

Shear strengthening of corroded Plate Girders

Vahid Fatemi nasab¹, Farzad Shahabian^{2*}

1- Ph. D candidate in structural Engineering, Ferdowsi university, Mashhad, Iran

2- Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi university, Mashhad, Iran

ABSTRACT

Corrosion is a major challenge for the performance and health of structures. Structures in offshore, industrial, and urban settings corrode due to humidity, pollutants and various chemical agents, leading to performance reduction. plate girders have been increasingly used, and the web corrosion of such girders reduces their shear strength. This study evaluated the shear strengthening of corroded plate girders using different stiffener patterns. Corroded and non-corroded plate girders were nonlinearly analysed in ABAQUS. corrosion was modeled through thickness reduction in the numerical models. Uniform, pitting, and groove corrosion patterns as large as 25-75% of the web thickness were considered. Stiffeners were employed to strengthen the corroded plate girders. The effects of different stiffener parameters, including shape, size, and spacing, were investigated. It was found that a 50% web thickness reduction due to corrosion could decrease the shear strength of the plate girder by 47%. Pitting corrosion in the top and bottom of the web led to a 36% shear strength decline, and the top corrosion was more critical than the bottom corrosion. Flange-web disjoining due to groove corrosion diminished shear strength by 55%. Vertical stiffeners enhanced the strength of the plate girder by 54%. The results showed that T- and L-shaped stiffeners outperformed rectangular stiffeners under the same conditions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 25 November 2023

Revise Date: 02 March 2024

Accept Date: 08 April 2024

Keywords:

Plate girders
Shear strengthening
Uniform corrosion
Localized corrosion
Grove corrosion
Stiffeners

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.425080.3272>

*Corresponding author: Farzad Shahabian

Email address: Shahabf@um.ac.ir

تقویت برشی تیورورق‌های دارای خوردگی

سید وحید فاطمی نسب^۱، فرزاد شهابیان^۲

۱- دانشجوی دکتری گرایش سازه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

پدیده خوردگی از موارد مهم و چالش برانگیز در عملکرد و سلامت سازه‌ها است. سازه‌ها در محیط‌های دریایی، صنعتی و شهری با عامل‌های مختلف خوردگی از جمله رطوبت و آلودگی مواجه می‌باشند که باعث کاهش مقاومت و کارایی سازه می‌شود. در این پژوهش سعی بر تقویت برشی تیورورق‌های دارای خوردگی با استفاده از الگوهای مختلف سخت‌کننده بوده است. تحلیل غیرخطی سازه با و بدون خوردگی توسط نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. الگوی خوردگی به صورت یکنواخت، موضعی و شیاری به شدت ۲۵ تا ۷۵ درصد ضخامت جان تیورورق در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، به منظور تقویت تیورورق‌های دارای خوردگی از سخت‌کننده استفاده شده است. برای این کار، مشخصات مختلف سخت‌کننده در افزایش مقاومت مانند شکل، ابعاد و فاصله سخت‌کننده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که از بین رفتن نصف ضخامت جان در اثر خوردگی یکنواخت، می‌تواند ۴۷ درصد مقاومت برشی تیورورق را کاهش دهد. برای خوردگی موضعی در نواحی بالا و پایین جان، کاهش مقاومت ۳۶ درصدی مشاهده می‌گردد و خوردگی در قسمت بالای جان تیورورق بحرانی‌تر از خوردگی در پایین آن است. از بین رفتن اتصال بال و جان به دلیل خوردگی شیاری، سبب کاهش ۵۵ درصدی مقاومت برشی می‌شود و در حالتی که تیورورق با سخت‌کننده‌های عمودی تقویت شود، افزایش ۵۴ درصدی مقاومت نسبت به حالت بدون سخت‌کننده را به همراه دارد. نتایج حاکی از آن است که سخت‌کننده‌های با سطح مقطع T و L شکل در شرایط یکسان، عملکرد بهتری نسبت به سخت‌کننده مستطیلی از خود بروز می‌دهد.

کلمات کلیدی: تیورورق، خوردگی یکنواخت، خوردگی موضعی، خوردگی شیاری، تقویت برشی، سخت‌کننده.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۲/۰۹/۰۴	۱۴۰۲/۱۲/۱۲	۱۴۰۳/۰۱/۲۰	۱۴۰۳/۰۱/۲۰	۱۴۰۳/۰۹/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.425080.3272
*نویسنده مسئول:		فرزاد شهابیان			
پست الکترونیکی:		shahabf@um.ac.ir			

۱- مقدمه

سازه‌ها همواره تحت تاثیر عامل‌های کاهنده مقاومت و دوام خود مانند خوردگی می‌باشند. صدمه‌های جانی و مالی ناشی از این پدیده، پژوهشگران را وادار به بررسی این رخداد نموده است. تاکنون پژوهش‌های قابل توجهی، در ارتباط با پدیده خوردگی و عوامل تشدید آن از یک سو و مواد مقاوم در برابر خوردگی و تقویت سازه‌های دارای خوردگی، از سوی دیگر انجام شده است. خسارت‌های ناشی از خوردگی می‌تواند به صورت مستقیم مانند تخریب پل‌های فولادی و یا تعویض قطعات ماشین‌آلات دارای خوردگی و یا غیرمستقیم مانند کاهش کارایی دستگاه و سازه باشد [۱-۲].

تیرورق‌ها از اعضای اصلی سازه‌هایی نظیر پل‌ها، انبارها، سازه‌های صنعتی و در مجموع سازه‌های دارای دهانه بزرگ می‌باشد [۳]. دلیل استفاده از تیرورق در این سازه‌ها مقاومت خمشی بالاتر نسبت به نیمرخ‌های موجود در بازار است. تیرورق‌ها به طور معمول از یک جان در بین دو بال بالا و پایین تشکیل می‌شود [۴]. ظرفیت خمشی تیرورق‌ها با افزایش ارتفاع جان بیشتر می‌شود و نقش جان، اتصال دو بال بالا و پایین و تحمل نیروی برشی در عضو می‌باشد [۵]. به دلیل اقتصادی‌تر شدن هر چه بیشتر طرح، جان تیرورق با حداقل ضخامت مورد نیاز انتخاب می‌شود [۶]. از این رو، قبل از فرا رسیدن مقاومت خمشی، صفحه جان تیرورق تحت اثر نیروهای برشی دچار کمانش و یا تسلیم می‌شود [۷-۸].

رطوبت نسبی و عامل‌های شیمیایی در محیط‌های دارای انیدرید سولفور^۱ و مانند آن از محرک‌های اصلی خوردگی به شمار می‌رود [۹]. با اندازه‌گیری عامل‌های موثر در نرخ خوردگی می‌توان به مدل‌سازی خوردگی دست یافت. کامپ^۲ [۱۰] نرخ خوردگی فولاد را در قالب یک رابطه ارائه نمود. رابطه کامپ توسط آزمایش‌های میدانی آلبرشت^۳ و نعیمی [۱۱] بهبود یافت و مقادیر ثابتی با توجه به محیط قرارگیری نمونه تعیین شد. در مدل طراحی شده بر روی فولاد گالوانیزه توسط اسپنس^۴ و همکاران [۱۲] دو مکانیزم تشکیل لایه کربنات روی^۵ و جدا شدن آن، اثرات خوردگی در دراز مدت را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نمود. کاتایاما^۶ و همکاران [۱۳] با کنترل دمای محیط، دمای نمونه و رطوبت، خوردگی در فولاد کم کربن را شبیه‌سازی نمود.

ترانگ^۷ و همکاران [۱۴] در پژوهش خود، اثر تعداد و موقعیت قرارگیری سخت‌کننده طولی در جان تیرورق را بر روی مقاومت برشی را بررسی کردند. ساساکی^۸ و همکاران [۱۵] با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود، تیرورق دارای خوردگی موضعی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. برای این کار خوردگی در قسمت‌های مختلف جان و سخت‌کننده اعمال و مقدار کاهش مقاومت برشی تیرورق دارای خوردگی تعیین گردید. ناکای^۹ و همکاران [۱۶] با اعمال خوردگی حفره‌ای و موضعی بر روی تیرورق‌های با سخت‌کننده عمودی تحت اثر بار موضعی، به بررسی تاثیر آن پرداختند. در مطالعات انجام شده، به این نتیجه رسیدند که مقاومت نهایی تیرورق در این دو نوع خوردگی، تفاوت چشم‌گیری ندارد و افزایش حجم خوردگی در نمونه‌ها به کاهش مقاومت نهایی آن می‌انجامد. در زمینه بررسی مقاومت برشی، آن^{۱۰} و همکاران [۱۷] پل‌های فولادی تحت اثر خوردگی را مورد مطالعه قرار دادند. در تیرورق مورد بررسی، خوردگی مستطیلی و مثلثی در محل اتصال جان به بال پایین و اتصال جان به سخت‌کننده عمودی اعمال شد و نتایج آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیقات، کاهش ۱۶ درصدی مقاومت برشی تیرورق‌های دارای خوردگی را نشان می‌دهد. کاردوسو^{۱۱} و همکاران [۱۸] سخت‌کننده ساخته شده به روش نورد سرد توسط چسب به جان تیرورق اضافه کردند که با مقایسه با نمونه بدون سخت‌کننده عملکرد بهتری نشان داده و حالت خرابی آن، شکست ترد چسب گزارش شد. علی‌نیا و همکاران [۱۹] به بررسی مقدار بهینه سخت‌کننده در ورق‌ها پرداختند. برای این کار ابعاد، آرایش و جانمایی‌های مختلف سخت‌کننده‌های افقی و عمودی مورد مطالعه قرار گرفت.

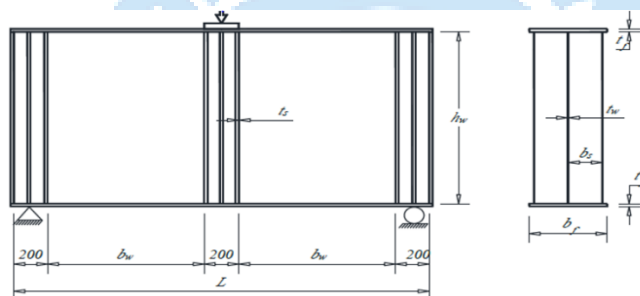
¹ Sulphur dioxide ⁹ Nakai
² Komp ¹⁰ Ann
³ Albrecht ¹¹ Cardoso
⁴ Spence
⁵ Zinc carbonate
⁶ Katayama
⁷ Troung
⁸ Sasaki

با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص می‌شود که در زمینه تقویت تیورورق‌های دارای خوردگی نیاز به پژوهش‌های بیشتری می‌باشد. از این رو، مقاله حاضر به بحث خوردگی در تیورورق‌ها و نحوه مقاوم سازی آن در اثر این پدیده مخرب اختصاص یافته است. برای این کار، با توجه به کاهش ضخامت جان تیورورق در اثر خوردگی و پایین آمدن مقاومت برشی تیورورق، تقویت این گونه تیورورق‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، از ورق‌های مستطیل شکل به نام سخت‌کننده استفاده گردیده است که به تقویت تیورورق به جان تیورورق جوش داده می‌شود. این سخت‌کننده‌ها باعث افزایش ظرفیت برشی تیورورق می‌گردد و مقاومت از دست رفته را تا حد قابل قبولی جبران می‌کند.

۲- روش تحقیق

نرم‌افزارهای رایانه‌ای در بدست آوردن نتایج تحقیقات انجام شده این موقعیت را فراهم می‌کند که در زمان کوتاه‌تر و هزینه کمتر، نمونه‌های بیشتری را مورد بررسی قرار داد. نرم‌افزار اجزای محدود انتخاب شده در این پژوهش آباکوس [۲۰] می‌باشد. از مزیت‌های اصلی این نرم‌افزار می‌توان به توانایی تحلیل غیرخطی سازه‌ها در حالت‌های مختلف اشاره کرد.

در این پژوهش نمونه آزمایشگاهی در پژوهش‌های آن و همکاران [۲۱] به عنوان تیورورق مینا برای صحت‌سنجی انتخاب شده است. شکل و ابعاد هندسی این تیورورق در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است. در شکل ۱ ابعاد به میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱: تیورورق مینا [۲۱].

جدول ۱: مشخصات هندسی تیورورق مینا [۲۱].

ts	L	hw	bw	bf	bs	tw	tf	-
۱۲	۲۶۴۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰	۹۰	۶	۲۲	اندازه (mm)

۲-۱- فرآیند تحلیل

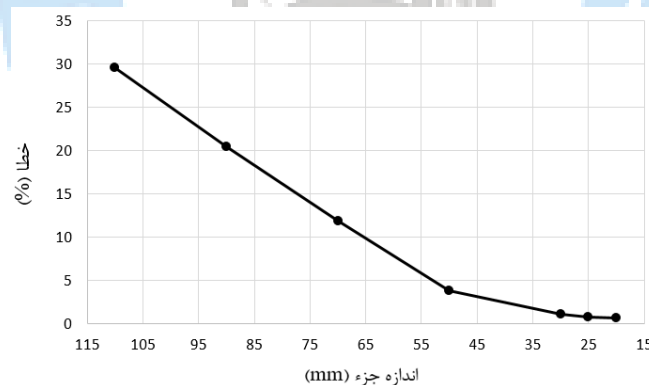
با توجه به فرض‌های ساده‌سازی و ایده‌آل بودن مدل، با اعمال بار در جان تیورورق کمانش ایجاد نمی‌شود. از این رو ابتدا تحلیل کمانشی در نمونه انجام شده و ضریبی از تغییرمکان‌های ایجاد شده به عنوان خطای ساخت اولیه به عنوان ورودی نرم‌افزار در تحلیل غیرخطی وارد می‌شود. با توجه به انتخاب جزء S4R و قابلیت ایجاد کرنش‌های بزرگ در جزء، گزینه Nlgeom در نرم‌افزار فعال می‌گردد. این قابلیت برای تحلیل غیرخطی لحاظ شده است [۲۲]. با بدست آوردن مقاومت برشی نهایی تیورورق، نتایج با نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده و ایده‌آل ترین اندازه شبکه‌بندی انتخاب می‌گردد.

۲-۲- صحت سنجی

همان طور که در ابتدای این بخش (بخش ۲) اشاره شد، مدل آزمایشگاهی هی آن [۱۹] به عنوان تیورق مبنا برای صحت سنجی مدل اجزای محدود در این پژوهش انتخاب شده است. جدول ۲ نتایج تحلیل غیرخطی تیورق را نشان می دهد. در این جدول، M# نماد شبکه بندی است که شماره آن اندازه جزء بر حسب میلی متر می باشد. $V_{u, BM}$ مقاومت نهایی تیورق مبنا است که برابر ۱۳۵۹ کیلونیوتن می باشد و $V_{u, FE}$ مقاومت نهایی تیورق مدل شده در مدل اجزای محدود است. شکل ۲ نمودار همگرایی مقاومت برشی نسبت به اندازه جزء را نشان می دهد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل، شبکه بندی با اندازه ۲۵ میلی متر خطای ناچیزی را نشان داده است. از این رو در ادامه کار ابعاد شبکه بندی ۲۵ میلی متر برای مدل سازی انتخاب شده است.

جدول ۲: نتایج تحلیل اجزای محدود با شبکه بندی متغیر.

شماره تیورق	$V_{u, FE}$ (kN)	$V_{u, BM} / V_{u, FE}$	خطا (%)
M110	۱۷۶۰/۵۵	۱/۲۹	۲۹/۵۵
M90	۱۶۳۷/۳۰	۱/۲۰	۲۰/۴۸
M70	۱۵۱۹/۳۷	۱/۱۲	۱۱/۸۰
M50	۱۴۱۰/۸۸	۱/۰۴	۳/۸۲
M30	۱۳۷۳/۳۹	۱/۰۱	۱/۰۶
M25	۱۳۶۸/۴۶	۱/۰۱	۰/۷۰
M20	۱۳۶۷/۶۱	۱/۰۱	۰/۶۳



شکل ۲: نمودار درصد خطای مقاومت برشی تیورق بر حسب ابعاد شبکه بندی.

۳- تقویت تیورق های دارای خوردگی

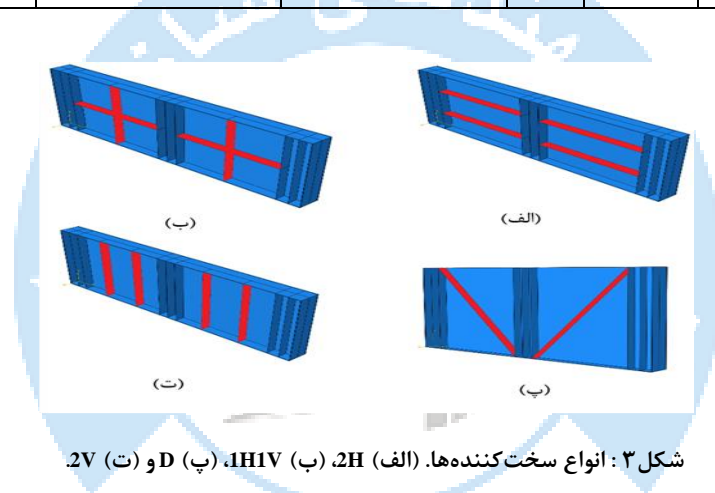
خوردگی های در نظر گرفته شده برای بررسی اثرات آن بروی تیورق از نوع یکنواخت، شیاری و موضعی می باشد. مقدار کاهش مقاومت در اثر خوردگی و مقدار جبران این کاهش با استفاده از تعبیه سخت کننده در تیورق دارای خوردگی، با استفاده از نتایج تحلیل مشخص گردیده است.

۳-۱ الگوهای سخت کننده های پیشنهادی

برای تقویت تیروورق دارای خوردگی، چهار الگوی سخت کننده در نظر گرفته شده است. ورق های سخت کننده در تمامی حالت ها دارای سطح مقطع یکسان می باشند. انجام این کار، مقایسه حالت های مختلف با یکدیگر را ممکن می سازد. در جدول ۳ مشخصات هندسی و نحوه قرارگیری ورق های سخت کننده مشخص شده است. در شکل ۳، تیروورق با سخت کننده های 1H1V، 2H، D و 2V نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصات هندسی و نحوه قرارگیری ورق های سخت کننده.

نوع الگو	ضخامت (mm)	طول (mm)	عرض (mm)	فاصله ورق ها از یکدیگر (mm)	فاصله ورق ها از بال بالا (mm)	فاصله ورق ها از مرکز تیروورق (mm)
1H1V	۱۲	۱۰۰۰	۹۰	-	۵۰۰-۰	۶۰۰-۶۰۰
2H	۱۲	۱۰۰۰	۹۰	۴۰۰	۷۰۰-۳۰۰	۶۰۰-۶۰۰
2V	۱۲	۱۰۰۰	۹۰	۴۰۰	-	۸۰۰-۴۰۰
D	۸	۱۴۱۴	۹۰	-	۵۰۰	۶۰۰



شکل ۳: انواع سخت کننده ها. (الف) 2H، (ب) 1H1V، (پ) D و (ت) 2V

۳-۲ خوردگی یکنواخت

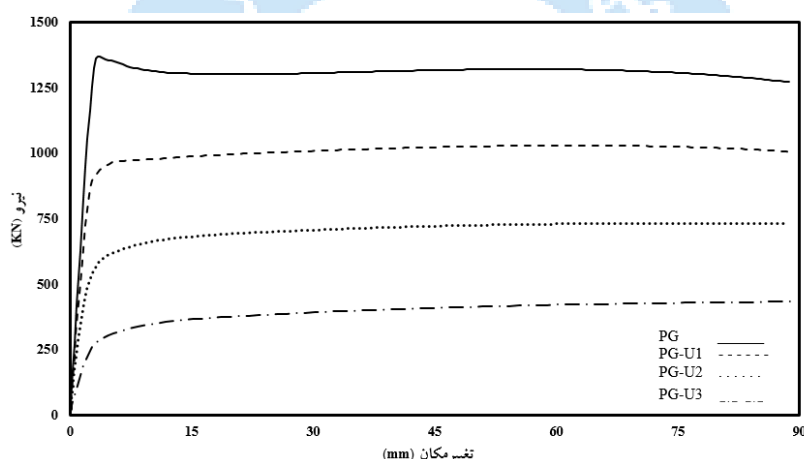
در این بخش خوردگی یکنواخت بر روی جان تیروورق اعمال و اثرات آن بر روی مقاومت برشی تیر بررسی گردیده است. اثر این نوع خوردگی با کاهش ضخامت جان، در نرم افزار اجزای محدود اعمال گردیده است. نسبت کاهش ضخامت به ضخامت اولیه ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد در نظر گرفته شده که مشخصات و نحوه نام گذاری آن در جدول ۴ به نمایش گذاشته شده است. نتایج حاصل از تحلیل تیروورق های دارای خوردگی یکنواخت در جدول ۵ و شکل ۴ نشان داده شده است. به عنوان مثال با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۵ و شکل ۴، خوردگی یکنواخت ۷۵ درصدی باعث کاهش ۶۸ درصدی مقاومت برشی تیروورق می شود.

جدول ۴: مشخصات تیرورق‌های دارای خوردگی.

نام تیورق	نسبت عمق خوردگی به ضخامت جان	ضخامت جان پس از خوردگی (mm)
PG	-	۶
PG-U1	۰/۲۵	۴/۵
PG-U2	۰/۵۰	۳
PG-U3	۰/۷۵	۱/۵

جدول ۵: نتایج تحلیل تیرورق‌های دارای خوردگی یکنواخت.

تیورق	مقاومت برشی (KN)	کاهش مقاومت برشی (%)
PG	۱۳۶۸/۴۶	-
PG-U1	۱۰۲۹/۳۶	۲۵
PG-U2	۷۳۲/۱۰	۴۷
PG-U3	۴۳۲/۷۹	۶۸



شکل ۴: نمودار نیرو-تغییر مکان برای تیورق‌های PG-U1 تا PG-U3.

۳-۳ تقویت تیورق دارای خوردگی یکنواخت

در این بخش به تقویت تیورق دارای خوردگی یکنواخت پرداخته شده است. با استفاده از الگوهای سخت‌کننده پیشنهادی مدل‌سازی اجزای محدود صورت می‌گیرد. ابتدا الگوی 1H1V سپس سخت‌کننده‌های افقی، عمودی و در ادامه سخت‌کننده به صورت قطری در جان تیورق مدل شده و نتایج ارایه می‌شود.

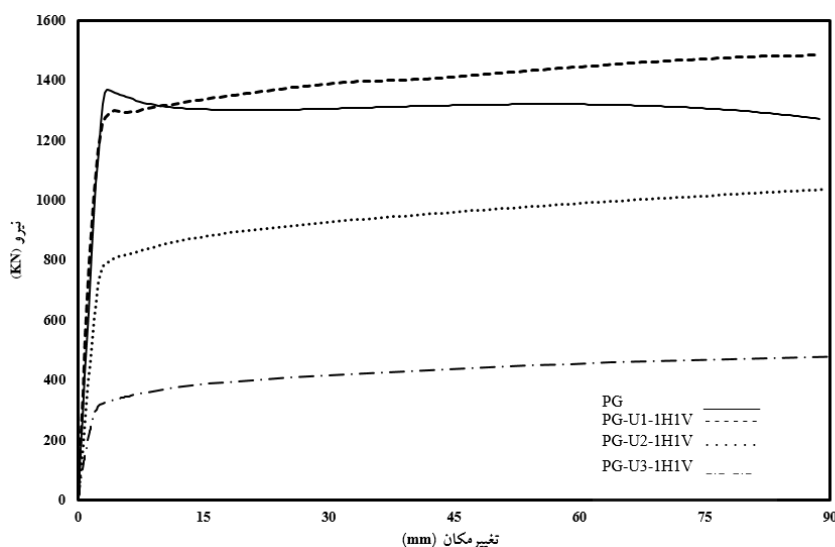
۳-۳-۱ تقویت تیورق با الگوی 1H1V

تیورق‌های تقویت شده دارای خوردگی یکنواخت به صورت PG-U1-1H1V تا PG-U3-1H1V نام‌گذاری شده که در جدول ۶ نتایج حاصل از تحلیل نشان داده شده است و در شکل ۵ نیز نمودار نیرو-تغییر مکان آن مشاهده می‌شود.

جدول ۶: نتایج تحلیل تیورق‌ها با خوردگی یکنواخت و سخت‌کننده 1H1V.

تیورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی تیورق تقویت شده به حالت بدون سخت‌کننده
PG-U1-1H1V	۱۴۸۴	۱/۴۴
PG-U2-1H1V	۱۰۳۶	۱/۴۱
PG-U3-1H1V	۵۹۳	۱/۳۷

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۵ و جدول ۶، با افزودن سخت‌کننده، مقاومت برشی تیورق به ترتیب ۴۴، ۴۱ و ۳۷ درصد نسبت به تیورق دارای خوردگی بدون سخت‌کننده افزایش می‌یابد.



شکل ۵: نمودار نیرو-تغییر مکان برای تیورق‌های PG-U1-1H1V تا PG-U3-1H1V.

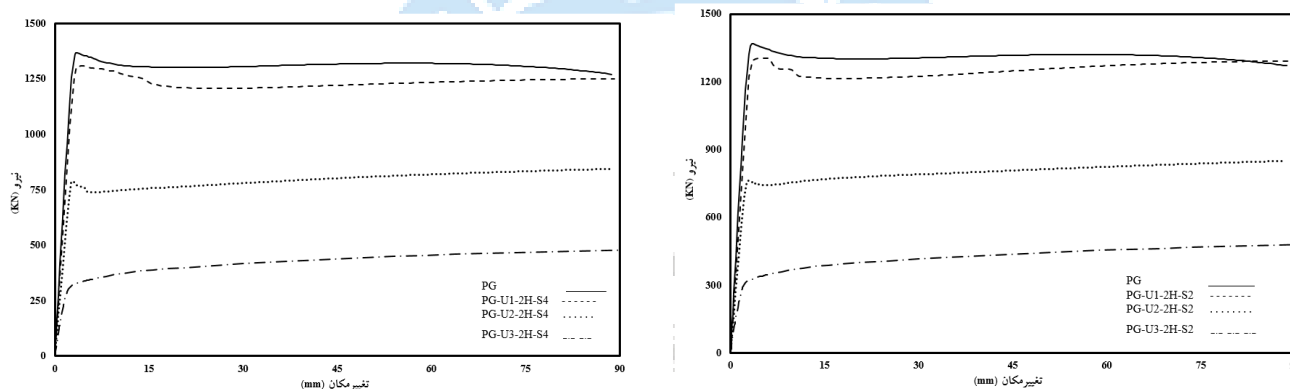
۳-۳-۲ تقویت تیورق با الگوی 2H

در این بخش سخت‌کننده‌های افقی به تیورق اضافه می‌شود. فاصله مرکز به مرکز ورق‌ها ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود. این مدل‌ها به ترتیب 2H-S2، 2H-S4 و 2H-S6 نام‌گذاری شده است. در جدول ۷ نتایج تحلیل تیورق‌های دارای خوردگی یکنواخت دارای سخت‌کننده‌های افقی نشان داده شده است. شکل ۶ نمودار نیرو-تغییر مکان تیورق‌های PG-U1-2H-S2 تا PG-U3-2H-S6 نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۷ و شکل ۶، در حالتی که ۲۵ درصد ضخامت جان به دلیل خوردگی کاهش یافته، توسط سخت‌کننده افقی جبران شده است. در فواصل ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ افزایش مقاومت به ترتیب ۲۷، ۳۱ و ۲۸ می‌باشد.

جدول ۷: نتایج تحلیل تیورق‌های PG-U1-2H-S2 تا PG-U3-2H-S6

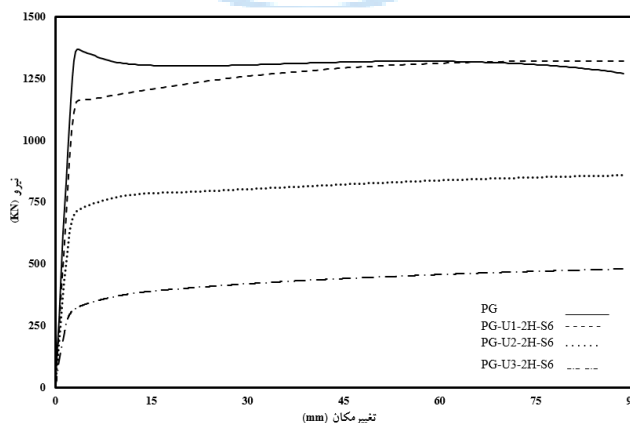
تیورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی تیورق تقویت شده به حالت بدون سخت‌کننده
PG-U1-2H-S2	۱۰۲۹	۱/۲۷
PG-U2-2H-S2	۷۳۲	۱/۱۶
PG-U3-2H-S2	۴۳۳	۱/۱۰
PG-U1-2H-S4	۱۳۴۹	۱/۳۱
PG-U2-2H-S4	۸۷۴	۱/۱۹
PG-U3-2H-S4	۴۸۱	۱/۱۱
PG-U1-2H-S6	۱۳۲۲	۱/۲۸
PG-U2-2H-S6	۸۵۸	۱/۱۷
PG-U3-2H-S6	۴۷۹	۱/۱۱

با مقایسه افزایش مقاومت برشی حاصل، می‌توان فاصله‌ی سخت‌کننده بهینه در الگوی افقی را بدست آورد. شکل ۷ نمودار مقایسه مقدار افزایش مقاومت برشی در تیورق را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، الگوی 2H-S4 عملکرد بهتری نشان داده است.



(ب)

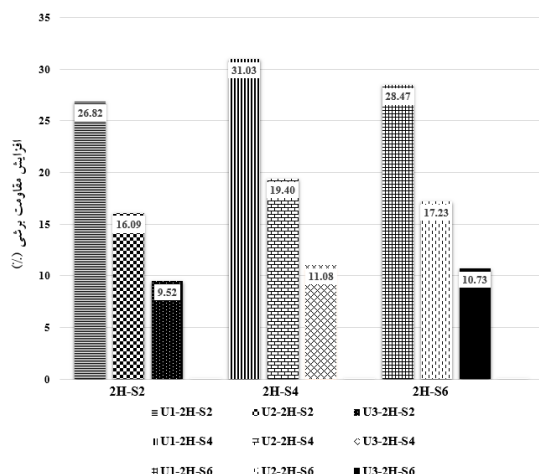
(الف)



(پ)

شکل ۶: نمودار نیرو- تغییر مکان تیورق‌های PG-U1-2H-S2 تا PG-U3-2H-S6.

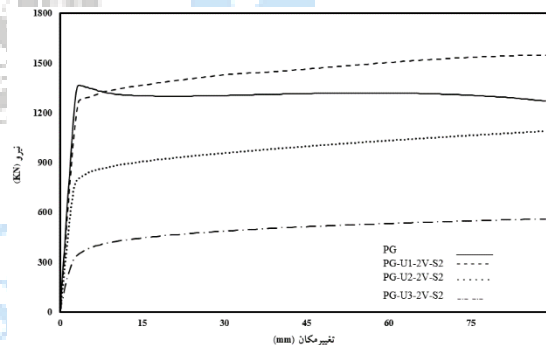
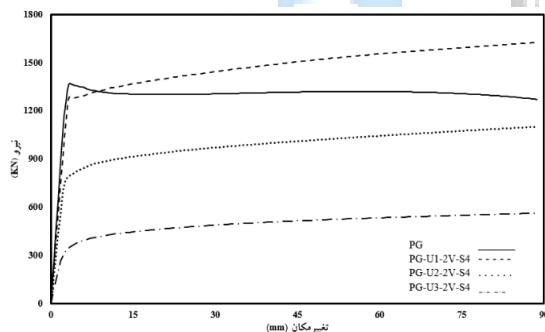
فواصل (الف) - ۲۰۰ میلی‌متر، (ب) ۴۰۰ میلی‌متر (پ) ۶۰۰ میلی‌متر.



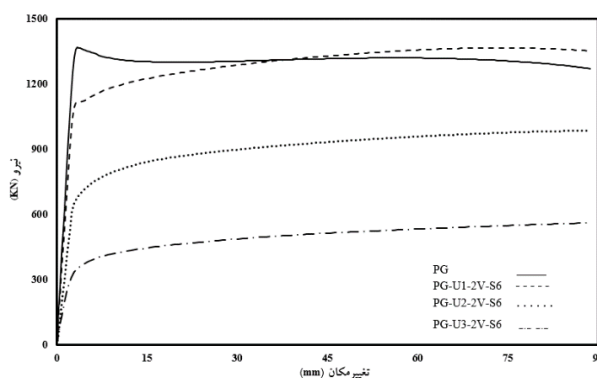
شکل ۷: مقایسه بین افزایش مقدار مقاومت برشی در سخت کننده 2H با فاصله متغیر بین ورق های سخت کننده افقی.

۳-۳-۳ تقویت تیورق با الگوی 2V

سخت کننده های عمودی به تیورق اضافه و در فواصل مرکز به مرکز ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ قرار گرفته اند. نتایج تحلیل تیورق های PG-U1-2V-S2 تا PG-U3-2V-S6 در جدول ۸ و شکل ۸ نشان داده شده است. پس از به کارگیری سخت کننده درحالتی که نصف ضخامت جان از بین رفته، افزایش مقاومت ۴۹، ۵۰ و ۳۵ مشاهده شده است.



(الف)



(ب)

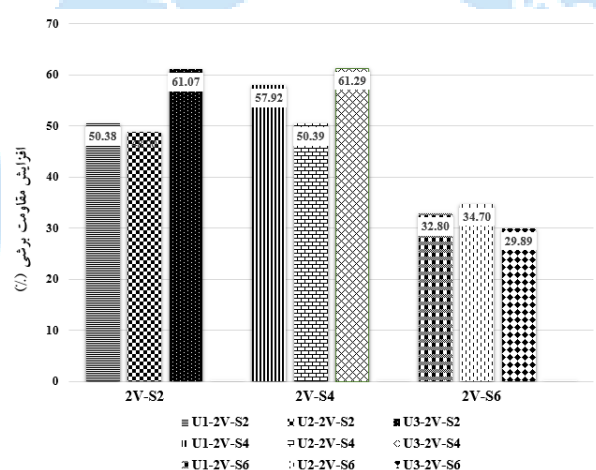
شکل ۸: نمودار نیرو- تغییر مکان تیورق های PG-U1-2V-S2 تا PG-U3-2V-S6. فواصل

(الف) - ۲۰۰ میلی متر، (ب) ۴۰۰ میلی متر (پ) ۶۰۰ میلی متر.

جدول ۸: نتایج تحلیل تیورق های PG-U1-2V-S2 تا PG-U3-2V-S6.

تیورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی تیورق تقویت شده به حالت بدون سخت کننده
PG-U1-2V-S2	۱۵۴۸	۱/۵۰
PG-U2-2V-S2	۱۰۹۰	۱/۴۹
PG-U3-2V-S2	۶۹۷	۱/۶۱
PG-U1-2V-S4	۱۶۲۵	۱/۵۸
PG-U2-2V-S4	۱۱۰۱	۱/۵۰
PG-U3-2V-S4	۶۹۸	۱/۶۱
PG-U1-2V-S6	۱۳۶۷	۱/۳۳
PG-U2-2V-S6	۹۸۶	۱/۳۵
PG-U3-2V-S6	۵۶۲	۱/۳۰

در شکل ۹ نمودار مقایسه افزایش مقاومت برشی در تیورق تقویت شده مشاهده می شود. الگوی 2V-S4 عملکرد بهتری نسبت به دیگر حالت ها نشان داده است.



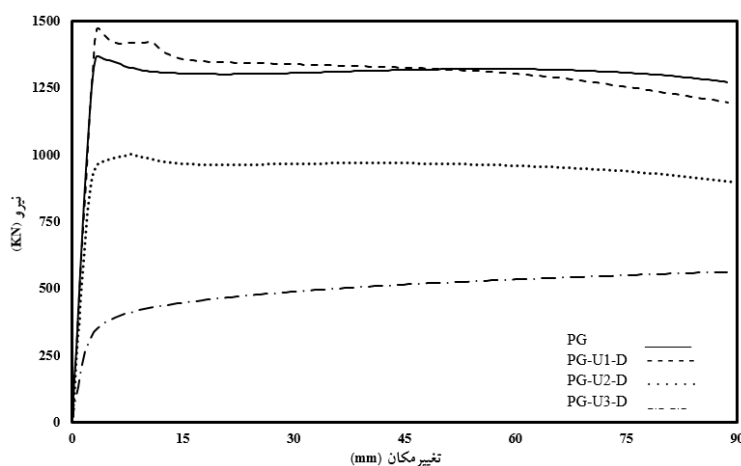
شکل ۹: مقایسه بین افزایش مقدار مقاومت برشی در سخت کننده 2V با فاصله متغیر بین ورق های سخت کننده عمودی.

۳-۳-۴ تقویت تیورق با الگوی D

این بار با به کارگیری الگوی قطری سخت کننده D، تیورق با خوردگی یکنواخت تقویت می گردد. برای این کار، تیورق های PG-U1-D تا PG-U3-D تحلیل و نتایج حاصل در جدول ۹ آورده شده است. در شکل ۱۰ نمودار نیرو-تغییر مکان تیورق های PG-U1-D تا PG-U3-D نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰ این الگوی سخت کننده قادر به جبران مقاومت برشی تیورق دارای خوردگی یکنواخت با ضخامت جان کمتر از ۵۰ درصد نسبت به مدل مبنا نمی باشد.

جدول ۹: نتایج تحلیل تیرورق‌ها با خوردگی یکنواخت و سخت‌کننده D.

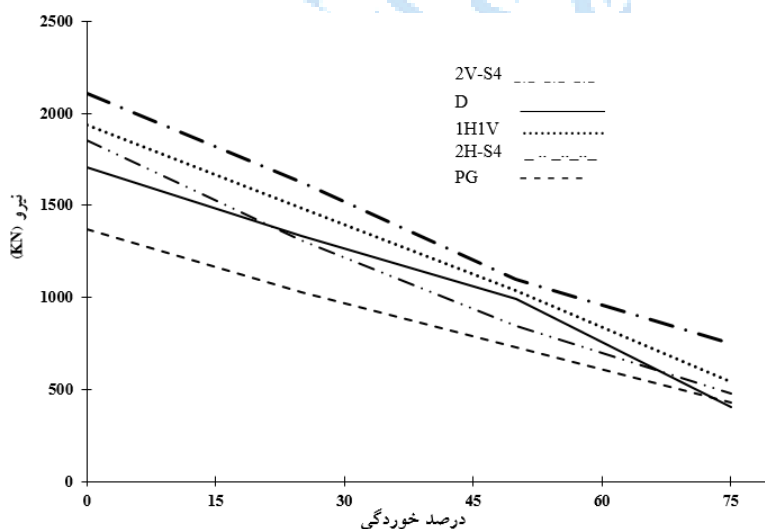
تیرورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی تیرورق تقویت شده به حالت بدون سخت‌کننده
PG-U1-D	۱۴۷۳	۱/۴۳
PG-U2-D	۱۰۰۰	۱/۳۷
PG-U3-D	۷۲۰	۱/۶۶



شکل ۱۰: نمودار نیرو-تغییر مکان برای تیرورق‌های PG-U1-D تا PG-U3-D.

۳-۳-۵ مقایسه الگوهای تقویت تیرورق

در بخش‌های گذشته الگوهای مختلف تقویت تیرورق معرفی و با اضافه شدن آن به مدل نرم‌افزاری دارای خوردگی، تحلیل و بررسی گردید. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۱، سخت‌کننده با الگوی 2V عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوهای معرفی شده داشته است.



شکل ۱۱: مقایسه تغییر مقدار مقاومت برشی با افزایش خوردگی در تمامی الگوهای سخت‌کننده.

همانطور که در نمودار نیرو-درصد خوردگی شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، الگوهای پیشنهادی قادر به جبران مقاومت در حالتی که جان تیرورق بیشتر از ۵۰ درصد از ضخامت خود را از دست دهد را ندارد. الگوی دیگری برای رفع این چالش ارائه می‌شود. با استفاده از سخت‌کننده کمکی افقی در میانه جان تیرورق در بین دو سخت‌کننده عمودی به تحلیل و بررسی نتایج پرداخته می‌شود. سخت‌کننده اضافه شده به طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۴۰۰، ۹۰ و ۲۲ میلی‌متر می‌باشد. نام اختصاری آن H می‌باشد.

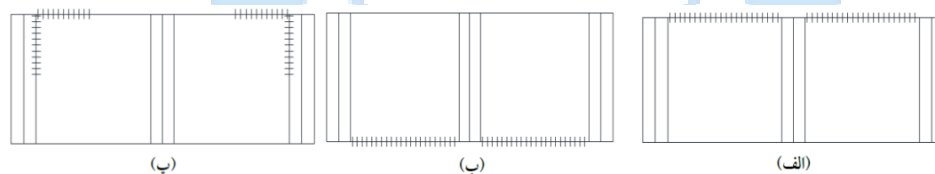
تیرورق‌های PG-U2-H و PG-U3-H تحلیل و نتایج آن در جدول ۱۰ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با اضافه کردن یک سخت‌کننده افقی، مقاومت برشی از دست رفته جبران شده و از فروپاشی تیرورق جلوگیری می‌شود.

جدول ۱۰: نتایج تحلیل تیرورق‌های تقویت شده توسط سخت‌کننده H.

تیرورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی به تیرورق مینا
PG-U2-H	۱۷۳۶	۱/۲۶
PG-U3-H	۱۳۷۲	۱/۰۰

۳-۴ خوردگی شیاری و تقویت آن

در این بخش از پژوهش به تحلیل اثر خوردگی شیاری و تقویت آن پرداخته شده است. برای این کار، ابتدا موقعیت قرار گیری شیارها در تیرورق را مشخص و سپس تحلیل می‌گردد. در انتها تقویت با الگوهای معرفی شده صورت می‌گیرد. در شکل ۱۲ موقعیت شیارها و نماد مربوط به آن مشخص شده است. نماد G# نمونه دارای خوردگی شیاری را نشان می‌دهد که در آن عدد اول موقعیت خوردگی و عدد دوم مقدار خوردگی را مشخص می‌کند. برای مقایسه این حالت‌ها با یکدیگر حجم خوردگی در این تیرورق‌ها یکسان می‌باشد. عرض شیار ۱۰ میلی‌متر و نسبت عمق شیار به ضخامت تیرورق ۰/۵۰ و ۱ در نظر گرفته شده است. در جدول ۱۱ نیز مقاومت برشی تیرورق‌های PG-G11 تا PG-G32 نشان داده شده است.



شکل ۱۲: موقعیت قرار گیری خوردگی شیاری در تیرورق. (الف) G1، (ب) G2 و (پ) G3.

جدول ۱۱: نتایج حاصل از تحلیل تیرورق دارای خوردگی شیاری با عرض ۱۰ میلی‌متر.

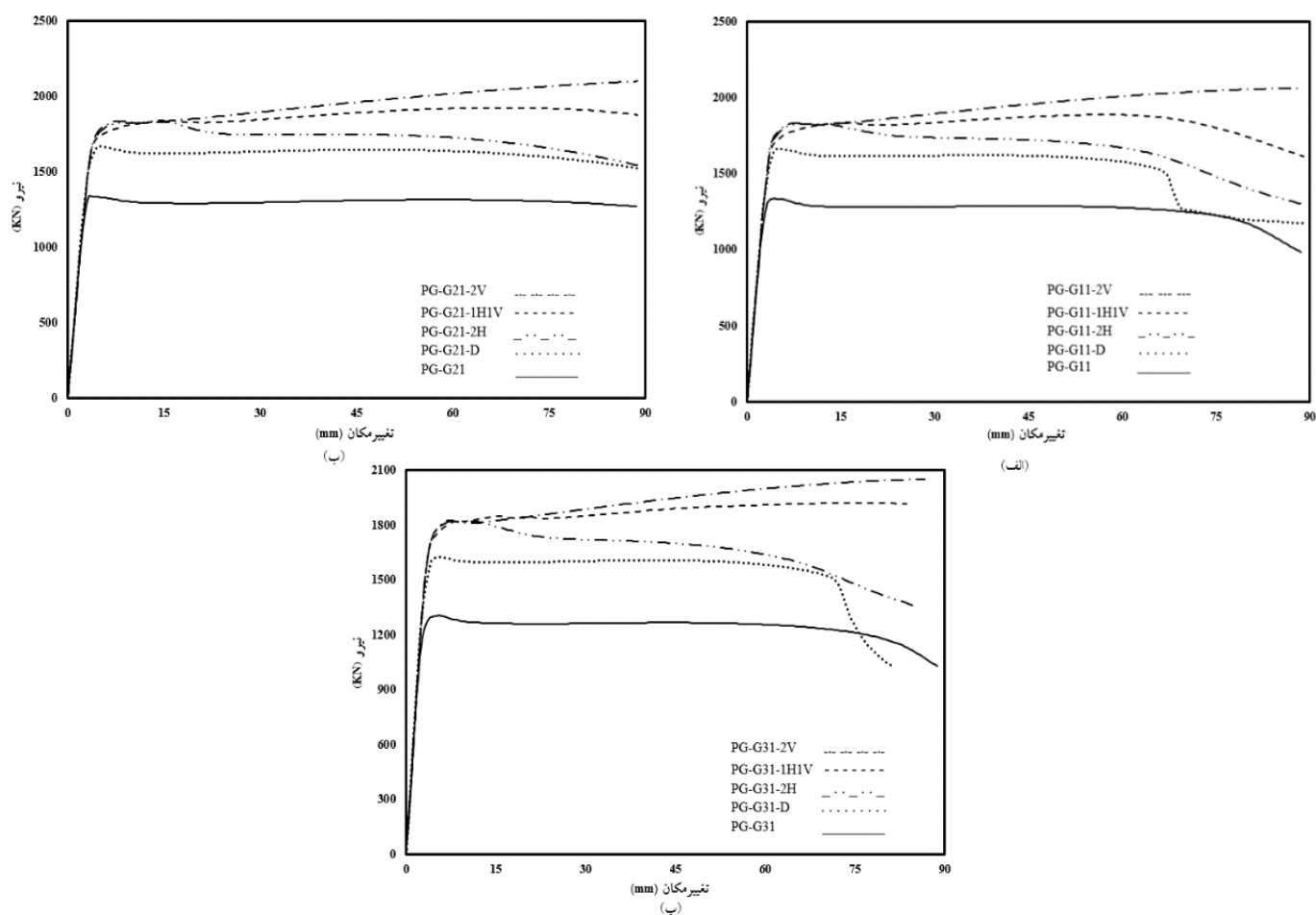
تیرورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی تحلیلی به آزمایشگاهی	کاهش مقاومت برشی (%)
PG-G11	۱۳۳۵	۰/۹۸	۲
PG-G12	۱۱۰۲	۰/۸۱	۲۰
PG-G21	۱۳۳۸	۰/۹۸	۲
PG-G22	۱۱۷۳	۰/۸۶	۱۴
PG-G31	۱۳۰۵	۰/۹۵	۵
PG-G32	۶۲۱	۰/۴۵	۵۵

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۱۱، موقعیت شیاری G3 بیشترین کاهش مقاومت برشی را در بین سه حالت پیشنهادی دارد. در تیورق PG-G34 اتصال جان و بال بالا از بین رفته است و با داشتن فقط ۰/۱ حجم خوردگی ۵۴ درصد مقاومت برشی تیورق کاهش یافته است. با استفاده از الگوهای سخت کننده معرفی شده، سعی بر تقویت و جبران مقاومت برشی از دست رفته شده است. در جدول ۱۲ نتایج تحلیل تیورق‌های PG-G11-1H1V تا PG-G32-D، با استفاده از تمام الگوهای سخت کننده نشان داده شده است. در جدول ۱۲، حالت بحرانی که اتصال بال و جان از بین رفته تنها با استفاده از سخت کننده 2V مقاومت برشی از دست رفته آن جبران می‌شود. در نتیجه با استفاده از الگوی عمودی پیشنهاد شده از فروپاشی تیورق جلوگیری خواهد شد.

جدول ۱۲: نتایج حاصل از تیورق تقویت شده دارای خوردگی شیاری G1، G2 و G3.

تیورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی به مقاومت تیورق بدون سخت کننده	افزایش مقاومت برشی نسبت به تیورق مبنا (%)
PG-G11-1H1V	۱۸۸۶	۱/۴۱	۳۸
PG-G12-1H1V	۱۶۶۶	۱/۵۱	۲۲
PG-G11-2H	۱۸۲۶	۱/۳۷	۳۴
PG-G12-2H	۱۴۷۹	۱/۳۴	۸
PG-G11-2V	۲۰۶۰	۱/۵۴	۵۱
PG-G12-2V	۱۸۳۸	۱/۶۷	۳۷
PG-G11-D	۱۶۶۴	۱/۲۵	۲۲
PG-G12-D	۱۴۳۴	۱/۳۰	۵
PG-G21-1H1V	۱۹۲۵	۱/۴۴	۴۱
PG-G22-1H1V	۱۷۴۳	۱/۵۸	۲۷
PG-G21-2H	۱۸۳۱	۱/۳۷	۳۴
PG-G22-2H	۱۵۴۶	۱/۴۰	۱۳
PG-G21-2V	۲۱۰۰	۱/۵۷	۵۴
PG-G22-2V	۱۹۳۶	۱/۷۶	۴۱
PG-G21-D	۱۶۷۱	۱/۲۵	۲۲
PG-G22-D	۱۵۱۹	۱/۳۸	۱۱
PG-G31-1H1V	۱۹۲۲	۱/۴۷	۴۱
PG-G32-1H1V	۱۱۸۰	۱/۹۰	-۱۴
PG-G31-2H	۱۸۲۱	۱/۳۹	۳۳
PG-G32-2H	۹۵۴	۱/۵۳	-۳۰
PG-G31-2V	۲۰۵۲	۱/۵۷	۹۳
PG-G32-2V	۱۳۷۶	۲/۲۱	۱
PG-G31-D	۱۶۲۵	۱/۲۴	۱۹
PG-G32-D	۹۶۸	۱/۵۶	-۲۹

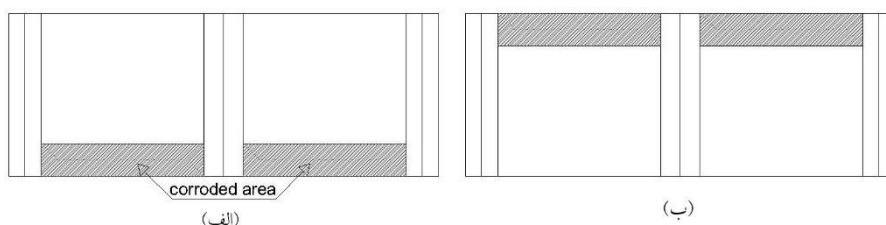
شکل ۱۳ نمودارهای نیرو-تغییر مکان تیورق تقویت شده حالت G1، G2 و G3 را نشان داده است.



شکل ۱۳: نمودار مقاومت برشی- تغییرمکان تیورق‌های دارای خوردگی شیباری. (الف) G1، (ب) G2 و (پ) G3.

۳-۵ خوردگی موضعی مستطیلی و تقویت آن

در این بخش از پژوهش، خوردگی به نحوی که حجمی از جان تیورق را در موقعیت‌های مختلف کاهش دهد معرفی می‌شود. این خوردگی در بالا و پایین جان که می‌تواند کاهش ضخامت آن با خطر تسلیم برشی مقطع رو به رو شود مدل‌سازی و تحلیل شده است. در شکل ۱۴ موقعیت خوردگی موضعی مستطیلی R1 و R2 مشاهده می‌شود. جدول ۱۳ مشخصات هندسی خوردگی موضعی را شرح داده است.



شکل ۱۴: الگوهای الگوهای خوردگی موضعی مستطیلی. (الف) R1، (ب) R2.

جدول ۱۳: مشخصات هندسی الگوهای خوردگی مستطیلی.

نام الگوی خوردگی	نسبت طول خوردگی به طول جان	نسبت ارتفاع خوردگی به ارتفاع جان
R1	۱	۰/۲۰
R2	۱	۰/۲۰

نسبت حجم خوردگی ناحیه مستطیلی به ضخامت جان ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱ در نظر گرفته شده است. در ادامه تحلیل صورت گرفته شده و نتایج آن در جدول ۱۴ آورده شده است. نام گذاری تیورق‌های دارای خوردگی مستطیلی با نماد R# انجام شده که # شامل دو عدد به ترتیب موقعیت خوردگی و مقدار خوردگی می‌باشد. جدول ۱۴ همانند بخش‌های گذشته کاهش مقاومت برشی نسبت به تیورق مینا (PG) را نشان داده است. همانطور که در جدول ۱۴ مشاهده می‌شود خوردگی در بالای جان بحرانی و کاهش ۳۶ درصدی مقاومت برشی را به همراه دارد.

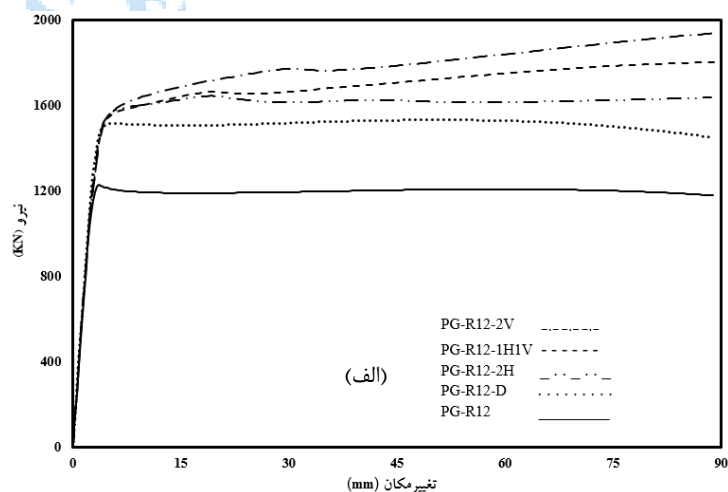
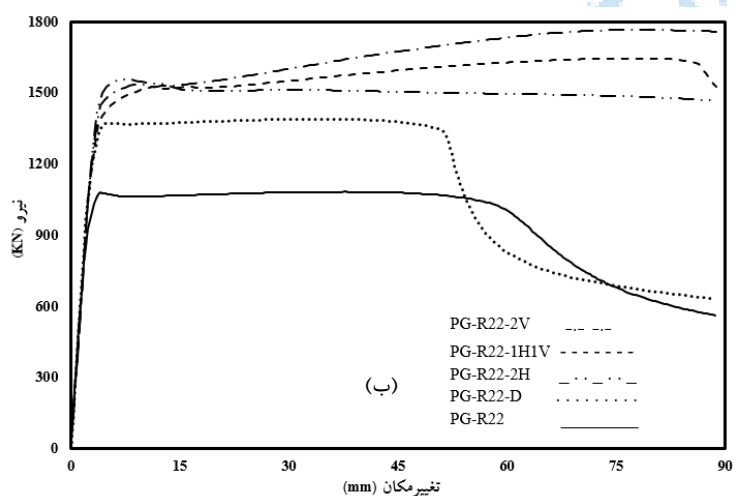
جدول ۱۴: نتایج تحلیل تیورق‌های دارای خوردگی مستطیلی R1 و R2.

تیورق	مقاومت برشی (KN)	کاهش مقاومت برشی (%)
PG	۱۳۶۸	-
PG-R11	۱۳۱۱	۴
PG-R12	۱۲۲۹	۱۰
PG-R13	۱۱۴۱	۱۷
PG-R14	۱۰۰۸	۲۶
PG-R21	۱۲۲۹	۱۰
PG-R22	۱۰۸۲	۲۱
PG-R23	۹۷۱	۲۹
PG-R24	۸۷۶	۳۶

در ادامه به تقویت تیورق‌های PG-R11 تا PG-R24 پرداخته شده است. برای انجام این کار، الگوهای سخت‌کننده پیشنهادی به تیورق اضافه شده و تحلیل نرم‌افزاری اجزای محدود نتایج حاصل می‌شود. نتایج تحلیل تیورق‌های R1 و R2 تقویت شده در جدول ۱۵ نمایش داده شده است. شکل ۱۵ نمودار نیرو-تغییر مکان دو حالت R1 و R2 که توسط الگوهای سخت‌کننده تقویت شده را نشان داده است. با تحلیل نتایج نشان داده در جدول، سخت‌کننده عمودی 2V قادر به جبران مقاومت از دست رفته بوده و دیگر الگوها در حالت بحرانی R14 و R24 نمی‌تواند جواب مطلوبی دهد.

جدول ۱۵: نتایج حاصل از تحلیل تیرورق‌های تقویت شده دارای خوردگی مستطیلی R1 و R2.

تیرورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی به مقاومت تیرورق بدون سخت‌کننده	افزایش مقاومت برشی نسبت به تیرورق مینا (%)
PG-R11-1H1V	۱۸۸۵	۱/۴۴	۳۸
PG-R14-1H1V	۱۳۶۵	۱/۳۴	- ۲
PG-R11-2H	۱۷۶۴	۱/۳۵	۲۹
PG-R14-2H	۱۳۸۹	۱/۳۸	۱
PG-R11-2V	۲۰۶۳	۱/۵۷	۵۱
PG-R14-2V	۱۴۳۵	۱/۴۲	۵
PG-R11-D	۱۶۱۵	۱/۲۳	۱۸
PG-R14-D	۱۲۹۵	۱/۲۹	- ۵
PG-R21-1H1V	۱۷۹۰	۱/۳۷	۳۱
PG-R24-1H1V	۱۱۶۸	۱/۱۶	- ۱۵
PG-R21-2H	۱۷۴۳	۱/۴۲	۲۷
PG-R24-2H	۱۲۲۲	۱/۳۹	- ۱۱
PG-R21-2V	۱۹۱۷	۱/۴۶	۴۰
PG-R24-2V	۱۳۸۶	۱/۳۸	۱
PG-R21-D	۱۵۵۷	۱/۱۹	۱۴



شکل ۱۵: نمودار نیرو تغییر مکان تیرورق‌های تقویت شده دارای خوردگی. (الف) - R1 و (ب) - R2.

۳-۶ بررسی عوامل مختلف سخت کننده در افزایش مقاومت

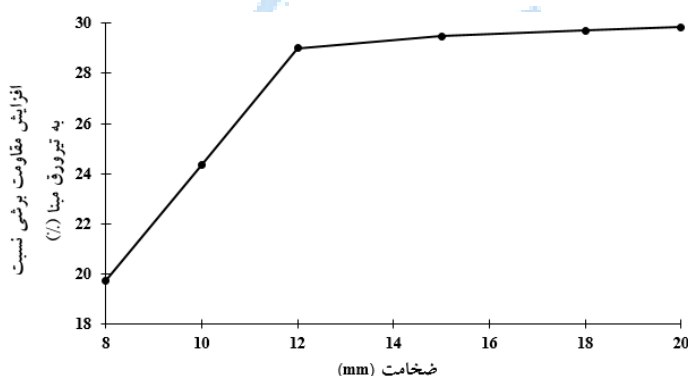
در این پژوهش به اثر فاصله سخت کننده پرداخته شد و نتایج آن بررسی گردید. حال سعی به بررسی اثر ضخامت، عرض و شکل سخت کننده شده است. جهت افزایش تمرکز و مقایسه عوامل نام برده، از خوردگی مستطیلی R2 در حالتی که نصف ضخامت جان در اثر خوردگی از بین رفته استفاده شده است. در ادامه الگوی سخت کننده 2V به آن اضافه شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۳-۶-۱ اثر ضخامت سخت کننده

تیرورق دارای خوردگی مستطیلی R2 که با ورق‌های به عرض ثابت ۹۰ میلی‌متر و ضخامت ۸، ۱۰، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ میلی‌متر تقویت شده مدل‌سازی و سپس تحلیل می‌شود. در جدول ۱۶ نتایج تحلیل تیرورق‌های تقویت شده توسط سخت کننده عمودی با ضخامت متغیر نشان داده شده است. در این جدول حرف t# نشان ضخامت و عدد بعد آن بعد به میلی‌متر نام گذاری شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که سخت کننده با ضخامت ۱۲ میلی‌متر عملکرد مناسب‌تری نسبت به سخت کننده با ضخامت‌های کمتر نشان دارد و با افزایش ضخامت بیشتر از آن، تنها ۱ درصد افزایش مقاومت حاصل می‌شود که البته اقتصادی نیست. در شکل ۱۶ نمودار افزایش مقاومت همراه با تغییر ضخامت سخت کننده رسم شده است.

جدول ۱۶: نتایج حاصل از تحلیل تیرورق‌های تقویت شده توسط سخت کننده عمودی با ضخامت متغیر.

نام تیرورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی به مقاومت تیرورق مبنا
PG-R22	۱۰۸۲	۰/۷۹
PG-R22-2V-t8	۱۶۳۸	۱/۲۰
PG-R22-2V-t10	۱۷۰۱	۱/۲۴
PG-R22-2V	۱۷۶۵	۱/۲۹
PG-R22-2V-t15	۱۷۷۲	۱/۲۹
PG-R22-2V-t18	۱۷۷۵	۱/۳۰
PG-R22-2V-20	۱۷۷۷	۱/۳۰



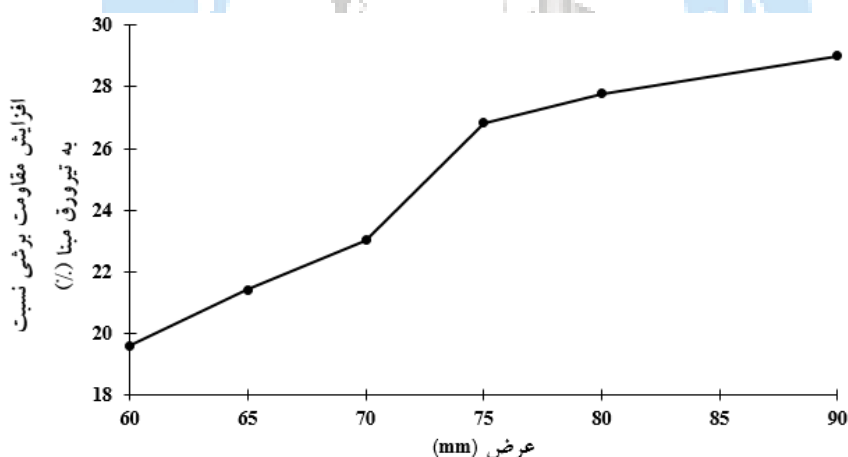
شکل ۱۶: نمودار مقدار افزایش مقاومت تیرورق دارای خوردگی با سخت کننده عمودی دارای ضخامت متغیر.

۳-۶-۲ اثر عرض سخت کننده

عامل دیگری که مورد بررسی قرار گرفته شده، عرض ورق تقویت می باشد. در نتایج پیشین بدست آمده عرض ورق ۹۰ میلی متر مدل شده است. طبق فرض استفاده شده در بخش گذشته، سخت کننده با ضخامت ثابت ۱۲ میلی متر و عرض های ۶۰، ۶۵، ۷۰، ۷۵ و ۸۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. در نام گذاری این تیورورق ها نماد $b\#$ استفاده شده که عدد آن مقدار عرض به میلی متر می باشد. نتایج تحلیل تیورورق های PG-R22-2V-b60 تا PG-R22-2V-b80 در جدول ۱۷ و شکل ۱۷ آورده شده است. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل، سخت کننده با عرض ۷۵ میلی متر عملکرد مطلوبی نسبت به سخت کننده های با عرض کمتر از آن دارد و با افزایش مقدار عرض سخت کننده به ۹۰ میلی متر تنها افزایش ۲ درصدی در مقاومت به وجود می آید که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی باشد.

جدول ۱۷: نتایج حاصل از تحلیل تیورورق های تقویت شده توسط سخت کننده عمودی با عرض متغیر.

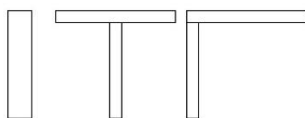
نام تیورورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی به مقاومت تیورورق مینا
PG-R22	۱۰۸۲	۰/۷۹
PG-R22-2V-b60	۱۶۳۶	۱/۲۰
PG-R22-2V-b65	۱۶۶۱	۱/۲۱
PG-R22-2V-b70	۱۶۸۲	۱/۲۳
PG-R22-2V-b75	۱۷۳۵	۱/۲۷
PG-R22-2V-b80	۱۷۴۸	۱/۲۸
PG-R22-2V	۱۷۶۵	۱/۲۹



شکل ۱۷: نمودار مقدار افزایش مقاومت تیورورق دارای خوردگی با سخت کننده عمودی دارای عرض متغیر.

۳-۶-۳ اثر شکل سخت کننده

اثر شکل مقطع سخت کننده در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. تا به اینجای پژوهش متداول ترین شکل مقطع، مستطیل در مدل سازی به کار رفته است. حال شکل سخت کننده به مقاطع L و T تغییر کرده و نتایج آن بررسی می شود. جهت مقایسه این مقاطع با یکدیگر، سطح مقطع سخت کننده ها یکسان در نظر گرفته شده است. سخت کننده با مقاطع مختلف در شکل ۱۸ نشان داده شده است. نام گذاری این مقاطع با حرف S و پس از آن حروف R، L و T قرار گرفته که به ترتیب نماینده شکل مستطیلی، L و T می باشد.

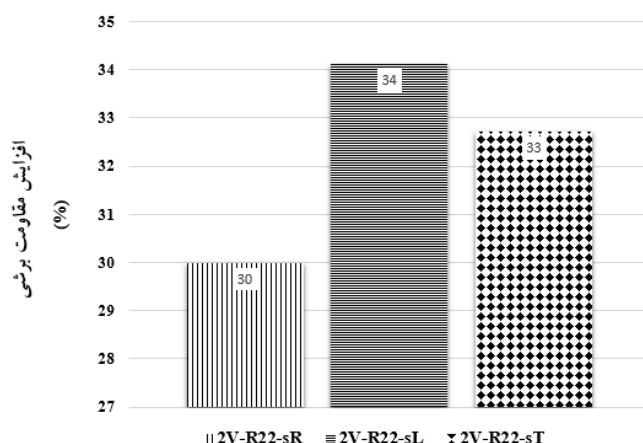


شکل ۱۸: سطح مقطع استفاده شده در مدل سازی سخت کننده.

نتایج حاصل از تحلیل تیورق های PG-R22-2V-sR، PG-R22-2V-sL و PG-R22-2V-sT در جدول ۱۸ و شکل ۱۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج، تیورق های تقویت شده با سطح مقطع مستطیلی کمترین مقدار افزایش مقاومت را از خود نشان می دهد. سخت کننده با سطح مقطع L شکل عملکرد بهتری در بین دیگر سخت کننده ها با افزایش ۳۴ درصدی مقاومت تیورق را به همراه دارد.

جدول ۱۸: نتایج تحلیل تیورق تقویت شده توسط سخت کننده های مستطیلی، L و T شکل.

نام تیورق	مقاومت برشی (KN)	نسبت مقاومت برشی به مقاومت تیورق مینا
PG-R22	۱۰۸۲	۰/۷۹
PG-R22-2V-sR	۱۷۷۷	۱/۳۰
PG-R22-2V-sL	۱۸۳۵	۱/۳۴
PG-R22-2V-sT	۱۸۱۶	۱/۳۳



شکل ۱۹: مقدار افزایش مقاومت برشی تیورق تقویت شده با استفاده از سخت کننده های R، L و T شکل.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش صورت گرفته به موضوع کاهش مقاومت برشی در تیورق های دارای خوردگی و تقویت آن پرداخته شده است. یک روش رایج در تقویت تیورق ها که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است، اضافه کردن سخت کننده های افقی و عمودی به جان تیورق می باشد. سخت کننده های عمودی، افقی و ترکیبی از آن ها به ترتیب 2V، 2H و H نام گذاری شد. متغیرهای دیگری به روند تحلیل اضافه گردید، عرض، شکل سطح مقطع و ضخامت سخت کننده در تحلیل ها موثر واقع شدند. در راستای پیشبرد این پژوهش می توان از روش های تقویت، نظیر پوشش های مواد مرکبی همانند FRP و مشتقات آن استفاده نمود. مهم ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱. در تیورق‌هایی که ضخامت جان آن در اثر خوردگی یکنواخت کاهش یافته، مقاومت برشی ممکن است تا ۶۸ درصد از دست برود. در این حالت استفاده از سخت‌کننده‌های عمودی 2V می‌تواند مقاومت از دست رفته به میزان ۶۱ درصد جبران کند. البته برای جبران کامل مقاومت از دست رفته زمانی که ۵۰ درصد ضخامت کاهش یافته، از سخت‌کننده افقی کمکی در بین ورق‌ها استفاده شده که به اختصار سخت‌کننده H نام‌گذاری شده است.
۲. خوردگی شیاری در صورت از بین رفتن اتصال بالای جان و بال، باعث کاهش ۵۵ درصدی مقاومت برشی می‌شود. نتایج حاصل از تقویت این تیورق‌ها نشان می‌دهد که سخت‌کننده عمودی 2V بهترین عملکرد را در بین سایر سخت‌کننده‌ها دارد و مقاومت برشی تیورق دارای خوردگی را به مقدار اولیه می‌رساند.
۳. خوردگی موضعی مستطیلی در قسمت بالای جان حالت بحرانی داشته و باعث کاهش ۳۶ درصدی مقاومت برشی می‌شود. برای تقویت این تیورق‌ها تمام الگوها جواب مثبتی داشته، تنها در حالتی که تمام ضخامت جان در ناحیه خوردگی از بین رود الگوی 2V قادر به جبران مقاومت می‌باشد.
۴. با بررسی سخت‌کننده‌های افقی و عمودی این مشاهده شد که تاثیر فاصله‌ی سخت‌کننده‌ها از یکدیگر قابل توجه است و از این رو فاصله‌ی مناسب سخت‌کننده‌ها از یکدیگر تعیین گردید. همچنین اثر ضخامت، عرض و شکل مقطع سخت‌کننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که اثر ضخامت و عرض سخت‌کننده در افزایش مقاومت برشی تقریباً یکسان است. سخت‌کننده با سطح مقطع T و L شکل نیز عملکرد بهتری نسبت به سخت‌کننده مستطیلی دارد.

مراجع

- [1] Fontana, M. G. (2005). *Corrosion Engineering*. New Delhi: Tata MacGraw-Hill Book Company.
- [2] Melchers, R. E. (2005). The effect of corrosion on the structural reliability of steel offshore structures. *Corrosion Science*, Volume 47: 2391-2410.
- [3] Tahooni, S. (1996). *Design of Steel Structures*. 4th edition. Tehran: Dehkhoda Publishing Company.
- [4] Basler, K. (1961). "Strength of Plate Girders in Shear." *Journal of the Structural Division*, Volume 87 (7), 151-180.
- [5] Rockey, K. C. and Skaloud. M. (1972). "The ultimate load behaviour of plated girders loaded in shear." *The Structural Engineer*, Volume 50 (1), 1721-1743.
- [6] Maquoi, R. and M. Skaloud. (2000). "Stability of plates and plated structures: General Report." *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 55, 45-68.
- [7] Real, E. (2007). "Shear response of stainless steel plate girders." *Engineering Structures*, Volume 29 (7), 1626-1640.
- [8] Johnson, R. P., Cafolla, J. and Bernard, C. (1997). "Corrugated Webs in Plate Girders for Bridges." *Structures and Buildings*, Volume 122 (2), 157-164.
- [9] Lee, S. G. and S. G. Kang. (1997). "The effects of sulphur dioxide on atmospheric corrosion of galvanized steel." *Journal of Materials Science Letters*, Volume 16 (11), 902-905.
- [10] Komp, M. (1987). "Atmospheric corrosion rating of weathering steel calculations and significance." *Material Performance*, Volume 26, 42-44.
- [11] Albrecht, P. and Naemi, A. H. (1984). *Performance of weathering steel in bridges*. [online] USA: Transportation Research Board, 164. Available at: <https://trid.trb.org/view/211731>.
- [12] Spence, J. W., Haynie, F. H., Lipfert, F. W. and Cramer, S. D. (1992). "Atmospheric Corrosion Model for Galvanized Steel Structures." *Corrosion Science*, Volume 48 (12), 1009-1019.
- [13] Katayama, H., Noda, K., Masuda, H., Nagasawa, M., Itagaki, M. and Watanabe, K. (2005). "Corrosion simulation of carbon steels in atmospheric environment." *Corrosion Science*, Volume 47 (10), 2599-2606.
- [14] Truong, V., Papazafeiropoulos, G., Pham, V., Vu, Q. (2019). "Effect of multiple longitudinal stiffeners on ultimate strength of steel plate girders." *Structures*, Volume 22, 366-382.
- [15] Khurram, N., Sasaki, E., Katsuchi, H. (2013). "Finite element investigation of shear capacity of locally corroded end panel of steel plate girder." *Int J Steel Struct*, Volume 13, 623-633.
- [16] Nakai, T., Matsushita, H. and Yamamoto, N. (2004). "Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (2nd Report) _ lateral - distortional buckling and local face buckling." *Marine Structures*, Volume 17, 612-641.
- [17] Ahn, J. H., Kainuma, S. and Kim, I. T. (2013). "Shear failure behaviors of a web panel with local corrosion depending on web boundary conditions." *Thin-Walled Structures*, Volume 73, 302-317.

- [18] de Sousa Cardoso, H., Martins, J. P. and Silva, L. (2021). "Shear Strengthening of Slender Steel Beams Using Cold-formed Stiffeners and Adhesives." *Ce/Papers*, Volume 4, 2225-2231.
- [19] Alinia, M. M. and Sarraf Shirazi, R. (2009). "On the design of stiffeners in steel plate shear walls." *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 65, 2069-2077.
- [20] Hibbitt, D., Karlsson, B. and Sorensen, P. (2002). *Abaqus/CAE user's manual*. USA: Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.
- [21] Ahn, J. H. Cheung, J. H., Lee, W. H., Oh, H. and Kim, I. T. (2015). "Shear buckling experiments of web panel with pitting and through - thickness corrosion damage. " *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 115, 290-302.
- [22] Lee, R. (2019). *Abaqus for Engineers: A Practical Tutorial Book*. USA: Independent, 112-113.

