پنجم نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۸) مشاهده می‌گردد، شروع تخریب بر اساس معیار جانسون-کوک با افزایش فاصله از لبه (افزایش فاصله از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر) به تأخیر افتاده است. همچنین میزان تغییرات معیار تخریب در حالت ۵ نسبت به حالت ۲ (که فقط در اندازه قطر سوراخ پیچ متفاوت می‌باشند) تقریباً ۷۱ درصد کاهش یافته است.



شکل (۱۸)- تغییرات معیار تخریب جانسون-کوک برای ورق‌های آلومینیومی در حالت ۵

بنابراین با توجه به شکل (۱۸) می‌توان زمان شروع تخریب در فاصله‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از لبه اتصال را از جدول (۹) استخراج نمود.

جدول (۹)- زمان شروع تخریب در حالت ۵

E (فاصله به میلی‌متر)	۱۰	۱۵	۲۰
اولین واماندگی	گام ۱۵	بدون آسیب	بدون آسیب

همچنین الگوی مود تخریبی بر اساس تغییرات معیار تخریب گلاره در حالت پنجم، برای فاصله ۱۰ میلی‌متری لبه اتصال، مود تخریبی از نوع تنش برشی بوده و برای فاصله ۱۵ میلی‌متری از لبه اتصال، مود تخریبی از نوع تنش ترکیبی برشی-لهدیگی و برای فاصله ۲۰ میلی‌متری از لبه اتصال، مود تخریبی به سمت تنش لهدیگی حرکت خواهد نمود.

ز) حالت ششم

در این حالت بررسی میزان معیار تخریب حاصل از مود تخریبی وارده به اتصال گلاره نوع ۴B با اندازه قطر پیچ ۶ میلی‌متر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت؛ در اتصال گلاره

بوده که در دو اندازه ۵ و ۶ سانتی‌متر قطر سوراخ نتایج تغییرات مود (از برشی به لهیدگی) و تغییرات حساسیتی را به وضوح نشان می‌دهند. اگرچه تحلیل نتایج در اندازه‌های ۲، ۷، ۵/۵ سانتی‌متر در حالت‌های محدود و نه در کل شش حالت از مدل، تغییر رفتار و در نتیجه پرشی در نتایج و ارزیابی حاصله را نشان نمی‌دهد و عمدتاً به دلیل جلوگیری از افزایش غیرضروری حجم نتایج و رسم کانتورهای بسیار نزدیک و مشابه، از ارائه آن‌ها در این مقاله اجتناب شده است.

اولویت اصلی در انتخاب بهینه بر اساس قطر پیچ و ضخامت گلاره، انتخاب بهینه بر مبنای قطر پیچ خواهد بود، زیرا افزایش تعداد لایه در لایه‌چینی موجب افزایش وزن و هزینه می‌گردد، برای مثال حالت ۴ نسبت به حالت ۳، به دلیل تعداد لایه‌های کمتر و اندازه قطر بیشتر اولویت دارد، به عبارت دیگر، دو لایه بودن با قطر بیشتر بر سه لایه بودن با قطر کمتر مزیت دارد. در صورت انتخاب گلاره نوع ۳ بر مبنای تنش تسلیم و تنش نهایی، انتخاب قطر ۶ میلی‌متر بر ۵ میلی‌متر اولویت دارد. همچنین حالت چهارم نسبت به حالت اول ارجح می‌باشد، زیرا همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، میزان تغییرات معیار تخریب در حالت چهارم نسبت به حالت اول (که تنها در اندازه قطر سوراخ پیچ متفاوت می‌باشند) حدود ۷۸ درصد کاهش داشته‌است.

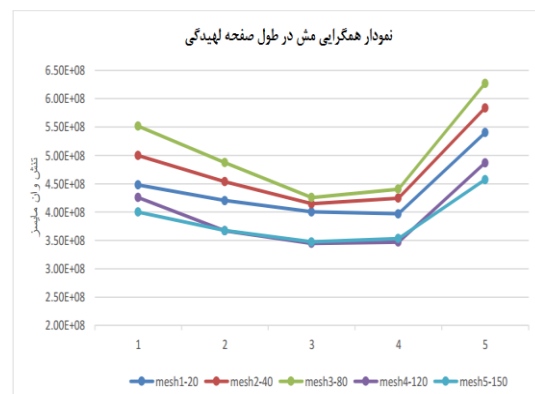
حالت ۵ نسبت به حالت ۲ اولویت دارد زیرا همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، میزان تغییرات معیار تخریب در حالت پنجم نسبت به حالت دوم (که فقط در اندازه قطر سوراخ پیچ متفاوت می‌باشند) تقریباً ۷۱ درصد کاهش یافته‌است. حالت ۶ نسبت به حالت ۳ اولویت دارد، زیرا با وجود ثبات مقدار معیار تخریب نسبی لایه ۱ نسبت به لایه ۲، میزان تغییرات معیار تخریب در حالت ششم نسبت به حالت سوم (که تنها در اندازه قطر سوراخ پیچ متفاوت می‌باشند) تقریباً ۷۲ درصد کاهش یافته‌است. بنابراین، با توجه به این که جابه‌جایی به وجود آمده در پین، ناشی از تخریب لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی می‌باشد، لذا این پارامتر نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب نوع ورق و قطر پیچ یا پرچ دارد. در نهایت، در نتیجه تحلیل‌های فوق، اولویت انتخاب مطابق جدول (۱۱)، به شرح ذیل به دست آمده‌است. نمای کلی الگوریتم پیشنهادی فرایند طراحی حاصل در شکل (۲۱) ارائه شده‌است.

نشان داد که: با افزایش قطر پیچ، مود تخریبی کشش لبه‌ای خالص حذف شده و مود تخریبی از برش شروع می‌شود. همچنین، با افزایش فاصله از لبه به سمت مود تخریبی لهیدگی تغییر می‌یابد. از طرفی دیگر نتایج تحلیل نشان داد، افزایش ۲۰ درصدی در قطر پیچ، تأثیر مثبت بیش از ۷۰ درصدی در کاهش مقدار معیار تخریب لایه‌های کامپوزیت خواهد داشت.

۵-۳- انتخاب اتصال بهینه بر اساس قطر پیچ و نوع گلاره و اعتبار سنجی نتایج

آزمون همگرایی مدل: بر اساس آزمون همگرایی نتایج بر اساس تعداد و اندازه مش، کلیه نتایج بر مبنای مش بندی بهینه حاصل از نمونه تراکم شماره ۳ در شکل (۴) بدست آمده است (شکل (۲۰)).

علاوه بر آن، در بررسی همگرایی بر مبنای آنالیز دینامیکی در حساسیت به گام زمانی، نتایج، حساسیت اندکی به گام‌های زمانی مدنظر نشان می‌دهد. لذا بر ایند نتایج، کافی بودن تراکم مش بندی نمونه شماره ۳ در شکل (۴) و گام زمانی فعلی را نتیجه می‌دهد.



شکل (۲۰) - نمودار همگرایی

به جهت اعتبارسنجی نتایج در تطابق مکانیزم بارگذاری با نمونه‌های موجود در تاریخچه، نتایج با اجرای آزمون‌های عملی کوپن تست ارزیابی شد. این فرایند، با هندسه و مکانیزم نشان داده شده در شکل (۳) و توضیح در اجرای آزمون در ذیل شکل (۵)، در دستگاه تست کشش-فشار اینسترون سری ۸۵۰۰ اجرا و ارائه گردید [۲۶]. نتایج، به وضوح مؤید رفتار ارائه شده در نتیجه شماره (۶) در بخش نتیجه‌گیری می‌باشند.

در بررسی تغییرات بر مبنای اندازه قطر پیچ، هدف دستیابی به اثر تغییرات اندازه پیچ یا سوراخ در ارزیابی رفتار ساختار

جدول (۱۱)- اولویت‌های حاصل بر اساس شماره حالت

اولویت	شماره حالت
۱	ششم
۲	پنجم
۳	دوم
۴	چهارم
۵	سوم
۶	اول

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌هایی که برای هر شش حالت مذکور انجام شد، می‌توان استنتاج نمود که:

۱- در مراحل اعمال بار، با جابجایی پیچ، اثر هندسه تغییر می‌کند و حالت لوبیایی شدن سوراخ و ورود به ناحیه پلاستیک در رفتار مکانیکی مواد ایجاد می‌شود که دلیل واضحی است برای این که نشان داده شود سطح بارگذاری به سمت لهیدگی تغییر می‌کند. در واقع بررسی اثر توزیع تنش جهت برآورد کردن همین موضوع می‌باشد تا در رسیدن به هدف اصلی در این مقاله، یعنی یافتن پارامترهای مؤثر بر استحکام لهیدگی، کمک کند.

۲- به عنوان یک برآورد و شناخت بیشتر مسأله، با بکارگیری معیار محافظه کارانه وان‌مایسز در تخمین شناخت اثرات هندسی، نشان داده شد: تمرکز تنش با قطر سوراخ رابطه عکس دارد و لایه‌چینی در راستای اعمال بار، موجب کاهش تمرکز تنش می‌گردد.

۳- در راستای مسیر ۲، با افزایش اندازه قطر پیچ، تمرکز تنش از ۹۰ درجه به اطراف انتقال پیدا می‌کند.

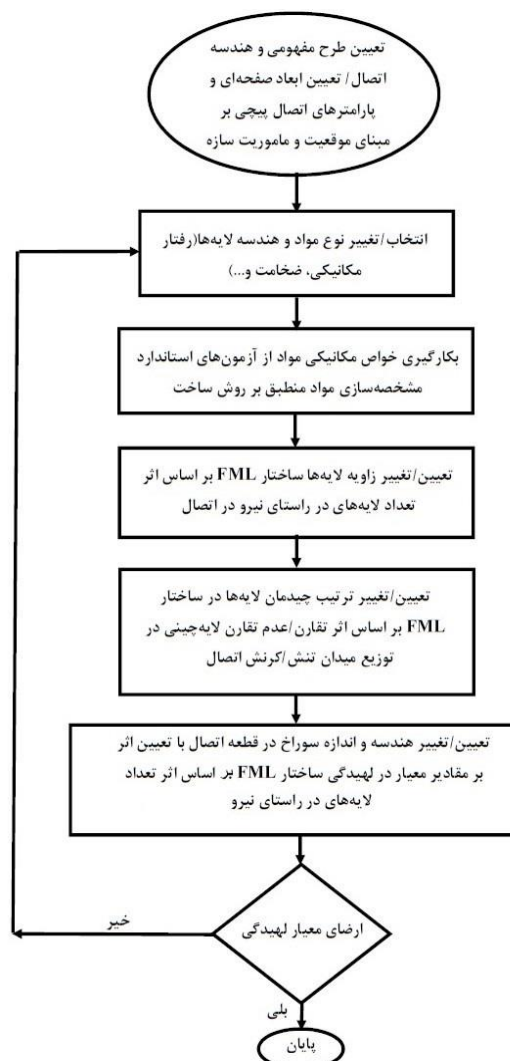
۴- با دور شدن از سوراخ در راستای مسیر ۳، تنش سیر نزولی را طی خواهد کرد و نرخ کاهش برای قطر ۵ میلی‌متر بیشتر از ۶ میلی‌متر است.

۵- لایه کامپوزیتی تک‌جهته به دلیل استحکام بالای طولی در جهت اعمال نیرو تخریب کمتری داشته همچنین لایه کامپوزیتی تک‌جهته با زاویه صفر درجه سطح تحت بار لهیدگی دچار تخریب می‌گردد.

۶- با توجه به ثابت بودن مقدار جابه‌جایی وارده به مدل برای شش حالت مختلف، حالت‌های ۶ و ۵ از کمترین میزان آسیب نسبت به حالت‌های دیگر برخوردار می‌گردند.

۷- با افزایش قطر پیچ مود تخریبی کشش لبه‌ای خالص حذف‌شده، مود تخریبی برش شروع می‌گردد و با افزایش فاصله از لبه به سمت مود تخریبی لهیدگی تغییر می‌یابد.

۸- افزایش ۲۰ درصدی در اندازه قطر پیچ، تأثیر مثبت بیش از ۷۰ درصدی در کاهش معیار تخریب لایه‌های کامپوزیت خواهد داشت.



شکل (۲۱)- الگوریتم فرایند طراحی

مراجع

- [1] M. Y. Abdellah, M. K. Hassan, I. T. Mandourah, and A. F. Mohamed, "Bearing Strength and Failure Behavior of Bolted GLARE Joints", *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, Vol. 16, No. 2, 2016, pp. 54-63.
- [۲] محمود ذبیح‌پور، " بررسی واماندگی لایه‌ای مواد مرکب تحت بارگذاری خستگی خمشی"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷.
- [۳] محمد امین ترابی‌زاده، محمود مهرداد شکریه و عبدالحسین فریدون، "مدل‌سازی تخریب پیش‌رونده صفحات کامپوزیت شیشه - اپوکسی تحت بار کششی استاتیکی در دمای پایین"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۸۰، شماره ۲۱، تابستان ۱۳۸۹، صفحه ۴۳-۳۳.
- [4] J. Ekh, J. Schön, and L. G. Melin, "Secondary Bending in Multi Fastener, Composite-to- Aluminium Single Shear Lap Joints", *Composites Part B*, 36, 2005.
- [۵] پژمان دریابر، محمود فرزین و سعیده کوهستانی، "شبیه‌سازی تست غیر مخرب اولتراسونیک با پروب موج عمودی در اتصال بین ورق کامپوزیت و آلومینیوم توسط اجزای محدود"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۶، پاییز ۱۳۹۰، صفحه ۱۲-۱.
- [۶] محمدحسن کیهانی و امین امیری دلوثی، "مقایسه تحلیلی بازده پین‌های چند لایه کامپوزیتی تحت شرایط مرزی گرمایی مختلف"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۷۷-۶۷.
- [۷] امید رحمانی و رضا بیات، "مدل‌سازی کنترل ارتعاشات تیر کامپوزیتی چند لایه با استفاده از لایه‌های مگنتواستریکتیو"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۱۳-۱.
- [۸] محمود مهرداد شکریه، زهرا شکریه و مهرداد داورپناه، "بررسی تحلیلی، عددی و تجربی سازه‌ای با صفحات تاشده کامپوزیتی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۲، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۱۵-۱.
- [9] A. J. Zhang and Z. Caob, "Experimental Studies of Glass Reinforced Aluminum (GLARE) Bolted Joint", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 217-219, 2012, pp 124-129, Trans Tech Publications, Switzerland.
- [10] K. J. Jadee, and A. R. Othman, "The Effect of Defence Hole System on the Failure Load and Bearing Strength of GFRP Bolted Joint", *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 3, No. 4, 2015, pp. 135-141.
- [11] A. Olmedo, and C. Santiuste, "On the prediction of bolted single-lap composite joints", *Composite Structures*, Vol. 94, No. 6, 2012, pp. 2110-2117.
- [12] KH. Fallahnezhad, A. Steele, and R. H. Oskouei, " Failure Mode Analysis of Aluminium Alloy 2024-T3 in Double-Lap Bolted Joints with Single and Double Fasteners", *A Numerical and Experimental Study*, *Materials*, Vol. 8, No. 6, 2015, pp. 3195-3209.
- [13] I. A. Dinca, A. Stefan, and A. Stan, "Aluminum/glass fibre and aluminum/carbon fibre hybrid Laminates", *INCAS BULLETIN*, Vol. 2, No.2, 2010, pp. 33-39.
- [14] M. Pakdil, "Failure analysis of composite single bolted-joints subjected to bolt pretension", *indian journal of engineering & materials sciences*, Vol.16, 2009, pp79-85.
- [15] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Özgür Bora, and O. Çoban, "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods", *Materials and Design*, Vol. 32, No.7, 2011, pp: 3671-3685.
- [16] E. Ghanbari, "Bolt-Hole Tightening Effects In Single Lap Composite Bolted Joints", MSc Thesis in Mechanical Engineering, Mechanics Program, Graduate School and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey, June 2011.
- [17] C. Hühne, A. K. Zerbst, G. Kuhlmann, C. Steenbock, and R. Rolfes, "Progressive damage analysis of composite bolted joints with liquid shim layers using constant and continuous degradation models". *Composite Structures*, Vol. 93, 2010, pp. 189 – 200.
- [18] M. Chisthi, H. Wang Chun, S. Thomson Rodney, and C. Orifici Adrian, "Numerical analysis of damage progression of countersunk composite joints". *Composite Structures*, Vol. 94, 2012, pp. 643 – 653.
- [19] S. Kapti, O.Sayman, M.Ozen, and S. Benli, "Experimental and numerical failure analysis of carbon/epoxy laminated composite joints under different conditions". *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 4933 – 4942.

- [20] J. Kim, "Experimental Investigation of Mechanical Behaviour of Hybrid Bolted/Bonded Joints for Aircraft", MSc Thesis, Master of Applied Science in Aerospace Engineering, Carleton University Ottawa, Ontario, 2016.
- [21] D. Sivakumar, L. F. Ng, and M. Z. Selamat, "Failure Analysis of Hybrid Fibre Reinforced Plastics for Bolted Joint under Thermal Effect", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. SI 1(1), 2017, pp.141-156.
- [22] M. Y. Abdellah, M.Q.Kamal, M. S. Alsoufi, M. N. Ghazaly, and G. T. Abdel-Jaber, "Mechanical Properties of Lab Joint Composite Structure of Glass Fiber Reinforced Polymers", *Materials Sciences and Applications*, Vol. 8, 2017, pp. 553-565.
- [23] F. Lu, D. Cai, a. J. Tang, W. Li, J. Deng, and G. Zhou, , "Bearing failure of single-/double-shear composite bolted joints: An explicit finite element modeling", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 37, No. 14, 2018, pp. 933-944.
- [24] X. F. Hu, A. Haris, M. Ridha, V. B. C. Tan, and T. E. Tay, "Progressive failure of bolted single-lap joints of woven fibre-reinforced composites", *Composite Structures*, Vol. 189, 2018, pp. 443-454.
- [25] M. El. Zarougm, F. Kadioglu, M. Demiral, and D.Saad, "Experimental and numerical investigation into strength of bolted, bonded and hybrid single lap joints: Effects of adherend material type and thickness", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 87, 2018, pp. 130-141.
- [۲۶] میثم خاوندکار، "مکانیزم‌های واماندگی لهدگی صفحات GLARE با اتصالات پیچی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اسفند ۱۳۹۶.