J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 48, 2026. (21-31)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Numerical Analysis of the Effect of Repairs on the Strength of Marine Structures

Afshin Ghasemi[1], Sajad Hajizadeh[2*], Hassan Abyn[3]

[1] *Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr Iran; Afshinghasemi1994@gmail.com*
[2] *Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr Iran; Hajizadeh@pgu.ac.ir*
[3] *Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr Iran; Abynhassan@pgu.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 1 Oct 2025
Last modification: 5 Jan 2026
Accepted: 6 Jan 2026
Available online: 7 Jan 2026

Article type:
Article type

Keywords:
Composite patch
Crack repair
Stress Intensity Factor
Abaqus simulation
J-Integral method

ABSTRACT

Cracks formed in steel plates, especially in marine and industrial structures, are considered one of the main factors that reduce the strength and safety of structures. Effective repair of such damage plays an important role in increasing service life and improving structural reliability. Therefore, the present study was conducted with the aim of investigating the performance of composite patches in repairing cracked steel plates and improving their fracture behavior. In this research, numerical analysis was performed using Abaqus software and the J-Integral method to examine the effect of different composite patch characteristics on mechanical behavior. The main variables included patch material (carbon–epoxy and glass fiber), thicknesses (0.4, 0.5, 0.6, and 1.2 mm), and fiber orientations (0°, 45°, and 90°). Modeling and simulation were carried out for single-sided and double-sided patches, and parameters such as Stress Intensity Factor (K), axial stress (S22), and crack opening displacement (COD) were evaluated. The novelty of this study lies in the systematic comparison of patch material, thickness, and fiber orientation within a comprehensive three-dimensional analysis and in the precise evaluation of stress reduction and crack tip deformation. The findings showed that carbon–epoxy patches had greater efficiency than glass fiber patches in reducing the Stress Intensity Factor and crack opening displacement. Furthermore, increasing the patch thickness and placing the fibers at an angle of 90° relative to the loading direction produced the greatest reduction in K and S22. In addition, double-sided patches showed better performance compared to single-sided patches in reducing stresses. Based on the results, it can be recommended that in industrial applications, especially in marine environments, the use of carbon–epoxy patches with greater thickness and fiber orientation at 90° is an optimal option for repairing and increasing the durability of cracked steel plates.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.21

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۸، ۱۴۰۴، (۳۱-۲۱)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

تحلیل عددی اثر تعمیرات بر استحکام سازه‌های دریایی

افشین قاسمی[۱]، سجاد حاجی‌زاده[۲*]، حسن آبین[۳]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی گرایش هیدرومکانیک دانشگاه خلیج‌فارس Afshinghasemi1994@gmail.com

[۲] استادیار گروه مهندسی دریا/ دانشگاه خلیج فارس، Hajizadeh@pgu.ac.ir

[۳] استادیار گروه مهندسی دریا/ دانشگاه خلیج فارس، Abynhassan@pgu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

نوع مقاله:

کلمات کلیدی:

وصله کامپوزیتی

ترمیم ترک

ضریب شدت تنش

شبیه‌سازی آباکوس

روش انتگرال جی

چکیده

ترک‌های ایجادشده در ورق‌های فولادی، به‌ویژه در سازه‌های دریایی و صنعتی، از عوامل اصلی کاهش استحکام و ایمنی سازه‌ها محسوب می‌شوند. ترمیم مؤثر چنین آسیب‌هایی نقش مهمی در افزایش طول عمر و بهبود قابلیت اطمینان سازه دارد. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد وصله‌های کامپوزیتی در ترمیم ترک‌های ورق فولادی و بهبود رفتار شکست آن‌ها انجام شده است. در این تحقیق، تحلیل عددی به کمک نرم‌افزار آباکوس و روش انتگرال J انجام شد تا اثر ویژگی‌های مختلف وصله‌های کامپوزیتی بر رفتار مکانیکی بررسی شود. متغیرهای اصلی شامل جنس وصله (کربن–اپوکسی و الیاف شیشه‌ای)، ضخامت (۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر) و زاویه الیاف (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) بودند. مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای حالت‌های یک‌طرفه و دوطرفه انجام شد و پارامترهایی همچون ضریب شدت تنش(K) ، تنش محوری (S22) و بازشدگی نوک ترک (COD) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نوآوری پژوهش در مقایسه سیستماتیک اثر جنس، ضخامت و زاویه الیاف وصله‌ها در قالب یک تحلیل سه‌بعدی جامع و ارزیابی دقیق کاهش تنش‌ها و تغییر شکل نوک ترک نهفته است. یافته‌ها نشان داد که وصله‌های کربن–اپوکسی نسبت به وصله‌های الیاف شیشه‌ای کارایی بیشتری در کاهش ضریب شدت تنش و بازشدگی نوک ترک دارند. همچنین، افزایش ضخامت وصله و قرارگیری الیاف در زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای بارگذاری، بیشترین کاهش در K و S22را ایجاد کرد. علاوه بر این، وصله‌های دوطرفه عملکرد بهتری نسبت به وصله‌های یک‌طرفه در کاهش تنش‌ها نشان دادند. بر اساس نتایج، می‌توان توصیه کرد که در کاربردهای صنعتی، به‌ویژه در محیط‌های دریایی، استفاده از وصله‌های کربن–اپوکسی با ضخامت بیشتر و آرایش الیاف در راستای ۹۰ درجه گزینه‌ای بهینه برای ترمیم و افزایش دوام ورق‌های فولادی ترک‌دار است.

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.21

ISSN: 2645-8136

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY)ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

۱- مقدمه

ترک‌ها در سازه‌های فلزی و کامپوزیتی باعث تمرکز تنش، کاهش مقاومت ساختاری و کاهش عمر مفید قطعات می‌شوند و می‌توانند ناشی از بارگذاری مکانیکی، خستگی، خوردگی یا تغییرات دمایی باشند. رشد کنترل‌نشده آن‌ها خطر شکست ناگهانی سازه را افزایش می‌دهد و کنترل و ترمیم ترک‌ها برای حفظ ایمنی و عملکرد طولانی‌مدت سازه‌ها اهمیت بالایی دارد، به‌ویژه در صنایع حساس مانند هوافضا، دریایی و خودرو. یکی از مؤثرترین روش‌ها برای ترمیم ترک‌ها، استفاده از وصله‌های چسبی و کامپوزیتی است که با توزیع مجدد تنش و کاهش تمرکز آن، رشد ترک را مهار می‌کنند. این وصله‌ها ظرفیت باربری قطعات را افزایش داده و عملکرد سازه را بهبود می‌بخشند، ضمن اینکه نصب آن‌ها سریع و کم‌وزن است. با طراحی مناسب، جنس، ضخامت و جهت‌گیری الیاف وصله می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر کاهش تمرکز تنش و افزایش دوام سازه داشته باشد[۱]. نصب سریع، وزن کم و تأثیر محدود بر ساختار اصلی، این روش را برای ترمیم قطعات غیرقابل تعویض ایده‌آل کرده است. کارایی وصله‌ها به ویژگی‌های هندسی و مواد آن‌ها بستگی دارد؛ عواملی مانند جنس، ضخامت، طول و عرض، تعداد و ترتیب لایه‌ها و جهت‌گیری الیاف، می‌توانند مسیر رشد ترک و رفتار مکانیکی نواحی ترک‌دار را به‌طور قابل توجهی بهبود دهند [۲-۵]. تحقیقات آزمایشگاهی با روش‌هایی مانند آکوستیک امیشن[1] و تصویربرداری حرارتی نشان داده‌اند که با افزایش ضخامت یا تعداد لایه‌ها، مکانیزم خرابی از شکست الیاف و ماتریس به جدایش وصله تغییر می‌کند [۶, ۷]. تحلیل‌های عددی و سه‌بعدی اجزای محدود نیز نشان داده‌اند که افزایش طول وصله، انتخاب جهت‌گیری مناسب لایه‌ها و بهینه‌سازی هندسه، انرژی کرنش نوک ترک را کاهش داده و مسیر رشد ترک را کنترل می‌کند[۸, ۹]. همچنین، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که وصله‌های دایره‌ای و مستطیلی بورن-اپوکسی بهترین عملکرد را در کاهش شدت تنش و انتگرال J دارند و بهینه‌سازی هندسه و جهت‌گیری الیاف می‌تواند شدت تنش را تا ۵۰–۹۰٪ کاهش دهد[۱۰-۱۳].

مطالعات اخیر نیز کارایی ترمیم با وصله‌های کامپوزیتی[2] را در شرایط واقعی بررسی کرده‌اند[۱۴] نشان دادند که وصله‌های E-Glass/Epoxy ظرفیت باربری صفحات آلومینیومی را افزایش داده و نرخ آزادسازی انرژی کرنشی (J-Integral) را کاهش می‌دهند، که منجر به کاهش رشد ترک و تغییر رفتار مکانیکی از حالت خمشی به کششی در لوله‌های فولادی دریایی مشاهده کردند که وصله‌های CFRP بیشینه تنش تا ۲۰٪ کاهش داده و رشد ترک‌های سطحی را مؤثرتر از ترک‌های داخلی محدود می‌کنند. [۱۵] نشان دادند که وصله‌های دوطرفه به دلیل تقارن، ممان خمشی اضافی را حذف کرده و کارایی بالاتری نسبت به وصله‌های یک‌طرفه دارند.[۱۶, ۱۷] نیز اثر هندسه و شکل وصله‌ها را بر کاهش شدت تنش و تمرکز آن در صفحات کامپوزیتی و فولادی بررسی کردند و به اهمیت طراحی بهینه وصله‌ها اشاره نمودند. با وجود مطالعات قبلی، بیشتر تحقیقات تنها تأثیر یک یا دو پارامتر وصله‌های کامپوزیتی را بررسی کرده‌اند و اثر هم‌زمان جنس، ضخامت، تعداد لایه‌ها و زاویه چیدمان الیاف کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با شبیه‌سازی سه‌بعدی در آباکوس[3] عملکرد وصله‌های کامپوزیتی روی ورق‌های فولادی ترک‌دار را تحلیل می‌کند. مدل شامل تعریف خواص مکانیکی ورق و وصله‌ها، شرایط مرزی و بارگذاری واقعی است و پارامترهای جنس، ضخامت، تعداد لایه‌ها و زاویه الیاف بررسی شده‌اند. با مش‌بندی ریز در ناحیه نوک ترک و مدل تماس اصطکاکی، پارامترهای مکانیک شکست مانند ضریب شدت تنش، نرخ آزادسازی انرژی، توزیع تنش و کرنش و رفتار لغزش به دقت استخراج می‌شوند. هدف پژوهش، ارزیابی اثر وصله‌ها بر کاهش تمرکز تنش و ارائه راهکارهای بهینه طراحی است.

۲ - مواد و روش ها

شبیه‌سازی عددی رفتار ترک در ورق فولادی تقویت‌شده با وصله‌های کامپوزیتی به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شد. دو نوع وصله کامپوزیتی شامل کربن–اپوکسی و شیشه–اپوکسی موردبررسی قرار گرفت. برای هر یک از این وصله‌ها، پیکربندی‌های مختلف شامل تعداد لایه‌های ۴، ۵، ۶ و ۱۲ با سه زاویه الیاف صفر درجه، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه مدل‌سازی شدند. در تمامی حالات، پارامترهای کلیدی نظیر تنش عمودی S_{22}، ضریب شدت تنش (SIF)و بازشدگی نوک ترک (CTOD) استخراج و به‌صورت مقایسه‌ای تحلیل گردیدند. در ادامه، روش‌های تحلیلی و روابط حاکم مورد استفاده برای محاسبه این پارامترها تشریح می‌شود.

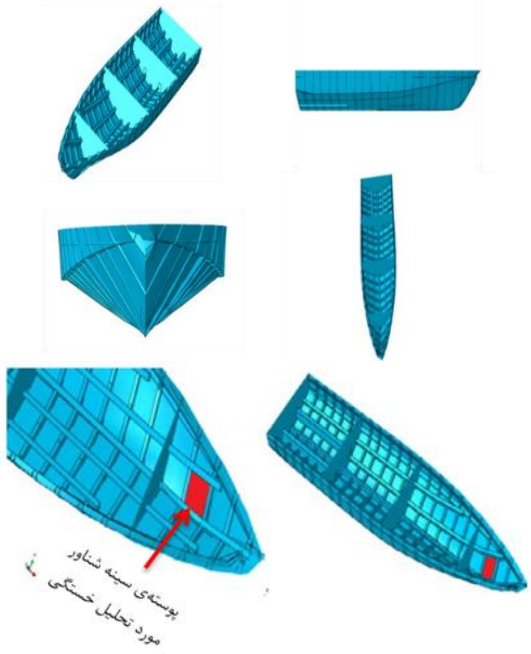
۲-۱- پارامترهای طراحی و مشخصات شناور مورد تحلیل

در این مقاله، بدنهٔ یک شناور تندرو تک بدنه به‌عنوان نمونه مورد تحلیل قرار گرفته است تا اثر وصله‌های کامپوزیتی بر ترک‌ها و رفتار مکانیکی آن بررسی شود. بدنه شناور و پوسته شناور مورد تحلیل از نماهای مختلف در شکل ۱ نمایش داده شده است و مشخصات عمومی آن در جدول ۱ ارائه شده است[۱۸]. در ادامه جزئیات

[1] Acoustic Emission
[2] Composite patch
[3] Abaqus

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

هندسی، مواد و ویژگی‌های سازه‌ای این شناور تشریح می‌گردد تا زمینه لازم برای شبیه‌سازی ترک و اعمال وصله‌های کامپوزیتی فراهم شود.



شکل ۱- بدنه شناور تندرو مورد مطالعه از نماهای مختلف[۱۸]

جدول ۱_ مشخصات عمومی شناور کامپوزیتی مورد مطالعه [۱۸]

مشخصه	نماد	مقدار
طول سر تا سری شناور (m)	$L_{over\ all}$	۸/۵
عرض شناور (m)	B	۲
وزن شناور (ton)	Δ	۵
سرعت شناور (Knot)	V	۳۸/۸۷
آبخور طراحی شناور (m)	T	۰/۶۵
عرض آبخور در میانه شناور (m)	B_{WL2}	۱/۶
فاصله بین تقویت‌ها (m)	S	۰/۲۳
فاصله عمودی از خط آبخور تا نقطه بارگذاری (m)	h_0	۰/۱۵
طول کلی مسیر در لبه شناور (m)	L_{side}	۲۳/۷
زاویه انحراف کف در محل مرکز ثقل شناور (deg)	β_{cg}	۱۵
زاویه انحراف کف شناور (deg)	β_x	۱۷
ارتفاع موج (m)	H_{si}	۰/۲۵
تعداد بدنه شناور	N	۱
ضریب بلوکی	C_B	۰/۴۵

پوستهٔ سینه شناوری که تحلیل آن بررسی می‌شود، دارای ابعاد ۴۵۰×۴۳۵ میلیمتر و از جنس ورق فولادی که خواص مکانیکی آن در جدول ۲ آورده شـــده اســـت.

جدول ۲ - مشخصات مصالح فولاد بدنه

مدول الاستیسیته، E	۲۱۰Gpa
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم کششی	۲۵۰Mpa
تنش کششی نهایی	۴۰۰Mpa

جنس وصله‌های کامپوزیتی از نوع کربن اپوکسی و فیبر شیشه در نظر گرفته شده است که مشخصات آنها در جدول ۳ و ۴ نمایش داده شده است[۱۹].

جدول ۳_ مشخصات الیاف شیشه[۱۹]

ویژگی	توضیح	مقدار
	چگالی	۱۸۰۰kg/m^3
	مدول یانگ در راستای طولی(الیاف)	۳۰/۹۰GPa
	مدول یانگ در راستای عرضی	۸/۳۰ GPa
	مدول برشی درون صفحه ای	۲/۸۰ GPa
	مدول برشی خارج از صفحه	۳/۰۰ GPa
	استحکام کششی در راستای طولی	۷۹۸ MPa
	استحکام فشاری در راستای عرضی	۴۸۰ MPa
	استحکام برشی	۴۰ MPa

جدول ۴_ مشخصات کربن اپوکسی [۱۹]

نماد	توضیح	مقدار
E	مدول یانگ	۹۰۰۰ MPa
ν	ضریب پواسون	۰/۳۴۲
G	مدول برشی	۴۸۰۰MPa
X	مقاومت کششی	۱۵۰۰MPa
S	مقاومت برشی	۶۲ MPa
Y	مقاومت فشاری	۱۲۰۰ MPa

برای طراحی و ارزیابی استحکام سازه‌های شناور، فشارها و نیروهای وارد بر آن شامل فشارهای دینامیکی و استاتیکی دریا، مایعات داخل مخازن و بارهای خشک تجهیزات باید در نظر گرفته شوند. در این بخش، محاسبه این فشارها برای شناور تندرو کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. هنگام ورود بدنه شناور با سرعت بالا به سطح آب، فشار اضافی در طول سازه ایجاد می‌شود که به آن اسلمینگ گفته می‌شود و عمدتاً در قسمت جلویی و کف شناور هنگام برخورد موج رخ می‌دهد. برای محاسبه فشار اسلمینگ روی پوسته کف، در شرایطی که نسبت $V/L \geq 3$ برقرار باشد، از رابطه استاندارد DNVGLاستفاده می‌شود.[۲۰]

$$P_{sl} = \frac{a_{CG}.\Delta}{0.14A_{ref}}.K_{red}.K_l.K_\beta \quad (۱)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

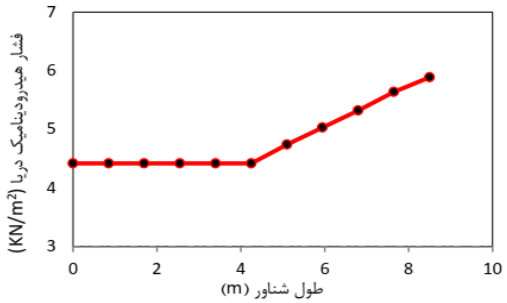
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

پارامترهای لازم جهت محاسبه فشار اسلمینگ در جدول ۵ نشان‌داده‌شده است.

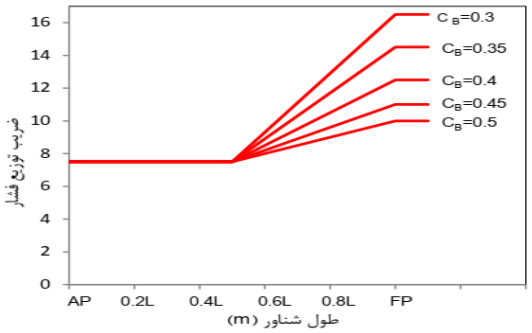
جدول ۵_ فشار اسلمینگ وارد بر کف شناور [۱۸]

ناحیه شناور	ضریب توزیع طولی (K_l)	فشار اسلمینگ (kN/m^2)
پاشنه شناور	۰/۵	۴۲/۱۹
۰/۱ طول شناور	۰/۶	۵۰/۶۳
۰/۲ طول شناور	۰/۷	۵۹/۰۶
۰/۳ طول شناور	۰/۸	۶۷/۵
۰/۴ طول شناور	۰/۹	۷۵/۹۴
سینه – ۰/۵ طول شناور	۱	۸۴/۳۸

برای محاسبه فشار هیدرودینامیک کف شناور، ابتدا ضریب شدت بارگذاری aاز جدول استاندارد DNVGL استخراج شد که با توجه به مشخصات شناور برابر ۱ در نظر گرفته شد. فاصله عمودی از خط آبخور تا مرکز فشار H_0طبق مشخصات عمومی شناور برابر ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شد. ضریب توزیع فشار K_Sبا توجه به ضریب بلوکی شناور $C_B = 0.5$از شکل ۳ محاسبه گردید و ضریب موج C_Wمطابق استاندارد DNVGL برابر ۰/۴۰۸ در نظر گرفته شد. سپس با جایگذاری مقادیر K_Sبرای نقاط مختلف شناور و سایر پارامترها، فشار هیدرودینامیک دریا وارد بر کف شناور محاسبه شد و نتایج در جدول ۶ و شکل ۲ ارائه شد.



شکل ۲_ نمودار فشارهای هیدرودینامیک دریا وارد بر کف شناور [۱۸]



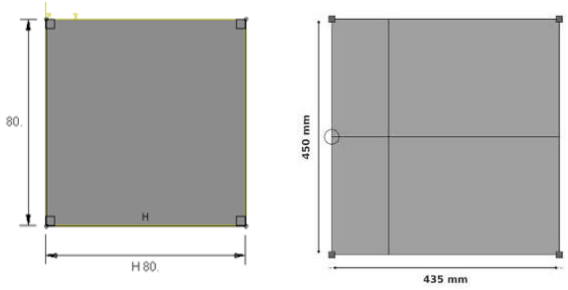
شکل ۳_ نمودار ضریب توزیع فشار [33]

جدول ۶ _فشار وارد بر کف شناور [۱۸]

ناحیه شناور	ضریب توزیع فشار	فشار (kN/m^2)
پاشنه – ۰/۵ طول شناور	۷/۵	۴/۴۲
۰/۶ طول شناور	۸/۳	۴/۷۴
۰/۷ طول شناور	۹	۵/۰۳
۰/۸ طول شناور	۹/۷	۵/۳۲
۰/۹ طول شناور	۱۰/۵	۵/۶۴
سینه شناور	۱۱/۱	۵/۸۹

۲-۲- مدلسازی عددی

مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار آباکوس بادقت بالا انجام شد. ابتدا هندسه سه‌بعدی ورق فولادی ترک‌دار و وصله‌های کامپوزیتی تعریف شد و برای وصله‌ها، تعداد لایه‌ها، ضخامت هر لایه و زاویه چیدمان الیاف مطابق با خواص مکانیکی کربن-اپوکسی و فیبر شیشه‌ای تعیین گردید. خواص مکانیکی مواد در مدل اعمال شد و تعامل بین وصله و ورق از طریق شرایط تماس اصطکاکی شبیه‌سازی گردید تا اتصال واقعی بازتولید شود. بارگذاری مکانیکی به‌صورت کششی یا خمشی اعمال و شرایط مرزی مناسب برای بازتولید رفتار عملیاتی سیستم تنظیم شد. مش‌بندی دقیق به‌ویژه در ناحیه نوک ترک انجام شد تا شدت تنش و رفتار رشد ترک با دقت بالا تحلیل شود. این مدل‌سازی امکان بررسی عملکرد وصله‌ها و تأثیر آن‌ها بر کاهش رشد ترک را فراهم می‌آورد و ورق فولادی با ضخامت ۶ میلی‌متر و وصله‌های کامپوزیتی با ضخامت متغیر در نظر گرفته شد.



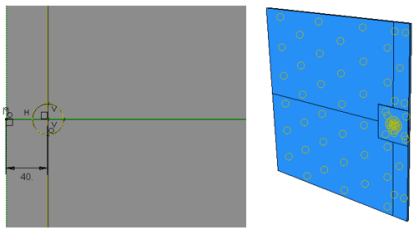
شکل ۵- (الف) هندسه مدل (ب) وصله

برای شبیه‌سازی ترک از روش انتگرال J استفاده شده است. در این روش، ابتدا محل ترک و سپس خود ترک به نرم‌افزار معرفی می‌گردد. در این پژوهش، یک ترک اولیه به طول ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا مقادیر فاکتور شدت تنش و تنش‌های حاکم در راستای اعمال نیرو قابل‌بررسی باشند. مشخصات هندسی ترک در شکل ۶ الف ارائه شده است. به منظور تضمین کیفیت المان‌ها در ناحیه نوک ترک، یک منطقه دایره‌ای با شعاع تقریباً نصف طول ترک تعریف گردید تا در مرحله المان‌بندی، دقت و کیفیت المان‌ها در این محدوده حفظ شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

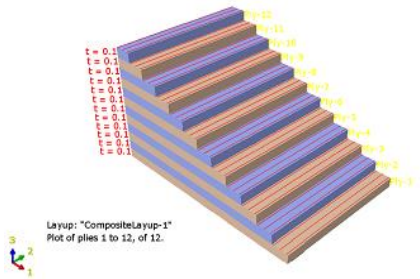
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

با قرارگیری وصله بر روی ورق فولادی مطابق شکل۶ ب، اتصال بین وصله و ورق با استفاده از قید صلب برقرار شده است. این قید امکان اتصال کامل و یکپارچه وصله کامپوزیتی به ورق فولادی را فراهم می‌کند.



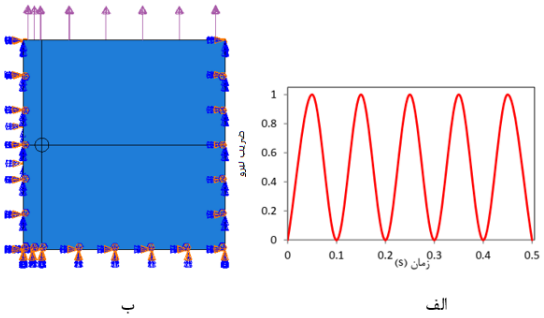
شکل ۶_ الف) اتصال وصله کامپوزیتی به ورق فولادی ب) ابعاد ترک در نظر گرفته شده

برای ورق فولادی، مدول الاستیسیته و چگالی مطابق با مشخصات فولاد مربوطه در نظر گرفته شد. برای وصله‌های کامپوزیتی مطابق شکل ۹ از مدل مواد پوسته پیوسته استفاده شده و تعداد لایه‌ها به ترتیب ۴، ۵، ۶ و ۱۲ لایه در نظر گرفته شد. زاویه قرارگیری الیاف که یکی از پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق است، به‌صورت ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه لحاظ شده است؛ به‌طوری که جهت ۹۰ درجه در راستای نیروی کششی و جهت ۰ درجه عمود بر این نیرو است. ضخامت هر لایه ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده و با افزایش تعداد لایه‌ها، ضخامت کل وصله افزایش می‌یابد. شکل ۷ نمایی از مواد کامپوزیتی برای ۱۲ لایه با زاویه الیاف ۹۰ درجه را نشان می‌دهد.



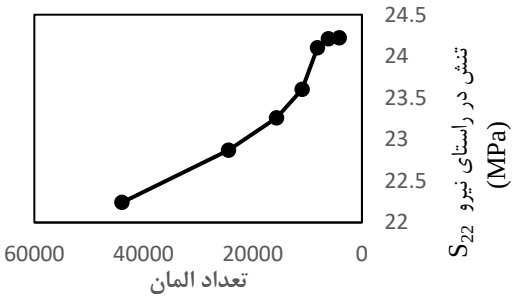
شکل ۷_ مواد کامپوزیتی در نظر گرفته شده

در ادامه، نحوه بارگذاری و شرایط مرزی توضیح داده می‌شود. در دو لبه موازی ترک، تمامی درجات آزادی به جز جهت y مقید شده‌اند. در لبه‌های دیگر، در یک سمت نیروی کششی به بزرگی ۳۴/۸ کیلونیوتن اعمال شده است که الگوی آن مطابق شکل ۸ الف می‌باشد، و در سمت مقابل تمامی درجات آزادی مقید شده‌اند. شرایط مرزی و نحوه اعمال نیرو در شکل ۸ ب نمایش داده شده است.



شکل ۸_ الف) شماتیک بارگذاری نوسانی اعمال شده در نرم‌افزار ب) شرایط مرزی در نظر گرفته شده در نرم افزار

ورق فولادی با المان پوسته‌ای چهارگره‌ای S4R و وصله کامپوزیتی با المان سه‌بعدی SC8R مش‌بندی شد؛ S4R برای تحلیل صفحات و پوسته‌ها و SC8R برای سازه‌های سه‌بعدی با ضخامت قابل‌توجه مناسب است و با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته، هزینه محاسباتی را کاهش داده و از قفل‌شدگی جلوگیری می‌کند. آنالیز حساسیت مش نشان داد افزایش تعداد المان‌ها فراتر از حد مشخص تأثیری بر دقت ندارد و تنها زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. بنابراین ابتدا تعداد مشخصی المان در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی انجام گردید، سپس تعداد المان‌ها به تدریج افزایش یافت تا اختلاف نتایج کمتر از ۳–۵٪ شود. نتایج نشان داد که پس از ۸۱۷۶ المان با اندازه ۷ میلی‌متر، تغییرات تنش بسیار کم است و این اندازه و تعداد برای تحلیل نهایی انتخاب شد؛ همگرایی المان‌ها در نمودار شکل ۹ و جزئیات در جدول ۸ ارائه شده است.



شکل ۹ _نمودار آنالیز همگرایی المان‌ها

جدول ۸ _همگرایی المان‌ها

تنش S22 (MPa)	تعداد المان‌ها
۲۴.۲۲	۴۱۴۴
۲۴.۲۱	۶۱۴۴
۲۴.۱	۸۱۷۶
۲۳.۶	۱۰۹۴۰
۲۳.۲۶	۱۵۶۳۲
۲۲.۸۷	۲۴۴۲۴
۲۲.۲۴	۴۳۹۷۲

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

۳-نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی دقیق عملکرد وصله‌های کامپوزیتی در ترمیم ترک‌های ورق فولادی، در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های عددی ارائه و تحلیل می‌شوند در این تحلیل، دو جنس وصله (کربن-اپوکسی و الیاف شیشه‌ای) با تعداد لایه‌های ۴، ۵، ۶ و ۱۲ و زاویه الیاف ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه بررسی شدند. پارامترهای کلیدی شامل تنش محوری S22 ، ضریب شدت تنش (K) و بازشدگی نوک ترک (COD)بودند. نتایج شبیه‌سازی با محاسبات تحلیلی رابطه (۲۲) مقایسه و اعتبار مدل اجزای محدود تأیید شد[۱۸].

$$K_1 = \sigma_{yy} \cdot \sqrt{\pi a} \cdot f(\eta),\ \eta = a/w, \qquad (۲۲)$$

$$f(\eta) = 1.12 - 0.23\eta + 10.56\eta^2 - 21.74\eta^3 + 30.42\eta^4 \quad \eta = \frac{a}{w} = \frac{40}{435} = 0.091$$

$$f(\eta) = 1.12 - 0.23(0.091) + 10.56(0.091)^2 - 21.74(0.091)^3 + 30.42(0.091)^4 = 1.17$$

$$K_1 = 5.42 \cdot \sqrt{\pi 40} \cdot 1.17 = 71.086$$

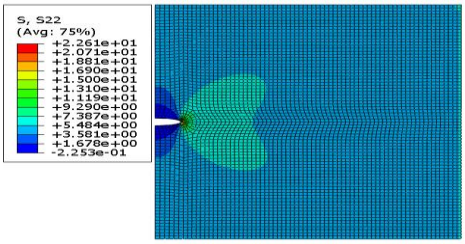
فاکتور تنش در نرم‌افزار و درصد اختلاف:

$$\frac{71.08 - 62.17}{71.08} \cdot 100 = 12.53\%$$

باتوجه‌به تطابق مناسب میان مقادیر محاسبه‌شده از رابطهٔ تئوری و نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف موجود ناچیز بوده و مدل عددی به‌کاررفته از دقت و اعتبار کافی برخوردار است.

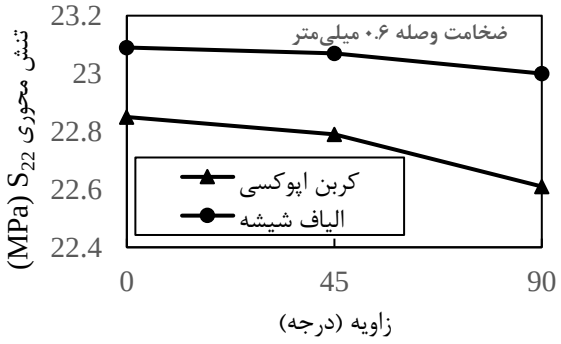
۳-۱- تحلیل تنش محوری S22در ورق ترک‌دار بدون وصله

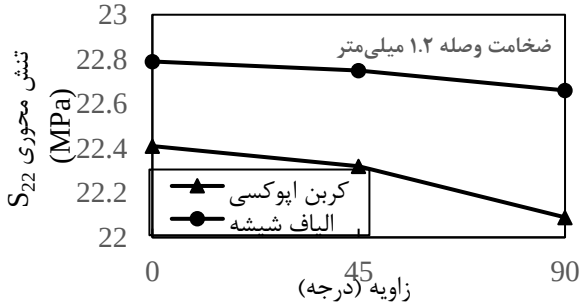
در آباکوس، مؤلفه S22 تنش نرمال در راستای محور ۲ است و تمرکز تنش آن در نوک ترک اهمیت بالایی دارد؛ در ورق‌های ترک‌دار بدون وصله، S22به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، درحالی‌که استفاده از وصله‌های کامپوزیتی با مدول بالا و ضخامت مناسب، تمرکز تنش را کاهش داده و عملکرد ترمیمی را بهبود می‌بخشد؛ نمونه توزیع S22 برای وصله کربن-اپوکسی ۶ لایه با زاویه الیاف ۹۰ درجه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- توزیع تنش S_{22} در حالت وصله با جنس کربن اپوکسی و ۱۲ لایه با زاویه الیاف ۹۰

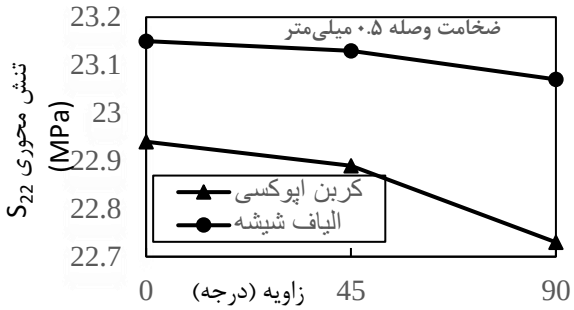
در این مطالعه، اثر زاویه الیاف بر توزیع تنش محوری S22 در وصله‌های کامپوزیتی با ضخامت ثابت و جنس‌های کربن–اپوکسی و الیاف شیشه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد کمترین کاهش S22 مربوط به وصله شیشه‌ای با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر و زاویه ۰ درجه است که تنش برابر ۲۳/۱۵ مگاپاسکال و کاهش ۱/۶۹٪ نسبت به نمونه بدون وصله دارد، و بیشترین کاهش S22 مربوط به وصله کربن–اپوکسی با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر و زاویه ۹۰ درجه است که تنش به ۲۲/۰۹ مگاپاسکال و کاهش ۶/۱۹٪رسید. قرارگیری الیاف در زاویه ۹۰ درجه سبب هم‌راستایی با نیروی کششی و کاهش تمرکز تنش در نوک ترک می‌شود، و افزایش ضخامت وصله توزیع بار را بهبود داده و تنش‌های متمرکز را کاهش می‌دهد. وصله‌های کربن–اپوکسی به دلیل مدول و مقاومت بالاتر، عملکرد بهتری در کاهش S22 دارند، در حالی که وصله‌های شیشه‌ای با مدول کمتر، کاهش تنش کمتری ایجاد می‌کنند.

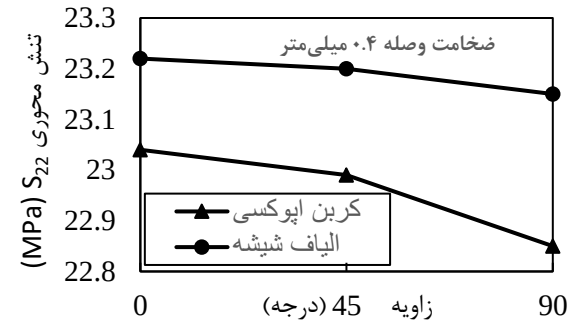




[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

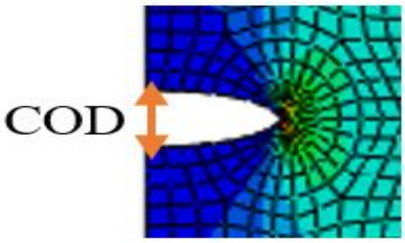




شکل ۱۱- نمودار تغییرات تنش محوری S_{22} در اثر تغییر زاویه الیاف، جنس و ضخامت وصله

۳-۲بررسی اثر زاویه الیاف، جنس و ضخامت وصله بر بازشدگی نوک ترک(COD)

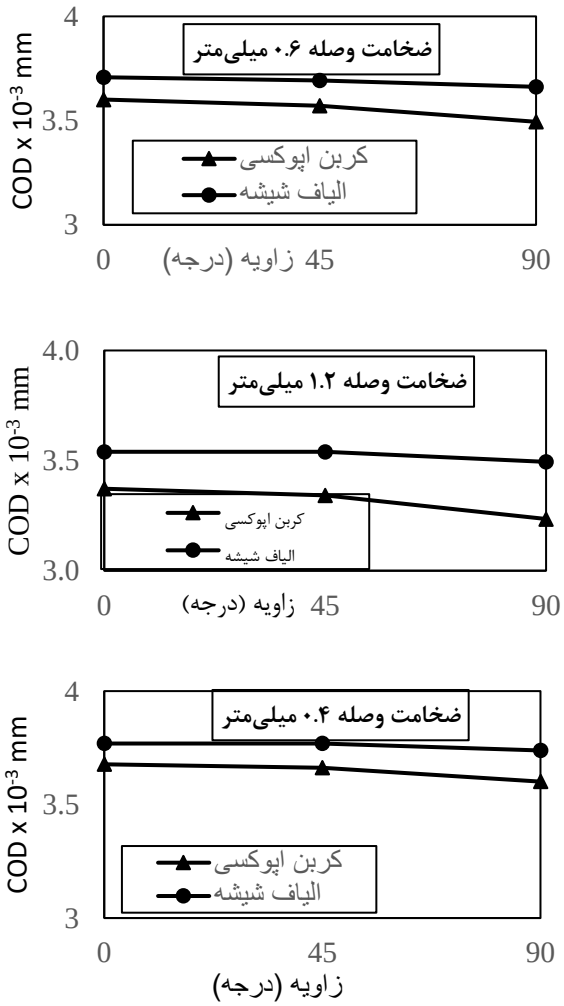
در این بخش، تأثیر ویژگی‌های مختلف وصله‌های کامپوزیتی بر بازشدگی نوک ترک (COD) در ورق فولادی ترک‌دار بررسی می‌شود. COD معیاری برای اندازه‌گیری جابه‌جایی ایجادشده در نوک ترک تحت بارگذاری، معمولاً در راستای عمود بر ترک، است و نقش مهمی در پیش‌بینی گسترش ترک و رفتار سازه دارد. ابتدا مقدار COD در ورق بدون وصله تعیین شد که برابر 3.9×10^{-3} میلی‌متر به‌دست آمد. سپس، اثر استفاده از وصله‌های کامپوزیتی با جنس‌های کربن–اپوکسی و شیشه–اپوکسی، ضخامت‌های متفاوت و زوایای الیاف مختلف بر کاهش COD تحلیل و نتایج به‌صورت مقایسه‌ای ارائه می‌شوند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- نمایش COD در نوک ترک

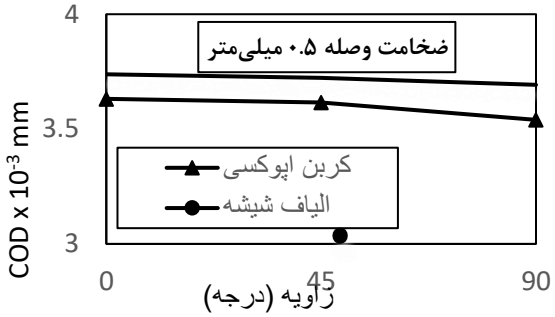
در این بخش، تأثیر زاویه الیاف، جنس و ضخامت وصله بر بازشدگی نوک ترک (COD) بررسی می‌شود. تغییرات COD برای نمونه‌های دارای وصله کربن–اپوکسی و الیاف شیشه‌ای با زاویه الیاف ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه مطابق نمودار شکل ۱۳ ارائه شده است. در این تحلیل، جنس و ضخامت وصله ثابت بوده و تنها زاویه الیاف تغییر داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که کمترین کاهش COD مربوط به وصله الیاف شیشه‌ای با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر و زاویه ۰ درجه است، که مقدار COD برابر $۳/۶۷\times۱۰^{-۳}$ میلی‌متر و کاهش ٪۵.۸۵ نسبت به حالت بدون وصله را نشان می‌دهد. بیشترین کاهش COD نیز مربوط به وصله کربن–اپوکسی با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر و زاویه ۹۰ درجه است که مقدار COD برابر $۳/۴۹\times۱۰^{-۳}$ میلی‌متر و کاهش ٪۱۰/۵۸ را نشان می‌دهد.

کاهش بیشتر COD در زاویه ۹۰ درجه و با ضخامت بالاتر ناشی از توزیع مؤثرتر نیرو و ویژگی‌های مکانیکی وصله است، زیرا هم‌راستایی الیاف با جهت نیرو، انتقال بار را مؤثرتر کرده و تمرکز تنش در نوک ترک را کاهش می‌دهد. افزایش ضخامت وصله نیز توزیع نیرو در سطح وسیع‌تری را ممکن کرده و تغییر شکل نوک ترک را کاهش می‌دهد. وصله‌های کربن–اپوکسی به دلیل مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالاتر، بار را مؤثرتر منتقل کرده و CODرا به طور چشمگیری کاهش می‌دهند، در حالی که وصله‌های الیاف شیشه‌ای با مقاومت کمتر توانایی کمتری در توزیع نیرو دارند و کاهش COD در آن‌ها محدودتر است.



[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

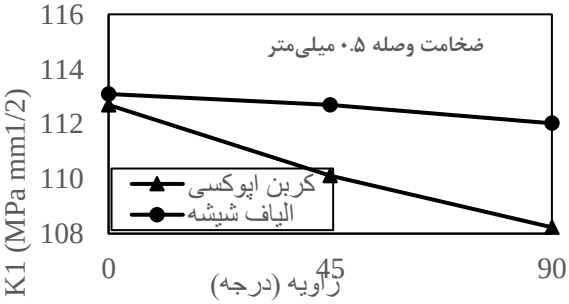


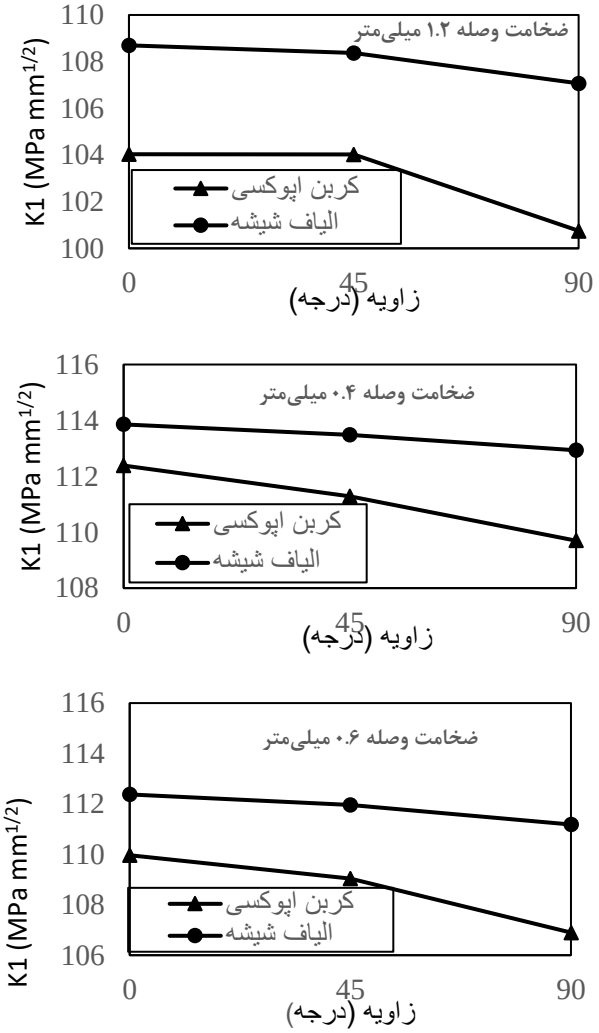
شکل ۱۳- نمودار تغییرات COD در اثر تغییر زاویه الیاف، جنس و ضخامت وصله

۳-۳تأثیر جنس، ضخامت و زاویه الیاف وصله بر ضریب شدت تنش(K)

در این بخش، تأثیر ویژگی‌های وصله‌های کامپوزیتی شامل جنس، ضخامت و زاویه الیاف بر ضریب شدت تنش (Stress Intensity Factor, K)در ورق ترک‌دار بررسی می‌شود. ضریب شدت تنش یکی از پارامترهای کلیدی در مکانیک شکست است که شدت تمرکز تنش در نوک ترک را توصیف می‌کند و در سه حالت باز شدن (Mode I)، لغزش (Mode II) و پارگی (Mode III) تعریف می‌شود. مقدار K به هندسه سازه، طول ترک، نوع بارگذاری و خواص مکانیکی ماده بستگی دارد و زمانی‌که از مقدار بحرانی K_ICفراتر رود، ترک گسترش یافته و شکست رخ می‌دهد.

برای ورق ترک‌دار بدون وصله، ضریب شدت تنش K برابر ۱۱۷/۲۸ MPa√mmبود و با افزودن وصله‌های کامپوزیتی، تغییرات K تحلیل شد. کمترین کاهش K مربوط به وصله شیشه‌ای ۰/۴ میلی‌متر با زاویه ۰ درجه (K = 113.857, کاهش ۲.۹۱٪) و بیشترین کاهش مربوط به وصله کربن–اپوکسی ۱/۲ میلی‌متر با زاویه ۹۰ درجه (K = 100.75, کاهش ۱۴٪) بود. کاهش بیشتر در زاویه ۹۰ درجه به هم‌راستایی الیاف با بار کششی و توزیع یکنواخت نیرو مربوط می‌شود و افزایش ضخامت وصله نیز تمرکز تنش را کاهش می‌دهد. وصله‌های کربن–اپوکسی با مدول بالاتر عملکرد مؤثرتری نسبت به شیشه‌ای دارند و نتایج در نمودار شکل ۱۶ ارائه شده است.





شکل ۱۴-نمودار تغییرات K در اثر تغییر زاویه الیاف، جنس و ضخامت وصله

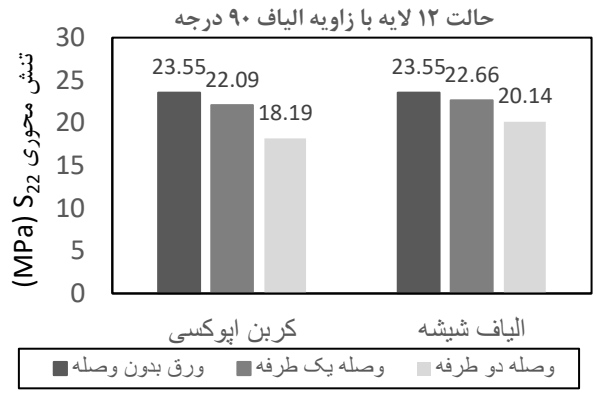
۳-۴تأثیر جنس، ضخامت و زاویه الیاف وصله‌های دوطرفه بر ضریب شدت تنش (K) و تنش محوری S22

با تعیین مؤثرترین تعداد لایه و زاویه الیاف در وصله‌ها، اثر افزودن یک وصله دیگر در سمت مقابل ورق بر تنش محوری (S22) و ضریب شدت تنش (K) بررسی شد. برای نمونه‌های ۱۲ لایه با زاویه الیاف ۹۰ درجه، نتایج (شکل ۱۵) نشان می‌دهد که استفاده از یک وصله کربن–اپوکسی کاهش S22 حدود ٪۶.۱۹ ایجاد می‌کند و دو وصله این کاهش را به ٪۲۲.۷۶ می‌رساند. در وصله‌های شیشه‌ای، کاهش S22 از ٪۳.۷۷ در حالت یک‌طرفه به ٪۱۴.۴۸ در حالت دوطرفه افزایش می‌یابد. دو وصله موجب تقارن سختی، توزیع یکنواخت‌تر بار و کاهش تمرکز تنش در نوک ترک می‌شوند، در حالی که وصله‌های یک‌طرفه توزیع نامتقارن سختی دارند و بار بیشتری روی ناحیه ترک متمرکز می‌شود. علاوه بر این، دو وصله انتقال بار به ماده زمینه را بهبود داده و تغییر شکل‌ها و کرنش‌های

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

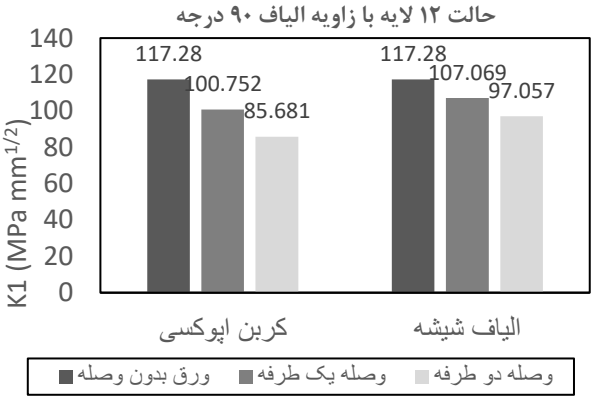
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

موضعی اطراف ترک را کاهش می‌دهند، بنابراین S22 در نزدیکی ترک به شکل مؤثرتری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵_ مقایسه تغییرات تنش محوری S_{22} در اثر افزودن دو وصله

تغییرات ضریب شدت تنش K برای نمونه ۱۲ لایه با زاویه الیاف ۹۰ درجه و دو جنس وصله ارائه شده است (نمودار شکل ۱۶). در وصله کربن-اپوکسی، K در حالت یک‌طرفه ٪۱۴ کاهش یافت و با افزودن دو وصله به **٪۲۶.۹۴** رسید. برای وصله‌های الیاف شیشه، کاهش K به ترتیب ٪۷.۸ و ٪۱۷.۲۴ بود. استفاده از وصله‌های دوطرفه باعث تقارن سیستم، کاهش جابه‌جایی نوک ترک و کاهش بازشدگی آن می‌شود که منجر به کاهش تمرکز تنش و کاهش K می‌گردد. در وصله‌های یک‌طرفه، توزیع سختی نامتقارن باعث جابه‌جایی غیر یکنواخت نوک ترک و ایجاد تنش‌های موضعی اضافی شده و K افزایش می‌یابد. در مقابل، دو وصله، میدان‌های تنشی را هماهنگ‌تر کرده و تمرکز تنش و ضریب شدت تنش را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۶- مقایسه تغییرات شدت تنش در اثر افزودن دو وصله

۴-نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر وصله‌های کامپوزیتی بر رفتار شکست ورق‌های ترک‌دار فولادی بررسی شد. پارامترهای مطالعه شامل جنس وصله، ضخامت، زاویه الیاف و تعداد وصله‌ها بودند. نتایج نشان داد که این عوامل نقش مهمی در کاهش تنش محوری S22 ، بازشدگی نوک ترک (COD) و ضریب شدت تنش (K) دارند.

در وصله‌های کربن–اپوکسی، یک وصله باعث کاهش ٪۱۴ در K شد و افزودن وصله دوم کاهش K را به ٪۲۶/۹۴ رساند. برای وصله‌های الیاف شیشه‌ای، کاهش K با یک وصله ٪۷/۸ و با دو وصله ٪۱۷/۲۴ بود. کمترین کاهش K مربوط به وصله شیشه‌ای ۰/۴ میلی‌متر و زاویه ۰ درجه ٪۲/۹۱ و بیشترین کاهش مربوط به وصله کربن–اپوکسی ۱.۲ میلی‌متر و زاویه ۹۰ درجه ٪۱۴ بود.

تنش محوری S22 نیز با یک وصله کربن–اپوکسی ٪۶/۱۹ و با دو وصله ٪۲۲/۷۶ کاهش یافت، در حالی که وصله‌های شیشه‌ای یک‌طرفه و دوطرفه کاهش ٪۳/۷۷ و ٪۱۴/۴۸ داشتند. حداکثر تنش S22 در نوک ترک ۲۳/۵۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

COD نیز تحت‌تأثیر جنس، ضخامت و زاویه الیاف بود؛ کمترین کاهش COD مربوط به وصله شیشه‌ای ۰/۴ میلی‌متر و زاویه ۰ درجه ٪۵/۸۵ و بیشترین کاهش مربوط به وصله کربن–اپوکسی ۱/۲ میلی‌متر و زاویه ۹۰ درجه ٪۱۰/۵۸ بود. مقدار COD در ورق بدون وصله 3.9×10^{-8}-۳ میلی‌متر بود.

افزایش ضخامت و زاویه الیاف ۹۰ درجه باعث توزیع بهتر بار و کاهش تمرکز تنش شد. استفاده از وصله‌های دوطرفه اثر قابل‌توجهی در کاهشS22، COD و K نسبت به وصله‌های یک‌طرفه داشت. وصله‌های کربن–اپوکسی به دلیل مدول الاستیسیته و مقاومت بالاتر عملکرد بهتری در کاهش تنش‌ها و کنترل گسترش ترک نسبت به الیاف شیشه‌ای ارائه دادند.

به‌طور کلی، انتخاب مناسب جنس وصله، ضخامت کافی، زاویه بهینه الیاف و استفاده از وصله‌های دوطرفه، عملکرد ورق ترک‌دار را به‌طور مؤثر بهبود می‌دهد و می‌تواند مبنای طراحی بهینه وصله‌های کامپوزیتی در کاربردهای صنعتی باشد.

۵ - مراجع

1- Baker, A., (2001), *Bonded repair of aircraft structures*, Springer Science & Business Media, Vol.7.

2- Rose, L., (1981), *An application of the inclusion analogy for bonded reinforcements.* International Journal of Solids and Structures, **17**(8): p. 827-838

3- Pipkins, D. and S. Atluri, (1995), *A FEAM Based Methodology for Analyzing Composite Patch Repairs of Metallic Structures.* Composite Repair of Military Aircraft Structures.

4- Bottega, W. and M. Loia, (1996), *Edge debonding in patched cylindrical panels.* International journal of solids and structures, Vol. 33, p.3755-3777

5- Denney, J.J., (1995), Fatigue Response of Cracked Aluminum Panel with Partially Bonded Composite Patch

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]

Journal of Research in Dental Sciences, Vol. 15, p. 5-12

14- Hart, D.C. and H.A. Bruck, (2021), *Predicting failure of cracked aluminum plates with one-sided composite patch.* International Journal of Fracture, Vol. **227**.

15- Li, Z., X. Jiang, and H. Hopman, (2022), *External surface cracked offshore pipes reinforced with composite repair system: A numerical analysis.* Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 117, p. 103-191.

16- Berrahou, M. and K. Amari, (2022), *Numerical analysis of the repair performance of Notched Cracked Composite Structure repaired by composite patch.* Journal of Materials and Engineering Structures «JMES», Vol. **9,** p. 317-326

17- Jassam, Z.N. and R.M. Laftah, (2024), *Investigation of Stress Intensity Factor Reduction using Steel and GFRP Patches for Repairing Edge Cracks in Steel Plates.*

18- Naderian and K. Attabadi, (2020), *Implementation of an algorithm for estimating the fatigue life of a high-speed floating composite shell under oscillating sea pressure load*. Marine Engineering Scientific Research Journal, Vol. 16**,** p. 107-117.

19- Kathiresan, M., K. Manisekar, and V. Manikandan, (2012), *Performance analysis of fibre metal laminated thin conical frusta under axial compression.* Composite Structures, Vol. 94, p. 3510-3519.

20- Liu, M., et al., (2015), *An improved semi-analytical solution for stress at round-tip notches.* Engineering fracture mechanics, Vol. 149, p. 134-143

6- Mohammadi, R., M. Ahmadi Najafabadi, and H. Hosseini Toudeshky, (2017), *Investigation of failure mechanisms of notched aluminum plates repaired with composite patches using acoustic emission method.* Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, p. 406-412

7- Xiong, J. and R. Shenoi, (2008), *Integrated experimental screening of bonded composites patch repair schemes to notched aluminum-alloy panels based on static and fatigue strength concepts.* Composite Structures, Vol. 83, p. 266-272.

8- Chue, C.-H., W.-C. Chou, and T.J.-C. Liu, (1996), *The effects of size and stacking sequence of composite laminated patch on bonded repair for cracked hole.* Applied Composite Materials, **3**(6): p. 355-367

9- Bouiadjra, B.B., et al., (2007), *SIF for inclined cracks repaired with double and single composite patch.* Mechanics of Advanced Materials and Structures, p. 303-308

10- Kaddour, S., et al., (2018), *Analysis of crack propagation by bonded composite for different patch shapes repairs in marine structures: a numerical analysis.* International Journal of Engineering Research in Africa, Vol. 35, p.175-184.

11- Zouambi, L., et al., (2019), *J-integral evaluation of repaired cracks in AA7075-T6 structures subjected to uniaxial tensile stresses.* Polymer Testing, Vol. **77,** p. 105874

12- Msekh, M.A., et al., (2018), *Fracture properties prediction of clay/epoxy nanocomposites with interphase zones using a phase field model.* Engineering Fracture Mechanics, Vol. 188, p. 287-299

13- Barghamdi, et al., (2018), *Investigating the effect of size and amount of amorphous nano-silica particles on the fracture toughness of dental resin composites.*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.21]