

## Bearing Capacity of Bolted Connections in Steel Corrugated Sheets

SeyedehSama Seyedsharifi<sup>1</sup>, Alireza Moazezi Mehretehran<sup>2\*</sup>

1- MSc Graduate, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Corrugated cold-formed steel sheets are widely utilized in the construction of shear walls, culverts, and storage tanks. Due to the geometric differences between these sheets and flat sheets, their bolted connections are expected to exhibit distinct mechanical behavior. However, there is a notable gap in the understanding and prediction of the bearing capacity of these connections, as current design standards do not provide specific equations for this purpose. This study aims to address this gap by assessing the accuracy of existing design equations in standards such as AISI S100 and EC3 for predicting the bearing capacity of bolted connections in corrugated sheets. Furthermore, a new equation is proposed to improve the prediction of bearing capacity. Following the guidelines outlined in AISI S905, 54 numerical models were developed using the Finite Element Method (FEM) implemented in ABAQUS software. The study focuses on key parameters, including bolt diameter, sheet thickness, and steel type. This study proposes a new bearing coefficient for cases where  $d/t < 10$ , which, unlike the constant value used in EC3 and AISI S100, decreases linearly with the increase in  $d/t$  ratio within this range. Additionally, a new parameter,  $l$ , is introduced to replace the bolt diameter, representing the curve length of the corrugated sheet in contact with the bolt shank. The results indicate that despite the relatively accurate predictions of the design code equations for application to corrugated sheet specimens, the proposed equation, by considering the linear variations of the  $d/t$  parameter, not only improves the accuracy of the results but also achieves better alignment with the numerical outcomes.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 09 February 2025

Revise Date: 20 April 2025

Accept Date: 21 May 2025

### Keywords:

Bolted Connections

Corrugated Steel Sheets

Cold-Formed Structures

Finite Element Modelling

Design Codes

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.503146.3644

\*Corresponding author: Alireza Moazezi Mehretehran

Email address: a.moazezi@sharif.edu

## ظرفیت لهیدگی اتصالات پیچی در ورق‌های موجدار فولادی

سیده سما سیدشریفی<sup>۱</sup>، علیرضا معززی مهرطهران<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

ورق‌های سردنورد موجدار در ساخت دیوارهای برشی، آبروها و ساخت مخازن کاربرد دارند. با توجه به تفاوت هندسی این ورق‌ها نسبت به انواع ورق صاف، انتظار می‌رود رفتار متفاوتی در این اتصالات مشاهده شود. شکاف قابل توجهی در درک و پیش‌بینی ظرفیت لهیدگی اتصالات پیچ و مهره‌ای آنها مطرح است و آیین‌نامه‌های موجود نیز در این خصوص روابط طراحی ارائه نکرده‌اند. این پژوهش با تمرکز بر این شکاف، دقت معادلات آیین‌نامه‌های طراحی موجود، *AISI S100* و *EC3*، را در پیش‌بینی ظرفیت لهیدگی این اتصالات ارزیابی می‌کند و معادله‌ی جدیدی نیز برای محاسبه‌ی ظرفیت لهیدگی این اتصالات پیشنهاد می‌دهد. بدین منظور، با پیروی از دستورالعمل‌های *AISI S905*، تعداد ۵۴ مدل عددی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس توسعه داده شده و بر عوامل کلیدی مانند قطر پیچ، ضخامت ورق و نوع فولاد تمرکز شده است. منطبق بر نتایج، این مطالعه ضریب لهیدگی جدیدی را برای شرایطی که نسبت قطر پیچ به ضخامت ورق ( $d/t$ ) کمتر از ۱۰ باشد، پیشنهاد می‌دهد که برخلاف مقدار ثابت استفاده‌شده در آیین‌نامه‌های طراحی *AISI S100* و *EC3*، به‌طور خطی با افزایش نسبت  $d/t$  در این بازه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، قطر پیچ با پارامتر جدید  $A$  جایگزین شده است که طول انحنا‌ی ورق موجدار در تماس با بدنه‌ی پیچ را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که علیرغم پیش‌بینی نسبتاً مناسب روابط آیین‌نامه جهت کاربرد در نمونه‌های ورق موجدار، معادله پیشنهادی بواسطه‌ی در نظر گرفتن تغییرات خطی پارامتر  $d/t$  ضمن بهبود نسبی دقت نتایج، تطابق بهتری با نتایج عددی می‌یابد.

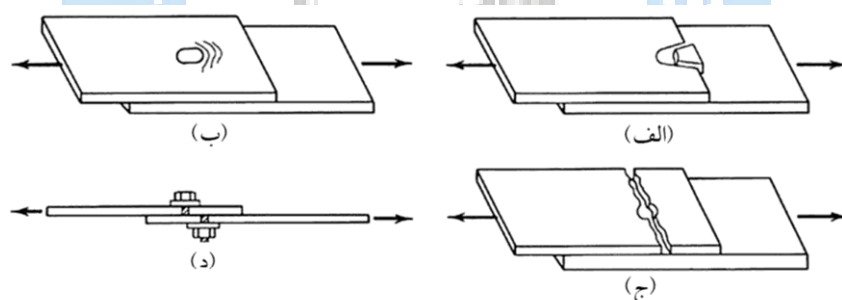
کلمات کلیدی: اتصالات پیچی، ورق موجدار فولادی، سازه‌های سردنورد، مدل‌سازی المان محدود، آیین‌نامه‌های طراحی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.503146.3644	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.503146.3644	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۱۱/۲۱
علیرضا معززی مهرطهران a.moazezi@sharif.edu					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

ورق‌های فولادی موجدار که از قدیمی‌ترین محصولات فولادی سردنورد هستند، به دلیل وزن سبک، مقاومت بالا، و سرعت در نصب، در ساخت سازه‌های جدار نازک به طور گسترده استفاده می‌شوند [۱]. این ورق‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با افزایش سختی و ممان دوم اینرسی، در سازه‌هایی مانند سیلوها، تونل‌ها و ناودان‌ها کاربرد داشته باشند [۲]. اتصالات این ورق‌ها معمولاً به صورت پیچ و مهره‌ای طراحی می‌شوند تا علاوه بر داشتن استحکام و سختی کافی، نصب آسانی نیز داشته باشند [۳]. در سازه‌های سردنورد، اتصالات پوششی پیچ و مهره‌ای به دلیل سادگی و سرعت نصب، روش استاندارد محسوب می‌شوند [۴]. علی‌رغم مزایای متعدد، سازه‌های ورق موجدار در نقاط اتصال خود آسیب‌پذیر هستند و اتصالات آنها نقشی حیاتی در حفظ یکپارچگی سازه ایفا می‌کنند [۵]. این اتصالات اغلب با استفاده از پیچ‌های پرمقاومت طراحی می‌شوند که پنل‌های موجدار را به هم متصل می‌کنند. با این حال، عواملی همچون نصب نادرست، خستگی مواد، خوردگی، و تنش‌های بیش از حد می‌توانند منجر به خرابی‌هایی از جمله شکست موضعی یا حتی فروپاشی سازه شوند [۵]. در سازه‌های گرم‌نورد اتصالات پیچی به دو صورت اتکایی یا اصطکاکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی اتصالات پیچی در سازه‌های سردنورد، به علت نازک بودن ورق‌ها، بصورت اتکایی اجرا می‌شوند [۶].

از سال ۱۹۵۰، اتصالات پیچی متعددی متشکل از ورق‌های نازک و پیچ‌های A307 و پیچ‌های پر مقاومت A325 در دانشگاه کرنل<sup>۱</sup> و سایر موسسات، آزمایش شده است. هدف از این پروژه‌های تحقیقاتی، بررسی عملکرد سازه‌ای اتصالات پیچ و مهره‌ای و ارائه اطلاعات لازم برای توسعه روش‌های طراحی قابل اعتماد بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که چهار نوع خرابی اصلی شامل شکست برشی ورق، لهیدگی یا جمع‌شدگی مصالح در جلوی پیچ، گسیختگی خالص مقطع ورق و برش پیچ بطور رایج در اتصالات پیچی فولادی سردنورد رخ می‌دهد. این چهار نوع خرابی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در بسیاری از موارد، یک اتصال در معرض ترکیبی از انواع مختلف حالت‌های خرابی است. به عنوان مثال، گسیختگی ورق اغلب به دلیل چرخش بیش از حد پیچ و گود افتادگی در مصالح ورق ایجاد می‌شود [۳].



شکل ۱- چهار نوع خرابی رایج در اتصالات پیچی؛ (الف) پارگی برشی، (ب) لهیدگی یا تجمع مصالح در جلوی پیچ، (ج) گسیختگی مقطع خالص ورق و (د) برش پیچ [۳]

راجرز و هنکاک [۴] مطالعه‌ای برای تعیین حالت خرابی دقیق اتصالات پیچی سازه‌های سردنورد روی ورق‌های صاف از نوع G550 و G300 انجام دادند. نتایج آنها نشان داد خرابی اتصالات پیچ و مهره‌ای که از فولادهای نرم ساخته شده بودند، حالتی از خرابی است که نویسندگان این مقاله آن را به عنوان «پارگی موضعی» تعریف کرده‌اند. این حالت خرابی از حالت‌های خرابی دیگر متمایز شده است چراکه پارگی ورق به دلیل تنش لهیدگی در سوراخ پیچ و نه به دلیل خرابی مقطع خالص آن است. بر اساس نتایج ارائه شده، آنها استفاده از روابط موجود در آیین‌نامه‌ها را برای پارگی موضعی ورق‌ها توصیه نمی‌کنند و لزوم توسعه روابط جدید را تأکید می‌کنند. یو و همکاران [۷] یک یادداشت فنی از مطالعه استحکام لهیدگی اتصالات پیچی سردنورد با سوراخ‌های بزرگ و بدون واشر روی ورق‌های صاف ارائه کردند. پارامترهای مورد بررسی آنها شامل ضخامت ورق، نوع اتصال، تعداد پیچ‌ها و قطر پیچ انتخاب شد. بر اساس نتایج بدست آمده، آنها یک روش طراحی جدید برای مقاومت لهیدگی این نوع اتصالات پیچی پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی آنها از معادله لهیدگی مشابه معادله AISI

<sup>۱</sup> Cornell University

S100 [۸] استفاده می‌کند، اما ضریب لهیدگی و ضریب اصلاح جدیدی برای محاسبه کاهش استحکام اتخاذ می‌نماید. یو و پانیانونگ [۶] رفتار و استحکام اتصالات پیچی دارای فاصله را روی نمونه ورق‌های صاف بررسی کردند. پارامترهای متغیر در مطالعه‌ی آنها شامل ضخامت عضو، مشخصات مصالح و قطر پیچ بود. در تمام نمونه‌های آزمایش شده، اتصالات بصورت تک پیچ و خرابایی در نظر گرفته شدند که حاوی یک عضو وتر و یک عضو جان با ضخامت یکسان بودند. آنها بر اساس نتایج خود روش جدیدی برای محاسبه مقاومت لهیدگی نوع اتصال مورد نظر ارائه کردند. روش طراحی جدید از همان معادله اصلی AISI S100 [۸] با ضریب لهیدگی و ضریب اصلاح جدید استفاده می‌کرد. ته و اوز [۹] دقت معادلات ارائه شده در آیین‌نامه‌ها برای سازه‌های فولادی سرد نورد در تعیین ظرفیت نهایی اتصالات پیچی با یک صفحه‌ی برشی بدون واشر در ورق‌های فولادی تخت را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها اولین مطالعه سیستماتیک در مورد ظرفیت لهیدگی-چرخش<sup>۲</sup> اتصالات پیچی را ارائه دادند، که به دلیل پانچ شدن<sup>۳</sup> ورق‌های متصل شده رخ می‌دهد. این حالت خرابی تنها برای اتصالات پیچی با یک صفحه‌ی برشی تک‌ردیفی بدون واشر در ورق‌های فولادی سرد نورد مشاهده شد، که اغلب در کاربردهای مهاربندی قاب‌های فولادی سبک سرد نورد استفاده می‌شوند. آنها در نهایت معادله‌ی جدیدی را برای تعیین ظرفیت لهیدگی-چرخشی این اتصالات ارائه دادند که بر خلاف معادلات متداول پیش‌بینی ظرفیت لهیدگی، اثر عرض ورق را لحاظ می‌کرد. توپریس و موز [۱۰] پدیده خم‌شدگی<sup>۴</sup> در اتصالات پیچی را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. هدف آنها درک رفتار مکانیکی اتصالات و ایجاد قوانین طراحی ساده‌ای بود که کاهش مقاومت لهیدگی را لحاظ کند. نتایج آنها نشان داد که مقاومت لهیدگی در صورت خم‌شدگی ورق به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و همچنین خم‌شدگی زمانی مؤثر است که لاغری فولاد از حد معینی بیشتر شود. هوینه و همکاران [۱۱] به بررسی رفتار تجربی و توسعه مدل المان محدود برای اتصالات پیچی در ورق‌های فولادی صاف تحت برش پرداختند. مدل‌های عددی آنها قابلیت تحلیل حالت‌های حدی مختلف اتصالات پیچی برای ضخامت‌های مختلف فولاد زمانیکه ورق نازک روی ورق ضخیم قرار می‌گرفت را دارا بود؛ ولی مدل‌های عددی جهت پیش‌بینی پاسخ پیچ‌های دریل‌شده از ورق‌های ضخیم تا نازک، نیاز به بهبود داشتند. گوان و همکاران [۱۲] رفتار سازه‌ای اتصالات با پیچ‌های خودکار<sup>۵</sup> را به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها صحت‌سنجی مدل عددی خود را با استفاده از نتایج آزمایشات انجام شده توسط هوینه و همکاران [۱۱] انجام دادند. نتایج نشان داد در مطالعه‌ی اتصالات پوششی که در آن ورق ضخیم‌تر در تماس با پیچ خودکار بود، لهیدگی ورق پایین و چرخش پیچ عامل خرابی بودند. آنها همچنین یک مطالعه‌ی پارامتری برای بررسی اثر ضخامت ورق و قطر پیچ در مقاومت اتصال پوششی با پیچ‌های خودکار انجام دادند. طبق نتایج بدست آمده در تمامی گروه‌های مورد بررسی، صرفنظر از نوع خرابی، مقدار بار حداکثر نمودار نیرو-جابجایی با افزایش قطر پیچ افزایش یافت.

در حوزه‌ی مطالعات روی ورق‌های فولادی موجدار، طیف وسیعی از مطالعات بر روی پروفیل‌های دوزنقه‌ای متمرکز بوده‌اند [۱۳]-[۱۸]. در حالی که این مقاله به بررسی رفتار ورق‌های سینوسی می‌پردازد. در زمینه‌ی ورق‌های فولادی موجدار سینوسی برخی از مطالعات به بررسی رفتار خستگی و بارگذاری چرخه‌ای این صفحات پرداخته‌اند و بر دوام و عملکرد آنها تحت تنش‌های تکراری تمرکز داشته‌اند [۱۹]-[۲۱]. دسته‌ای دیگر از پژوهش‌ها رفتار کمانشی دیوارهای برشی موجدار را مورد مطالعه قرار داده‌اند و پایداری آنها تحت بارهای فشاری و جانبی را بررسی کرده‌اند [۲۲]، [۲۳]. پاره‌ای دیگر از مطالعات به بررسی رفتار مکانیکی اتصالات پیچی در ورق‌های موجدار می‌پردازند که در قرابت بیشتر با پژوهش حاضر قرار می‌گیرند و ذیلاً مرور می‌شوند. کیم و لی [۱] مقاومت درز ورق‌های موجدار عمیق (DCSP<sup>۶</sup>) را با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد زمانیکه مد خرابی از نوع لهیدگی ورق است، مقاومت درز به عنوان تابع خطی از ضخامت ورق بدست می‌آید و زمانیکه مد خرابی از نوع برش پیچ باشد، مقاومت درز با نسبت مستقیم تعداد پیچ‌ها در واحد طول تغییر می‌کند. تنگ و همکاران [۲۴] عملکرد مکانیکی اتصالات پیچی صفحات فولادی موجدار را بررسی کردند. برای این منظور، آنها روی هشت گروه از نمونه‌ها با پارامترهای متغیر شامل ضخامت ورق و تعداد پیچ‌ها، مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری نهایی نمونه‌ها با افزایش ضخامت صفحه روند افزایشی دارد. همچنین، هنگامی که ارتفاع موج از صفر به ۱۲/۸ میلی‌متر افزایش می‌یابد، مقادیر جابجایی نهایی و ظرفیت باربری نهایی کاهش می‌یابند. کین و همکاران [۲۵] مقاومت درزهای طولی

<sup>2</sup> Tilt-bearing

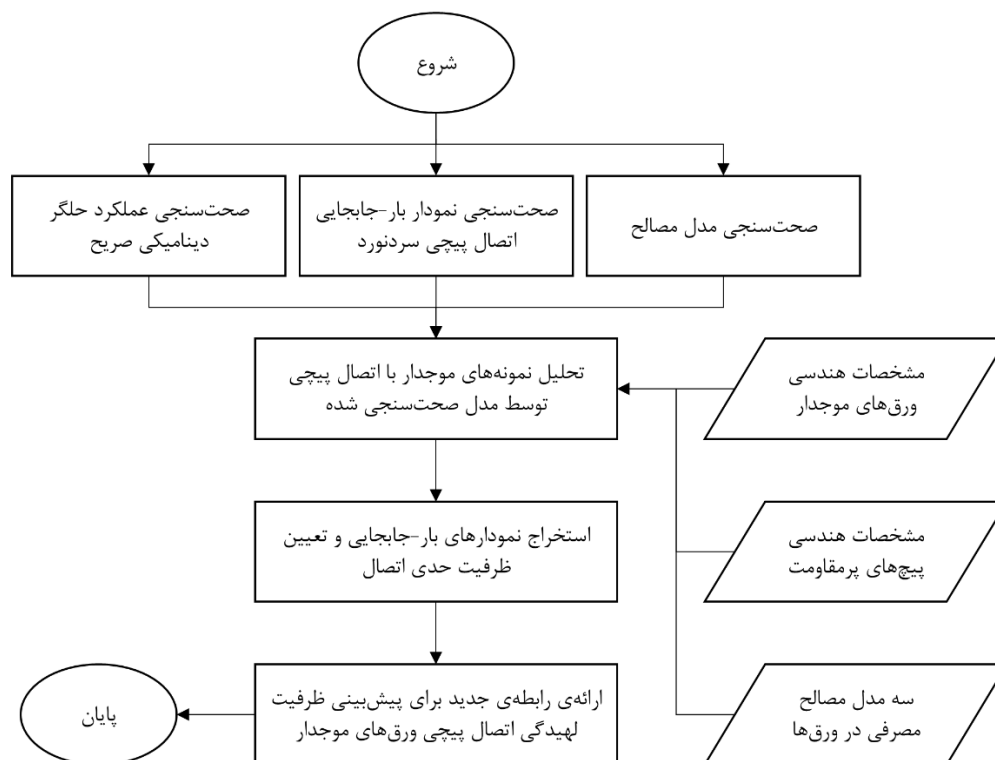
<sup>3</sup> Punching

<sup>4</sup> Curling

<sup>5</sup> Self-tapping screws

<sup>6</sup> Deep Corrugated Steel Plate

ورق‌های موجدار عمیق با اتصالات پیچ و مهره‌ای را به روش آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. هدف برنامه آزمایشی آنها بررسی استحکام نهایی درز نمونه‌ها با عرض پانل‌های مختلف، از ۳۰ اینچ تا ۴۵ اینچ، و ضخامت‌های مختلف مطابق با استاندارد ASTM A796 [۲۶] بود. آنها بر اساس نتایج بدست آمده و تفاوت‌ها در حالات شکست و استحکام نهایی درز، لزوم بکارگیری نمونه‌های بزرگ مقیاس را تأکید کردند. نتایج آزمایش‌های نمونه‌های بزرگ مقیاس نشان داد که استحکام درز نهایی نمونه‌ها از مقادیر مشخص شده در ASTM A796 برای ضخامت صفحه متناظر بیشتر است. پیچ‌وگین و همکاران [۲۷] به بررسی پایداری اتصالات چندپیچه در سیلوهای فولادی استوانه‌ای پرداختند. نتایج آنها نشان داد در حالی که در اتصالات همگن، پایداری عمدتاً به مقاومت پیچ‌ها و ماهیت تصادفی بار بستگی دارد، در اتصالات نیمه‌همگن باید ترتیب خرابی پیچ‌ها نیز در نظر گرفته شود، چرا که تأثیر قابل توجهی بر پایداری کلی اتصال دارد. ژانگ و سو [۲۸] عملکرد اتصالات طولی در سازه‌های فولادی موجدار با پیچ‌های پرمقاومت را بررسی کردند. در این مطالعه، به منظور بررسی اثر عواملی مانند استحکام صفحات فولادی موجدار و مقاومت و تعداد پیچ‌ها، آزمایش فشاری محوری و شبیه‌سازی با روش المان محدود انجام شد. بر اساس نتایج، آن‌ها معادلاتی برای محاسبه ظرفیت باربری اتصالات پیچی پرمقاومت تحت فشار، در صفحات فولادی موجدار ارائه کردند که پیش‌بینی دقیق حالت شکست و استحکام اتصالات را ممکن می‌ساخت. ما و همکاران [۲۹] رفتار مکانیکی اتصال‌های فلنجی در ورق‌های فولادی موجدار را مورد بررسی قرار داده و کمانش موضعی ورق فلنج را به‌عنوان حالت اصلی گسیختگی شناسایی نمودند. آن‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مطالعه‌ی عددی پارامتریک، معادله‌ای برای ممان تسلیم بر اساس مکانیزم خطوط تسلیم ارائه دادند.



شکل ۲- فلوچارت روند کلی مطالعه

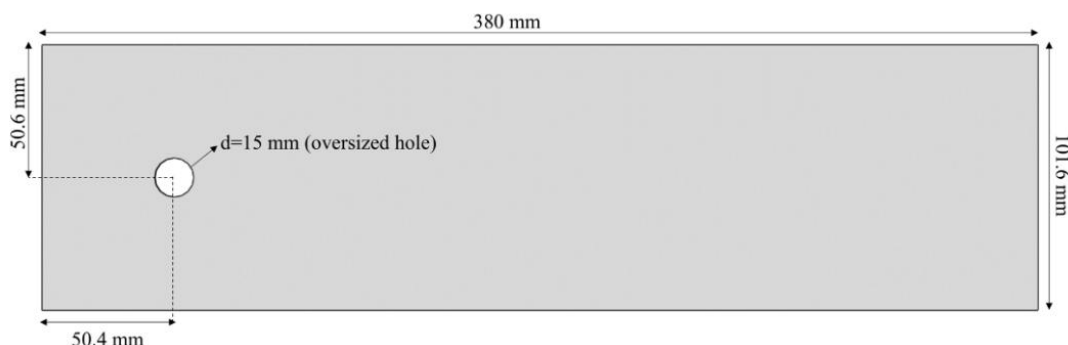
در زمینه مطالعات مربوط به فولاد سرد نورد، یک شکاف قابل توجه در ارتباط با اتصالات پیچی صفحات موجدار سینوسی وجود دارد. مطابق با مطالعات پیشین ارائه شده، روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های طراحی برای سازه‌های سردنورد، دقت کافی را در پیش‌بینی رفتار اتصالات این سازه‌ها ندارند. این در حالی است که آیین‌نامه‌ی مشخصی برای طرح اتصالات در ورق‌های موجدار، که نوعی از سازه‌های سردنورد هستند، اساساً موجود نیست. از این رو، در این مطالعه جهت بررسی ظرفیت لهدیگی ورق‌های موجدار با اتصال پیچ و مهره‌ای از

مدلسازی عددی در در نرم افزار آباکوس<sup>۷</sup> [۳۰] بهره گرفته شده است. شکل ۲ روند کلی این مطالعه را در قالب فلوجارت نشان می دهد. در گام نخست، مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی پیشین [۷] در رابطه با اتصالات پیچی در ورق های سرد نورد اعتبارسنجی شده تا از دقت کافی آن در شبیه سازی رفتار لهیدگی اطمینان حاصل شود. جزئیات این فرآیند در بخش ۲ ارائه شده اند. مدل های عددی بر اساس نمونه هایی مطابق با دستورالعمل AISI S905 [۳۱] با تمرکز بر پارامترهای مؤثر بر عملکرد اتصال، شامل قطر پیچ، مقاومت نهایی فولاد و ضخامت ورق توسعه داده شده اند. جزئیات مدل سازی و تعاریف پارامترها در بخش ۳ ارائه شده است. نتایج تحلیل ها و امکان به کارگیری روابط ارائه شده برای مقاومت لهیدگی اتصالات در ورق های صاف در آیین نامه های طراحی نظیر EC3 [۳۲] و AISI S100 [۸]، در نمونه اتصالات ورق موج دار در بخش ۴ ارائه شده است. همچنین بر اساس نتایج، رابطه ای اصلاحی در این خصوص پیشنهاد شده است. در بخش ۵، نکات و نتایج مهم حاصل از این پژوهش به صورت خلاصه ارائه شده است.

## ۲- صحت سنجی مدل عددی

جهت اطمینان از عملکرد مناسب تحلیل صریح با در نظرگیری ویژگی های خرابی مصالح، اعتبارسنجی بر اساس داده های تجربی ارائه شده در گزارش آزمایشگاهی یو و شیرا [۷] انجام شد. نتایج تجربی یک حالت شکست غیر معمول را ارائه کرده اند که بطور معمول در آیین نامه ها ارائه نشده است. بدین جهت فرصتی مناسب برای بررسی دقت مدل در پیش بینی منحنی های بار-جابجایی و حالت های شکست ویژه، فراهم شده است. منطبق بر گزارش مرجع، نمونه ی OH-43O-43O-A307-1/2-1-SS [۷] برای صحت سنجی انتخاب شده است. جزئیات هندسی ورق ها با ضخامت ۱ میلی متر و پیچ M12 در شکل ۳ آورده شده است. پیکربندی آزمایش و مدل عددی در شکل ۴ نمایش داده شده است. با استفاده از مدلسازی تست کشش کوپان با طول گیج ۵۰ میلی متر، جزئیات رفتار مصالح مطابق آنچه در گزارش [۷] ارائه شده است، در نرم افزار تعریف شد. نمودار تنش- کرنش مهندسی فولاد مورد استفاده در نمونه ها در شکل ۵ ارائه شده است.

در خلال مدلسازی، روند سعی و خطا برای تعیین شرایط تماس<sup>۸</sup> مناسب در مدل صریح انجام شد. در راستای مماسی از اصطحاک صرف نظر شده و در راستای قائم قید تماس سخت<sup>۹</sup> برای تعریف مشخصات تماس استفاده شد. در این شبیه سازی ها، مطابق شکل ۶ یکی از صفحات به همراه ورق لقمه<sup>۱۰</sup> در انتها ثابت شد و صفحه دیگر تحت بارگذاری جابجایی- کنترل قرار گرفت تا خرابی در نمونه ها رخ دهد. از قید بستن<sup>۱۱</sup> برای تعریف اتصال بین صفحات اصلی و ورق های لقمه استفاده شده است. همچنین از مش با اندازه ی ۱ میلی متر اطراف سوراخ و دو المان در راستای ضخامت از نوع مکعبی هشت گره ای<sup>۱۲</sup> برای مش بندی استفاده شده است.



شکل ۳- جزئیات هندسی ورق های مورد بررسی در صحت سنجی

<sup>7</sup> ABAQUS

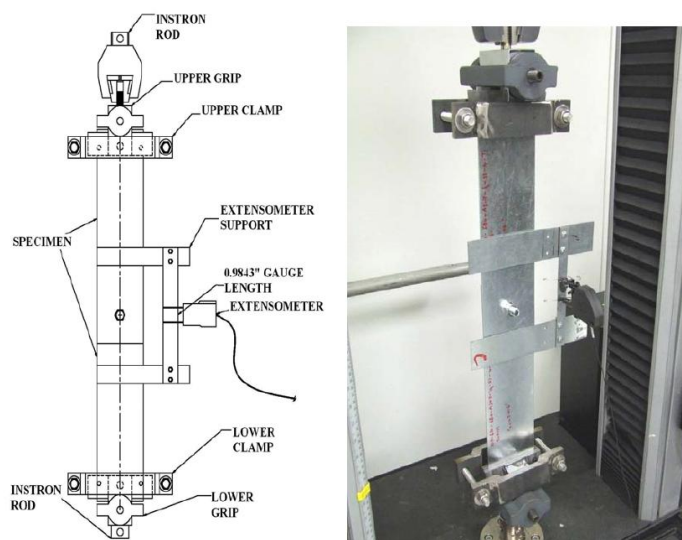
<sup>8</sup> Contact Properties

<sup>9</sup> Hard Contact

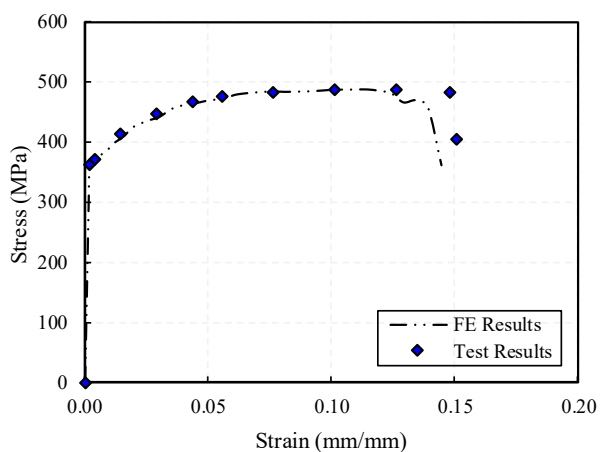
<sup>10</sup> Surface Plate

<sup>11</sup> Tie

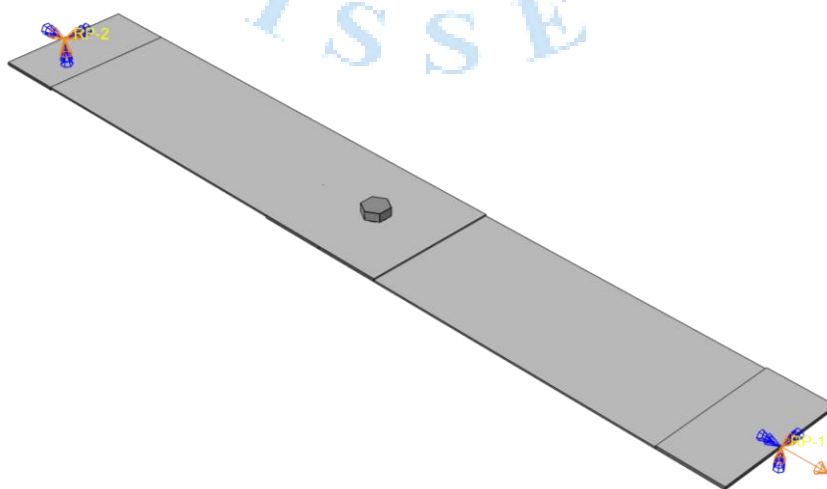
<sup>12</sup> C3D8R



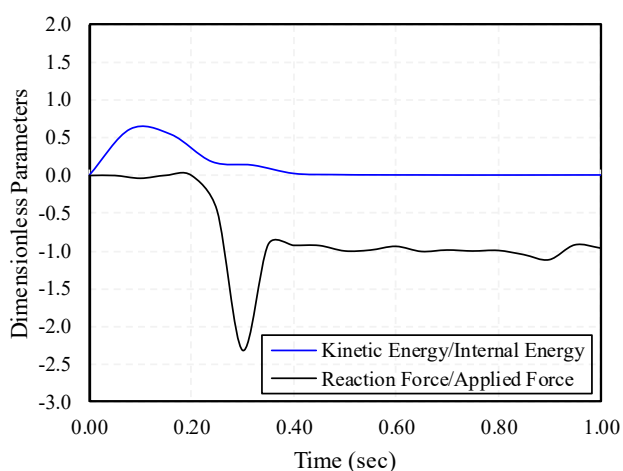
شکل ۴- پیکربندی آزمایش کشش اتصال تک پیچ سردنورد [۷]



شکل ۵- مقایسه‌ی نتایج تست کوپان عددی و گزارش آزمایشگاهی [۷] جهت تعیین مشخصات مصالح مورد نیاز برای صحت‌سنجی عددی.

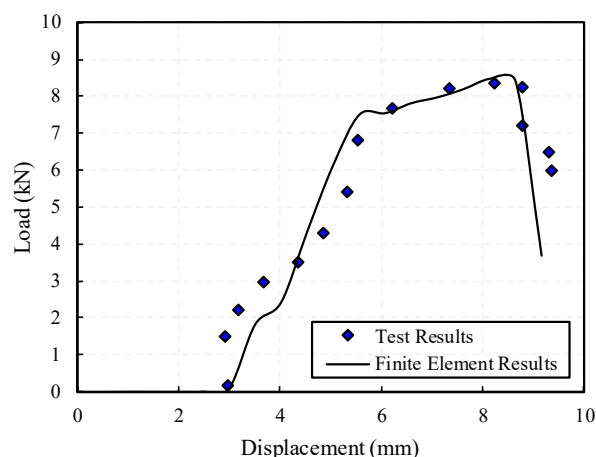


شکل ۶- شرایط مرزی مدل عددی صحت‌سنجی



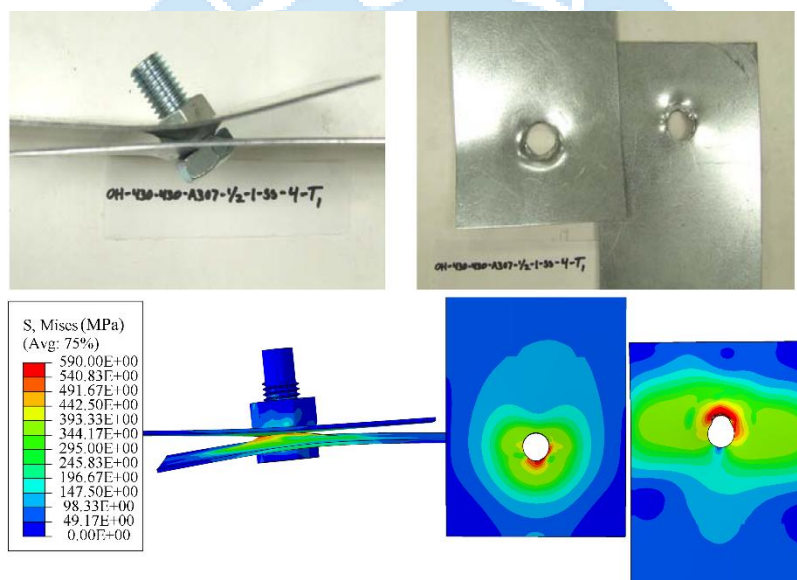
شکل ۷- پارامترهای مورد نیاز جهت تعیین صحت عملکرد تحلیل دینامیکی

صریح



شکل ۸- مقایسه‌ی پاسخ بار-جابجایی اتصال مطابق نتایج تجربی [۷] و

مدل عددی



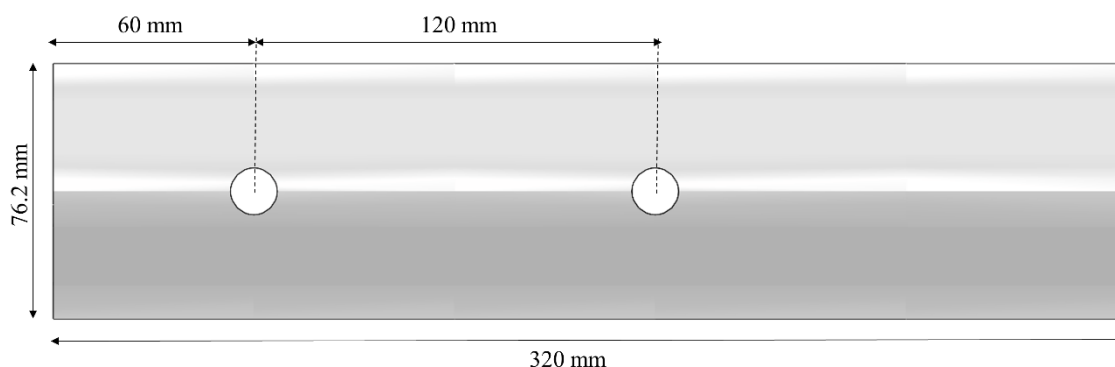
شکل ۹- مد خرابی ورق‌ها و ناحیه‌ی اتصال در گزارشات تجربی [۷] و نتایج عددی

به منظور اطمینان از صحت نتایج حلگر دینامیکی صریح در شبیه‌سازی یک مسئله شبه‌استاتیک، از دو روش اصلی بررسی (الف) نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی و (ب) بررسی تعادل نیرویی استفاده می‌شود [۱۲]. مطابق شکل ۷، نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی در طول زمان بارگذاری کنترل و اطمینان حاصل شد که این میزان کمتر از ۱۰ درصد باقی بماند. این معیار تضمین می‌کند که اثرات دینامیکی حلگر صریح به‌طور قابل توجهی بر نتایج شبیه‌سازی شبه‌استاتیک تأثیر نمی‌گذارد. همچنین تعادل بین نیروی اعمال شده و نیروی واکنش متناظر به‌طور پیوسته بررسی شد. مورد اخیر تأیید می‌کند که توزیع بار و نیروهای واکنش مدل سازگار هستند.

منحنی بار-جابجایی به‌دست آمده از مدلسازی عددی در شکل ۸ نمایش داده شده است. مطابق نتایج، بار حداکثر پیش‌بینی شده توسط مدل عددی با نتایج تجربی اختلاف ۱/۲ درصدی دارد که در محدوده مورد قبول برای دقت مدل قرار می‌گیرد. علاوه بر این، حالت‌های شکست مشاهده شده در مدل عددی با یافته‌های تجربی ارائه شده تطابق خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، ورق دچار خمیدگی و پیچ‌ها دچار چرخش می‌شوند که به‌طور مناسب توسط مدل عددی پیش‌بینی شده است.

## ۳- مدلسازی عددی

مدل‌های شبیه‌سازی شده شامل یک اتصال پوششی ساخته شده از صفحات فولادی موجدار هستند. این صفحات دارای عمق موج ۲۵/۴ میلیمتر و گام موج ۷۶/۲ میلیمتر بوده و با استفاده از دو پیچ به هم متصل شده‌اند. طول هر یک از صفحات برابر ۳۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است و چیدمان پیچ‌ها طبق دستورالعمل AISI S905 [۳۱]، تعیین و جزئیات آن در شکل ۱۰ ارائه شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی بر ظرفیت لهدگی، ۵۴ مدل عددی توسعه داده شد که ترکیب‌های مختلفی از ضخامت صفحه، قطر پیچ و نوع فولاد را پوشش می‌دهند. ضخامت صفحات شامل شش مقدار مختلف ۱/۳۲، ۱/۶۳، ۲/۰۱، ۲/۷۷، ۳/۵۱ و ۴/۲۷ میلیمتر مطابق با استاندارد ASTM A796 [۲۶]، انتخاب شد. سطح مقطع ورق‌ها با ضخامت‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای بررسی اثر قطر پیچ، پیچ‌های M10، M12 و M14 با گرید ۱۰/۹ در نظر گرفته شد. جزئیات هندسی پیچ و مهره‌ها در شکل ۱۲ نمایش داده شده است؛ همچنین سوراخ‌های استاندارد مطابق با AISI S100 [۸] مدل‌سازی شدند. برای ارزیابی تأثیر نوع فولاد، سه نوع فولاد سردنورد شامل S275، S235 و S355 با مدول الاستیسیته ۲۱۰ GPa و ضریب پواسون ۰/۳ تعریف شد [۳۳]. رفتار پلاستیک و خرابی این مصالح با تعریف خرابی نرم<sup>۱۳</sup> در آباکوس، از طریق داده‌های آزمایش کشش کوپان مطالعات پیشین [۳۴]، [۳۵]، تنظیم شد.

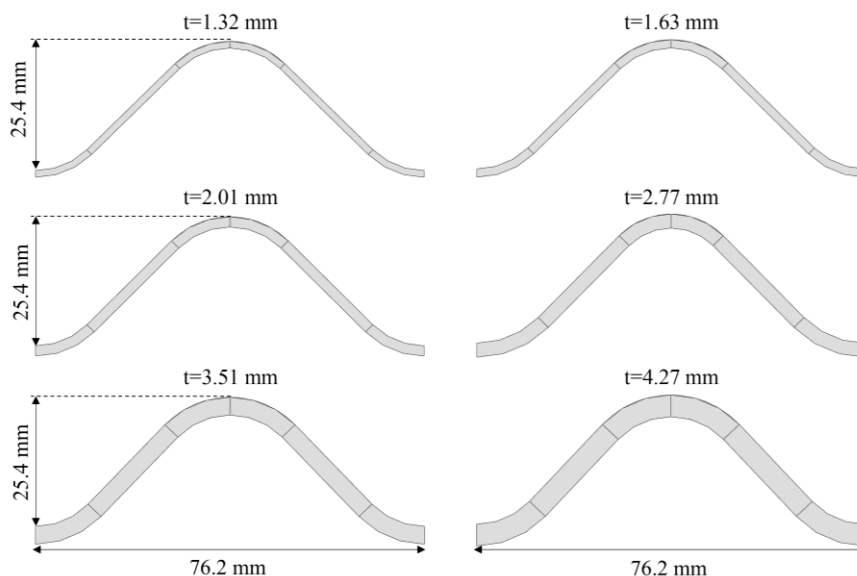


شکل ۱۰- جزئیات هندسی ورق‌ها در پلان

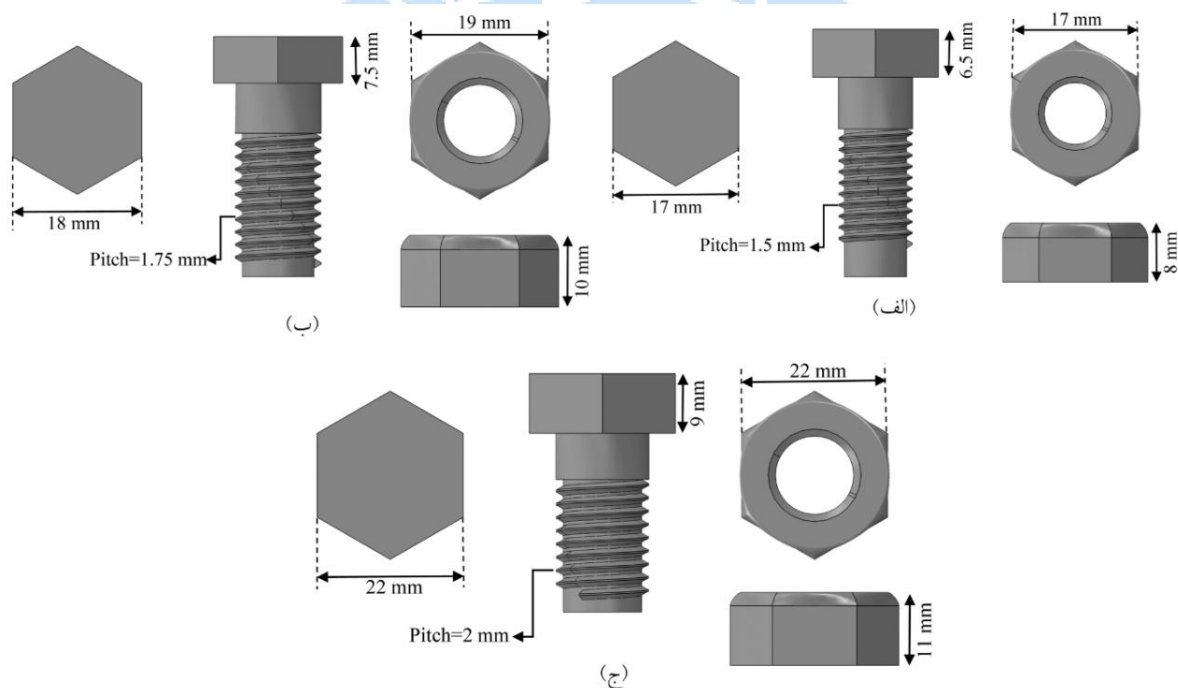
به منظور اعتبارسنجی خواص مصالح، مدلسازی عددی تست کشش کوپان انجام شده است. ابعاد نمونه کوپان مطابق با ASTM A370 [۳۶] مدلسازی شد که در شکل ۱۳-الف) نشان داده شده است. ضخامت نمونه‌ی کوپان برابر ۲/۰۱ میلیمتر و طول گیج آن ۵۰ میلیمتر است. مطابق شکل ۱۳-ب) یک انتهای نمونه کاملاً مقید شده و بارگذاری جابجایی-کنترل به انتهای دیگر اعمال شد. منحنی تنش-کرنش مهندسی حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۱۴ و پارامترهای اصلی آن در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی مشاهده می‌شود.

نمونه‌های اصلی آزمایشی با اتصال صفحات فولادی موجدار توسط دو پیچ مونتاژ شدند. صفحات به گونه‌ای تراز شدند که هم‌پوشانی کامل موج‌ها برقرار باشد و هیچ‌گونه تداخلی بین موج دو ورق بالا و پایین اتصال ایجاد نشود. جهت اجتناب از ایجاد خروج از مرکزیت هنگام اعمال نیروی کششی در نمونه‌ها، از دو ورق لقمه استفاده شد. پیچ‌ها مطابق با قطر سوراخ استاندارد از طریق سوراخ‌های پیش‌دریل شده عبور داده شدند. همچنین فرض شده است که بخش بدون رزوه پیچ‌ها با سوراخ‌ها در تماس بوده و نیروی پیش‌تنیدگی اعمال نشده است. نمای کلی یک نمونه آزمایشی در شکل ۱۵ ارائه شده است.

<sup>13</sup> Ductile Damage



شکل ۱۱- هندسه‌ی سطح مقطع ورق‌ها با ضخامت‌های متغیر



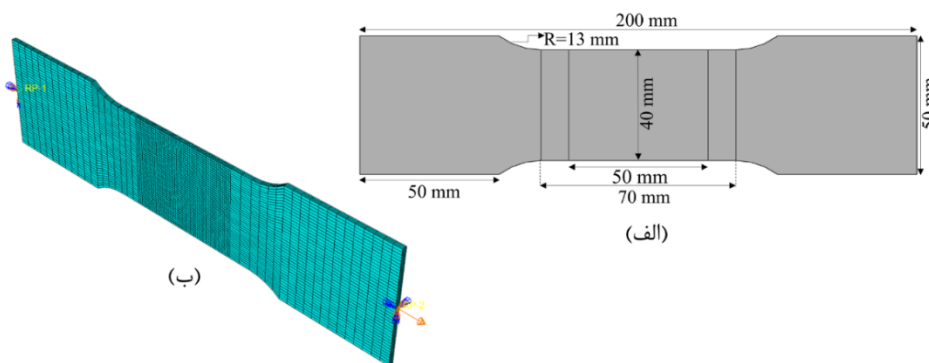
شکل ۱۲- ابعاد هندسی پیچ و مهره‌ها: (الف) M10؛ (ب) M12؛ (ج) M14

جدول ۱- مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی [۳۴]، [۳۵] و عددی کشش کوپان برای سه نوع فولاد S275، S235، S355

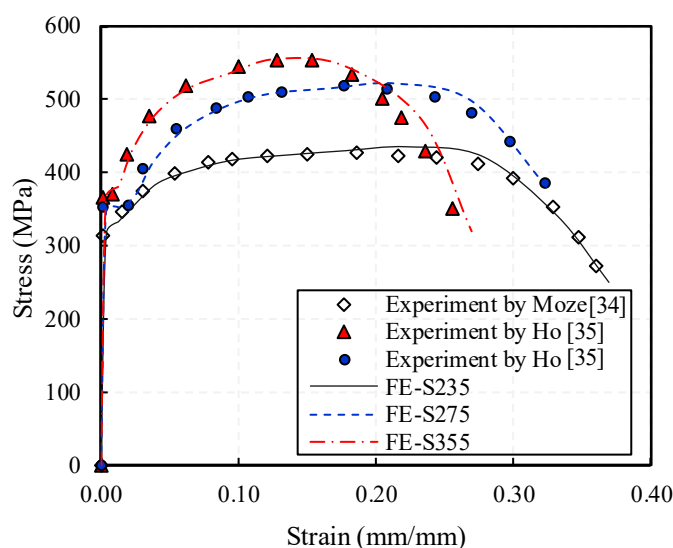
Material	Experimental Results				Numerical Results				Error (%) Numerical vs. Experimental			
	$F_y^1$ (MPa)	$F_u^2$ (MPa)	Strain at $F_u$	Strain at Fracture	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)	Strain at $F_u$	Strain at Fracture	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)	Strain at $F_u$	Strain at Fracture
S235	312.69	426.21	0.20	0.36	317.18	434.76	0.21	0.38	1.44	2.01	5.00	5.26
S275	352.31	518.86	0.18	0.33	349.53	522.44	0.20	0.36	-0.79	0.69	6.52	9.09
S355	365.12	553.02	0.15	0.23	366.48	555.34	0.13	0.26	0.37	0.42	-8.22	9.40

<sup>1</sup>  $F_y$  = Yield Strength

<sup>2</sup>  $F_u$  = Ultimate Strength



شکل ۱۳- تست کشش ورق‌های فولادی؛ (الف) جزئیات هندسی؛ (ب) شرایط مرزی و بارگذاری



شکل ۱۴- نمودار تنش- کرنش سه نوع فولاد S235، S275، S355 حاصل از نتایج آزمایشگاهی [۳۴]، [۳۵] و عددی

تماس جنرال<sup>۱۴</sup> جهت شبیه‌سازی شرایط واقعی تعریف شده است. در جهت مماسی ضریب اصطکاک  $0/2$  [۱۲] از نوع پنالتی<sup>۱۵</sup> اعمال شد تا مقاومت اصطکاکی بین سطوح تماس صفحات و پیچ‌ها را شبیه‌سازی کند. در جهت عمودی به منظور جلوگیری از نفوذ صفحات و اطمینان از در تماس بودن سطوح در شرایط بارگذاری مختلف، تماس سخت<sup>۱۶</sup> با روش اعمال قیود<sup>۱۷</sup> پیش‌فرض<sup>۱۸</sup> تعریف شد. بارگذاری به صورت جابجایی-کنترل به صفحه بالایی اعمال گردید، در حالی که سطح مقطع انتهایی صفحه پایینی به طور کامل مقید نگه داشته شد. شکل ۱۶ شرایط مرزی و بارگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از وقوع خروج از مرکزیت، علاوه بر استفاده از ورق‌های لقمه که با قید بستن<sup>۱۹</sup> به ورق‌های اصلی متصل شده‌اند، نقاط مرجع<sup>۲۰</sup> نیز در مرکز سطح مقاطع عرضی نمونه‌ها تعریف شدند و با استفاده از قید کوپلینگ<sup>۲۱</sup> به سطح مقطع ورق‌ها اتصال پیدا کردند. همچنین، برای شبیه‌سازی بارگذاری استاتیکی و ثبت دقیق رفتار بار-جابجایی نمونه‌ها، بارگذاری جابجایی-کنترل با نرخ  $10$  میلی‌متر بر ثانیه اعمال شد.

<sup>14</sup> General Contact

<sup>15</sup> Penalty

<sup>16</sup> Hard Contact

<sup>17</sup> Constraint enforcement method

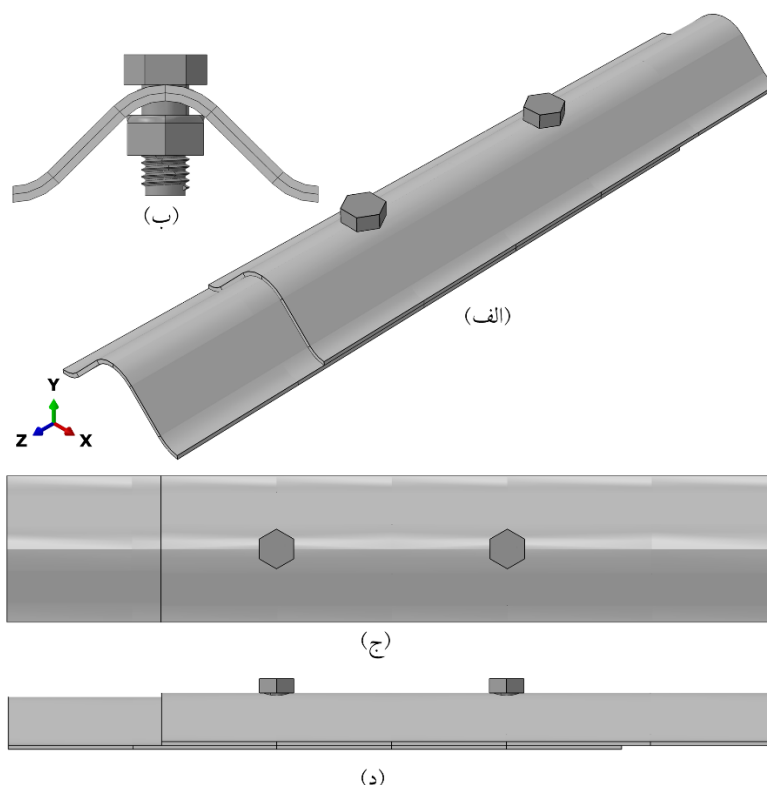
<sup>18</sup> Default

<sup>19</sup> tie

<sup>20</sup> Reference Point

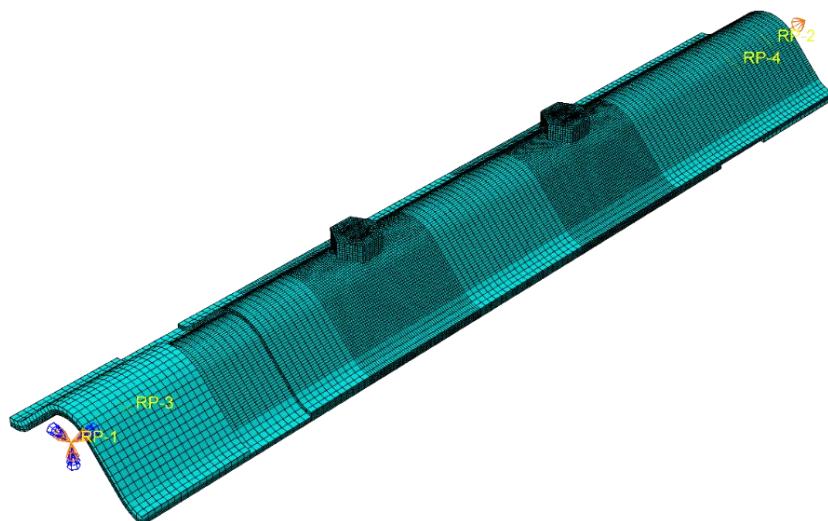
<sup>21</sup> Coupling

در این مطالعه، تحلیل حساسیت در سه مرحله برای بهینه‌سازی المان‌های مش‌بندی شامل تعیین اندازه‌ی المان در اطراف سوراخ‌ها، تعریف تعداد المان‌ها در راستای ضخامت صفحات و انتخاب اندازه‌ی المان برای پیچ‌ها و مهره‌ها انجام شد. در مرحله‌ی نخست، اندازه‌های مش ۱/۵ میلیمتر، ۱/۲۵ میلیمتر و ۱ میلیمتر در اطراف سوراخ‌ها بررسی شدند و اندازه‌ی ۱ میلیمتر به عنوان اندازه‌ی المان‌ها در اطراف سوراخ‌ها انتخاب شد. در مرحله‌ی بعد، تعداد المان‌ها در راستای ضخامت مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت تعداد المان‌ها در راستای ضخامت به گونه‌ای انتخاب شد که حجم المان‌ها در اطراف سوراخ‌ها در محدوده‌ی ۰/۶ تا ۰/۸۵ میلیمتر مکعب قرار گیرد. در مرحله‌ی آخر، اندازه‌ی ۱ میلیمتر برای ثبت دقیق جزئیات رزوه‌ها در پیچ و مهره‌ها انتخاب گردید. تمامی المان‌ها از نوع مکعبی هشت گره‌ای<sup>۲۲</sup> بوده و مش‌زنی با تکنیک ساخت‌یافته<sup>۲۳</sup> انجام شده است.



شکل ۱۵- نمونه مدل آزمایشی: (الف) نمای کلی؛ (ب) نمای صفحه‌ی Y-X؛ (ج) نمای صفحه‌ی X-Z؛ (د) نمای صفحه‌ی Y-Z

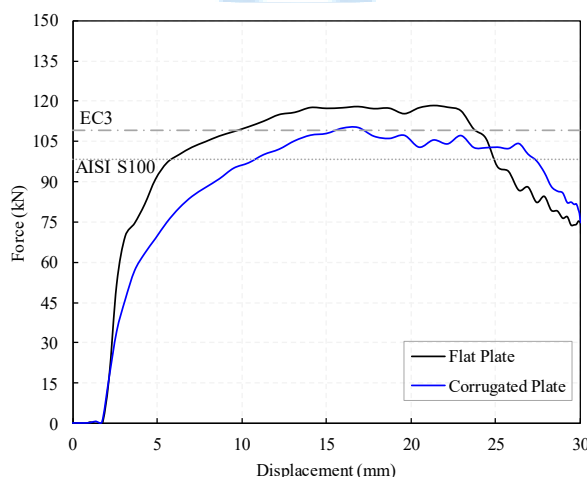
<sup>22</sup> C3D8R  
<sup>23</sup> Structured



شکل ۱۶- شرایط مرزی و بارگذاری نمونه‌ها

#### ۴- نتایج و تفسیر

در گام نخست، به ارزیابی تأثیر موجدار بودن ورق‌ها در قیاس با نمونه‌های ورق صاف در ظرفیت باربری نهایی اتصال پرداخته شده است. بدین منظور رفتار نمونه‌ی موجدار با ضخامت  $4/27$  میلی‌متری (شکل ۱۱) و نمونه‌ی صاف معادل مقایسه شده است. لازم به توضیح است که نمونه‌ی صاف، عرضی معادل با طول یک موج کامل دارد. بنابراین مقدار مصالح مصرفی در دو نمونه‌ی صاف و موجدار یکسان است. هر دو نمونه از نوع فولاد S235 و با پیچ M12 با سوراخ استاندارد مدلسازی شدند. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، هر دو نمونه با خرابی لهیدگی، ظرفیت باربری خود را از دست داده‌اند. نمودار نیرو-جابجایی و توزیع تنش نمونه‌ها به ترتیب در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌ی موجدار ظرفیت باربری کمتری نسبت به ورق صاف از خود نشان می‌دهد. در شکل ۱۷، خطوط افقی خاکستری ظرفیت لهیدگی پیش‌بینی شده توسط  $EC3$  [۳۲] و  $AISI S100$  [۸] را مشخص می‌کنند. مطابق شکل ۱۸ به لحاظ توزیع تنش و تغییر شکل، هر دو نمونه رفتار نسبتاً مشابهی دارند و تمرکز تنش در اطراف سوراخ‌ها ناشی از خرابی لهیدگی است. مطالعه‌ی پارامتری ضمن در نظر گرفتن مؤثر بر ظرفیت لهیدگی نمونه‌های ورق موجدار در ادامه آورده شده است.

شکل ۱۷- رفتار نیرو-جابجایی برای ورق موجدار با ضخامت  $4/27$  میلی‌متر و ورق صاف معادل

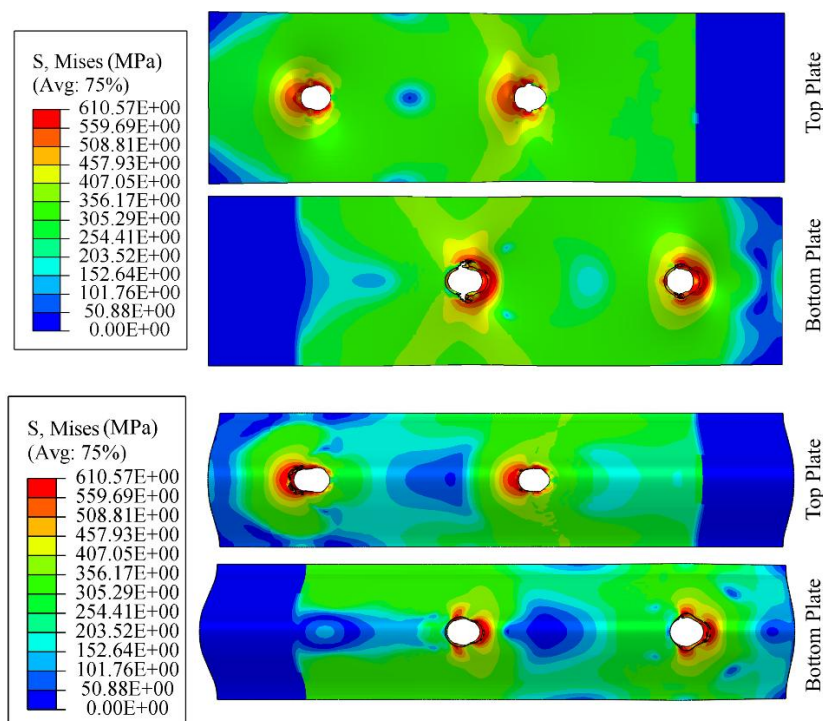
در ادامه به منظور بررسی رفتار لهیدگی ورق‌های موجدار، ۵۴ نمونه عددی توسعه داده شد. مطابق روابط ارائه شده در  $AISI S100$  و  $EC3$  پارامترهای اصلی تأثیرگذار در رفتار لهیدگی در نظر گرفته شد. بر این اساس، مدل‌هایی با شش ضخامت ورق، سه نوع فولاد

و سه سایز پیچ متفاوت ساخته شدند. از میان ۵۴ مدل تحلیل شده، ۵۲ مدل به دلیل خرابی لهیدگی و دو مدل دیگر به دلیل شکست برشی پیچ ظرفیت باربری خود را از دست دادند. شکل ۱۹ ظرفیت لهیدگی بدست آمده از تحلیل عددی ( $P_{FEM}$ ) را که نسبت به پارامتر  $l.t.F_u$  نرمال شده، در مقابل پارامتر  $d/t$  نشان می‌دهد. در عبارت اخیر،  $t$  ضخامت ورق،  $F_u$  مقاومت نهایی فولاد و  $d$  قطر پیچ است. پارامتر  $l$  نیز طول کمان ورق موجدار در محل تماس با بدنه‌ی پیچ مطابق معادلات (۱) تا (۳) است که در شکل ۲۰ نشان داده شده است [۲۸].

$$l = 2R\alpha \quad (۱)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{d/2}{R} \right) \quad (۲)$$

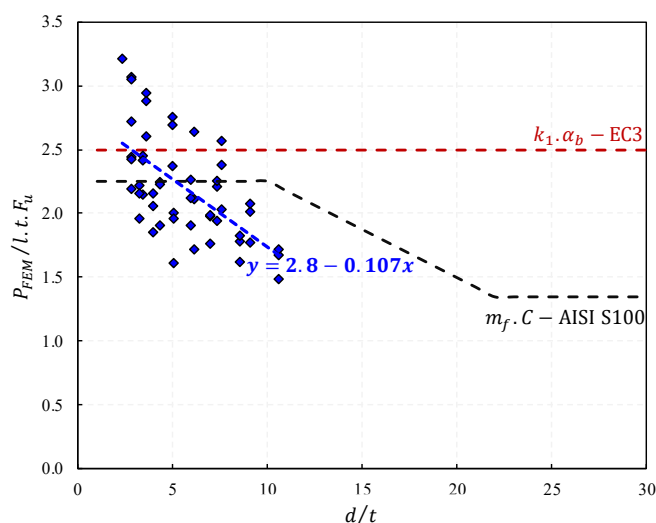
$$l = 2R \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d}{2R} \right) \quad (۳)$$



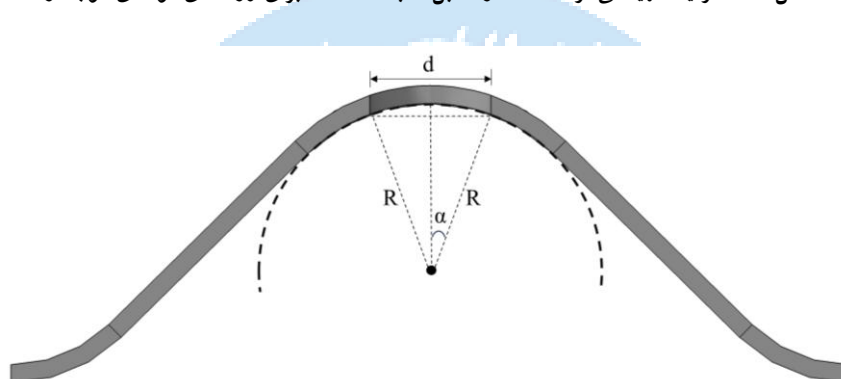
شکل ۱۸- توزیع تنش و تغییر شکل نمونه‌ی صاف و موجدار در بار نهایی

جدول ۲- ضریب لهیدگی،  $C$  [۸]

Thickness of Connected Part, $t$ (mm)	Ratio of Fastener Diameter to Member Thickness $d/t$ ,	$C$
	$d/t < 10$	3.0
$0.61 \leq t < 4.67$	$10 \leq d/t \leq 22$	$4 - 0.1(d/t)$
	$d/t > 22$	1.8



شکل ۱۹- ظرفیت لهدگی نرمال شده در مقابل نسبت  $d/t$  برای ورق های فولادی موجدار



شکل ۲۰- هندسه ی محل تماس ورق موجدار و بدنه ی پیچ

دو آیین نامه ی EC3 و AISI S100، به ترتیب روابط (۴) و (۵) را برای پیش بینی ظرفیت لهدگی نهایی ( $F_{b,rd}$  و  $P_{nb}$ ) اتصالات پیچی ورق های سردنورد صاف پیشنهاد می دهند. در رابطه ی (۴)، ضریب لهدگی مطابق جدول ۲ و  $m_f$  ضریب اصلاحی برابر با ۰/۷۵ برای سوراخ پیچ استاندارد بدون واشر است.

$$l.t.F_u \quad (۴)$$

$$F_{b,rd} = k_1 \alpha_b F_u dt \quad (۵)$$

در رابطه ی (۵)،  $k_1$  و  $\alpha_b$  پارامترهای وابسته به هندسه و مصالح هستند که مطابق با نمادهای ارائه شده در شکل ۲۱، با توجه به جهت انتقال بار متمایز می شوند:

(الف) پیچ و مهره در جهت اعمال بار:

برای پیچ های کناری:

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1.0 \right\} \quad (۶)$$

برای پیچ های داخلی:

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{\rho_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1.0 \right\} \quad (۷)$$

در روابط (۶) و (۷)،  $f_{ub}$  و  $d_0$  به ترتیب مقاومت نهایی پیچ و قطر سوراخ است.  
 (ب) پیچ و مهره عمود بر جهت اعمال بار:  
 برای پیچ‌های کناری:

$$k_1 = \min \left\{ \frac{2.8e_2}{d_0} - 1.7; 2.5 \right\} \quad (۸)$$

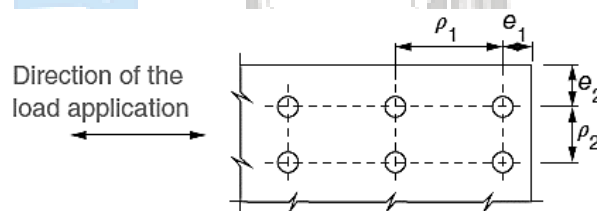
برای پیچ‌های داخلی:

$$k_1 = \min \left\{ \frac{1.4\rho_2}{d_0} - 1.7; 2.5 \right\} \quad (۹)$$

مقادیر  $m_f.C$  و  $k_1.\alpha_b$  مطابق الزامات AISI S100 و EC3 در شکل ۱۹ بصورت خط‌چین مشخص شده است. در مدل‌های مورد بررسی، ۴۹ داده در محدوده‌ی  $d/t < 10$  قرار می‌گیرند؛ در این بازه هر دو آیین‌نامه‌ی AISI S100 و EC3 به ترتیب مقادیر عددی ثابت ۲/۲۵ و ۲/۵۰ را برای ضرایب تعریف شده در بالا معرفی می‌کنند. با توجه به نتایج تحلیل‌های عددی، ضریب لهیدگی پیشنهادی مقاله‌ی حاضر با برازش خطی در شکل ۱۹ بصورت معادله‌ی  $2.8 - 0.107(d/t)$  در بازه‌ی  $d/t < 10$  ارائه شده‌است. با در نظر گرفتن این ضریب و پارامتر  $l.t.F_u$ ، رابطه‌ی (۱۰) برای پیش‌بینی ظرفیت لهیدگی،  $P_b$ ، با ضریب لهیدگی جدید  $C_b$  بدست می‌آید.

$$P_b = C_b l t F_u = C_b \cdot 2R \cdot \sin^{-1} \left( \frac{d}{2R} \right) \cdot t \cdot F_u \quad (۱۰)$$

$$C_b = 2.8 - 0.107 \frac{d}{t}, \quad \frac{d}{t} < 10$$



شکل ۲۱- پارامترهای مورد نیاز برای تعیین  $k_1$  و  $\alpha_b$  [۳۲]

مقدار عددی ظرفیت لهیدگی بدست آمده از تحلیل عددی در جدول ۳ گزارش شده‌است. در نامگذاری نمونه‌ها در جدول ۳، عدد اول نشان‌دهنده ضخامت ورق، عدد دوم مربوط به قطر پیچ، و عدد سوم بیانگر نوع فولاد است. بر اساس نتایج بدست آمده، افزایش ضخامت ورق منجر به افزایش ظرفیت باربری در تمامی ترکیب‌ها شده است، به طوری که نیروی حداکثر از حدود ۱۳/۷ کیلو نیوتن برای نازک‌ترین نمونه‌ها (۱/۳۲ میلی‌متر) تا نزدیک به ۷۰ کیلو نیوتن برای ضخیم‌ترین نمونه‌ها (۴/۲۷ میلی‌متر) افزایش یافته است. در میان انواع فولاد، فولاد S275 در بسیاری از موارد، عملکرد بهتری نسبت به S235 و حتی S355 دارد که بیانگر رفتار باربری مطلوب‌تر آن است؛ این موضوع به دلیل نزدیکی مقادیر مقاومت نهایی فولادهای S275 و S355 است، در حالی که S275 از نظر رفتار تغییرشکل، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. در ضخامت‌های بالاتر، پیچ‌های بزرگ‌تر تمایل به تحمل بار بیشتر دارند. به صورت کلی تأثیر قطر پیچ در نمونه‌های مختلف متغیر می‌باشد، این موضوع به دلیل انحنای ورق‌های موج‌دار در محل سوراخ‌ها است که باعث می‌شود تأثیر قطر پیچ در نمونه‌های مختلف متغیر باشد.

جدول ۳ همچنین دقت روابط (۴)، (۵) و (۱۰) را در پیش‌بینی ظرفیت لهیدگی ورق‌های موج‌دار با اتصالات پیچی نشان می‌دهد. با توجه به میانگین و حداکثر مقدار خطای محاسبه شده، AISI S100 در قیاس با آیین‌نامه‌ی EC3 پیش‌بینی مناسب‌تری از ظرفیت لهیدگی دارد. اگرچه AISI S100 پیش‌بینی مناسبی از ظرفیت ارائه می‌نماید، اما با توجه به شکل ۱۹، ظرفیت لهیدگی تحلیل‌های

عددی با افزایش نسبت  $d/t$  بصورت خطی کاهش می‌یابد. بنابراین، فرم پیشنهادی مقاله‌ی حاضر رابطه‌ی ارجح قلمداد می‌شود. مضافاً رابطه‌ی پیشنهادی به بهبود نسبی پیش‌بینی ظرفیت لهیدگی نیز منجر شده است.

جدول ۳- مقایسه دقت روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها و رابطه‌ی پیشنهادی در معادله‌ی (۱۰) برای پیش‌بینی ظرفیت لهیدگی

No.	Specimen	$P_{FEM}$ (N)	$P_b$ from Eq. (10) (N)	Error (%)		
				( $P_{FEM}$ vs. $P_b$ )	( $P_{FEM}$ vs. $P_{AISI}$ )	( $P_{FEM}$ vs. $P_{EC3}$ )
1	1.32-M10-S235	13680.2	11428.24	16.46	7.51	2.76
2	1.32-M10-S275	17912.35	13896.31	22.42	14.11	4.57
3	1.32-M10-S355	15125.8	14835.25	1.92	8.58	20.65
4	1.32-M12-S235	13989.65	12724.00	9.05	8.53	20.59
5	1.32-M12-S275	17556.5	15471.91	11.87	5.15	16.84
6	1.32-M12-S355	16032	16517.31	3.03	22.93	36.59
7	1.32-M14-S235	13796.3	13698.50	0.71	25.82	42.66
8	1.32-M14-S275	17199.75	16656.86	3.16	22.72	39.14
9	1.32-M14-S355	15887.05	17782.32	11.93	41.84	60.81
10	1.63-M10-S235	18715.95	15205.73	18.76	14.47	4.97
11	1.63-M10-S275	18188.2	18489.60	1.66	7.01	18.90
12	1.63-M10-S355	15780.05	19738.90	25.09	31.68	46.31
13	1.63-M12-S235	19029.6	17302.96	9.07	0.94	12.15
14	1.63-M12-S275	23537.8	21039.75	10.61	0.77	10.26
15	1.63-M12-S355	21639.15	22461.35	3.80	15.23	28.03
16	1.63-M14-S235	18124.3	19108.10	5.43	23.64	37.38
17	1.63-M14-S275	22589.3	23234.73	2.86	20.63	34.03
18	1.63-M14-S355	21363.75	24804.64	16.11	36.17	51.30
19	2.01-M10-S235	24110.9	19836.22	17.73	20.09	11.22
20	2.01-M10-S275	28684.75	24120.09	15.91	18.33	9.26
21	2.01-M10-S355	26974.6	25749.83	4.54	7.29	3.02
22	2.01-M12-S235	22493.65	22915.87	1.88	2.78	14.20
23	2.01-M12-S275	29137.75	27864.84	4.37	3.52	7.20
24	2.01-M12-S355	26220.25	29747.60	13.45	14.46	27.18
25	2.01-M14-S235	24772	25739.22	3.90	8.88	20.98
26	2.01-M14-S275	30305.1	31297.92	3.28	8.22	20.25
27	2.01-M14-S355	28646.9	33412.65	16.64	22.22	35.80
28	2.77-M10-S235	35441.4	29097.18	17.90	25.09	16.76
29	2.77-M10-S275	42235.35	35381.08	16.23	23.56	15.07
30	2.77-M10-S355	40725.05	37771.69	7.25	15.37	5.97
31	2.77-M12-S235	32863.25	34141.69	3.89	3.05	7.72
32	2.77-M12-S275	39622.4	41515.01	4.78	2.22	8.64
33	2.77-M12-S355	36136.55	44320.08	22.65	14.45	27.17
34	2.77-M14-S235	34652.85	39001.46	12.55	7.27	19.18
35	2.77-M14-S275	41189.3	47424.31	15.14	9.73	21.93
36	2.77-M14-S355	36099.75	50628.65	40.25	33.66	48.51
37	3.51-M10-S235	46913.8	38114.43	18.76	28.29	20.32
38	3.51-M10-S275	56646.5	46345.72	18.18	27.78	19.76
39	3.51-M10-S355	53851	49477.18	8.12	18.90	9.89
40	3.51-M12-S235	45370.1	45072.10	0.66	11.02	1.13

41	3.51-M12-S275	54331	54805.98	0.87	9.64	0.39
42	3.51-M12-S355	51705	58509.08	13.16	1.36	12.62
43	3.51-M14-S235	47078.05	51914.69	10.27	0.05	11.16
44	3.51-M14-S275	54699.5	63126.32	15.41	4.70	16.34
45	3.51-M14-S355	52647	67391.61	28.01	16.14	29.04
46	4.27-M10-S235	59655.5	47375.39	20.59	31.39	23.77
47	4.27-M12-S235	55106.5	56297.92	2.16	10.88	0.97
48	4.27-M12-S275	66333.5	68456.15	3.20	9.97	0.03
49	4.27-M12-S355	64107	73081.57	14.00	0.55	10.50
50	4.27-M14-S235	59133.5	65176.93	10.22	3.10	7.66
51	4.27-M14-S275	69765	79252.70	13.60	0.13	10.97
52	4.27-M14-S355	67625	84607.62	25.11	9.99	22.21
Average				11.51	14.07	19.32
Max				40.25	41.84	60.81

## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، رفتار لهیدگی اتصالات پیچی در ورق‌های فولادی موجدار به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا تفاوت رفتار بین یک ورق موجدار و ورق تخت معادل آن مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس، مطابق با AISI S905، تعداد ۵۴ مدل با ضخامت‌های مختلف ورق، قطرهای متفاوت پیچ و انواع گوناگون فولاد توسعه داده شد. پارامتر جدید  $l$ ، که طول انحنای ورق موجدار در تماس با بدنه‌ی پیچ را نشان می‌دهد، به جای قطر پیچ در فرمول اصلی لهیدگی معرفی شد. یافته‌های کلیدی به شرح زیر هستند:

۱- با وجود تمرکز تنش و الگوهای تغییر شکل مشابه، ورق‌های فولادی موجدار ظرفیت لهیدگی کمتری نسبت به ورق‌های تخت معادل خود نشان دادند.

۲- با بررسی داده‌ها در بازه‌ی  $d/t < 10$ ، یک روند کاهشی در ضریب لهیدگی نهایی اتصالات پیچی در ورق‌های موجدار با افزایش نسبت  $d/t$  در این محدوده مشاهده شد. این در حالی است که آیین‌نامه‌های EC3 و AISI S100 در محدوده‌ی یاد شده ضریب ثابتی را در نظر می‌گیرند.

۳- علیرغم آن که روابط آیین‌نامه‌ها مربوط به ورق‌های صاف است، میانگین خطای مناسبی در پیش‌بینی نتایج عددی نمونه‌های ورق موجدار از خود نشان دادند. در مقام مقایسه، روابط AISI S100 دقت بیشتری از EC3 حاصل داده است.

۴- جهت در نظرگیری هندسه‌ی ورق‌های موجدار در روابط لهیدگی، پارامتر طول انحنا ( $l$ ) جایگزین قطر پیچ در رابطه‌ی لهیدگی پیشنهادی شد. همچنین ضریب لهیدگی بصورت رابطه‌ی خطی برحسب  $d/t$  ارائه شد. به این ترتیب، ضمن بهبود نسبی پیش‌بینی نتایج، شکل رابطه با نتایج عددی سازگار شد.

## ۸- منابع

- [1] Kim, S. and Lee, J. (2014), Numerical evaluation of deep corrugated steel plate seam strength. *International Journal of Steel Structures*, vol. 14(2), pp. 315–321. doi: 10.1007/s13296-014-2011-3.
- [2] Yu, X., Raeesi, A., Ghaednia, H., Heydariha, J., Das, S. and Xie S. (2017), Behavior of a large steel field silo structure subject to grain loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 31(5). doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001037.
- [3] Yu, W., LaBoube, R.A. and Chen, H. (2019). *Cold-formed steel design*. 5th Edition. CCFSS Library (1939 - present). 240.

- [4] Rogers, C.A. and Hancock, G. J. (2000), Failure modes of bolted-sheet-steel connections loaded in shear. *Journal of Structural Engineering*, vol. 126 (3), pp. 288–296. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:3(288).
- [5] Atroschenko, O., Tkachuk, M.A., Martynenko, O.V. (2019), The study of multicomponent loading effect on thin-walled structures with bolted connections. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1 (7), pp. 15–25. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154378.
- [6] Yu, C. and Panyanouvong, M. X. (2013), Bearing strength of cold-formed steel bolted connections with a gap. *Thin-Walled Structures*, vol. 67, pp. 110–115. doi: 10.1016/j.tws.2013.01.015.
- [7] Yu C., Xu K., and Sheerah, I. (2011), Bearing strength of cold-formed steel bolted connections using oversized holes without washers. *Journal of Structural Engineering*, vol. 137(1), pp. 156–159. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000270.
- [8] American Iron and Steel Institute. (2013), North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. *American Iron and Steel Institute (AISI) Specifications, Standards, Manuals and Research Reports (1946 - present)*.
- [9] Teh, L. H. and Uz, M. E. (2017) Ultimate tilt-bearing capacity of bolted connections in cold-reduced steel sheets. *Journal of Structural Engineering*, vol. 143(4). doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001702.
- [10] Toporiš, M. and Može, P. (2021), Numerical analysis of the influence of curling on the strength of connections with one bolt. *ce/papers*, vol. 4(2–4), pp. 951–957. doi: 10.1002/cepa.1383.
- [11] Huynh, M. T., Pham, C. H. and Hancock, G. J. (2020), Experimental behaviour and modelling of screwed connections of high strength sheet steels in shear. *Thin-Walled Structures*, vol. 146. doi: 10.1016/j.tws.2019.106357.
- [12] Quan, G., Ye, J. and Li, W. (2021), Computational modelling of cold-formed steel lap joints with screw fasteners. *Structures*, vol. 33, pp. 230–245. doi: 10.1016/j.istruc.2021.04.062.
- [13] Liu, X., Zhang, W., Yu, C., Li, Y., Jiang, Z. and Yu, S. (2022), Experimental study on cold-formed steel shear walls with different corrugated steel sheathings. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 199, p. 107639. doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107639.
- [14] Tong, J., Wu, R. and Wang, L. (2023), Experimental and numerical investigations on seismic behavior of stiffened corrugated steel plate shear walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 52(12), pp. 3551–3574. doi: 10.1002/eqe.3920.
- [15] Cao, K., Fu, Q., Zhang, J., Li, H., Ma, W., Zhang, S., Ge, H. and Yu, K. (2023), Analysis of the influence of corrugated steel thickness on the damage characteristics and explosion resistance of corrugated steel-concrete composite structure. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02383. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02383.
- [16] Wu, R.M., Wang, L.Q., Tong, J.Z., Tong, G.S. and Gao, W. (2024), Elastic buckling formulas of multi-stiffened corrugated steel plate shear walls. *Engineering Structures*, vol. 300, p. 117218. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.117218.
- [17] Pandit, U. K., Mondal, G. and Punera, D. (2024), Investigating the static, free vibration, and buckling responses of corrugated steel plate-made structures using efficient homogenization-based FE modelling. *Structures*, vol. 70, p. 107643. doi: 10.1016/j.istruc.2024.107643.
- [18] Duan, S.-J., Tong, G.-S. and Tong, J.-Z. (2024), Behavior and design of steel beam to multi-celled corrugated-plate CFST wall joints. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 214, p. 108468. doi: 10.1016/j.jcsr.2024.108468.
- [19] Mohammed, H. and Kennedy, J. B. (2009), Fatigue resistance of corrugated steel sheets bolted lap joints under flexure, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 14(4), pp. 242–245. doi: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000021.
- [20] Ju, M. and Oh, H. (2016), Static and fatigue performance of the bolt-connected structural jointed of deep corrugated steel plate member. *Advances in Structural Engineering*, vol. 19(9), pp. 1435–1445. doi: 10.1177/1369433216643894.

- [21] Leander, J., Wadi, A. and Pettersson, L. (2017), Fatigue testing of a bolted connection for buried flexible steel culverts. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej*, pp. 153–162. doi: 10.21008/j.1897-4007.2017.23.15.
- [22] Wu, Y., Du, X. and Yuan, H. (2021), Structural performance of cold-formed steel box girders with C-section flanges and sinusoidal corrugated webs. *Structures*, vol. 34, pp. 4851–4866. doi: 10.1016/j.istruc.2021.10.066.
- [23] Wu, Y., Du, X., Yuan, H. and Zhou, M. (2022), Shear behaviour and design of cold-formed steel box girders with tubular flanges and sinusoidal corrugated webs. *Thin-Walled Structures*, vol. 174, p. 109066. doi: 10.1016/j.tws.2022.109066.
- [24] Tang, G., Yin, L., Guo, X. and Cui, J. (2015), Finite element analysis and experimental research on mechanical performance of bolt connections of corrugated steel plates. *International Journal of Steel Structures*, vol. 15(1), pp. 193–204. doi: 10.1007/s13296-015-3014-4.
- [25] Keene, R. W., Richie, M. C., Beaver, J. L. and Sanders, D. (2017), Physical testing to determine ultimate strength of bolted longitudinal seams in deep corrugated structural plate for long-span structures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2642(1), pp. 9–17. doi: 10.3141/2642-02.
- [26] American Iron and Steel Institute, (2018), Test Standard for Determining the Strength and Deformation Characteristics of Cold-Formed Steel Connections. *American Iron and Steel Institute (AISI) Specifications, Standards, Manuals and Research Reports (1946 - present)*.
- [27] Pichugin, S., Makhinko, A. and Makhinko, N. (2020), Reliability assessment of multi-bolt joints of silo capacity's wall. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations, Cham: Springer*, pp. 183–192. doi: 10.1007/978-3-030-42939-3\_20.
- [28] Zhang, C. and Su, M. (2024), Bearing capacity of bolted longitudinal seams of corrugated steel structures under compression. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 213. doi: 10.1016/j.jcsr.2023.108416.
- [29] Ma, C., Ding, W., Zhang, Q. and Huang, X. (2024), Mechanical characteristics of flange joints for corrugated steel plate: Experiment and simulation. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 221, p. 108919. doi: 10.1016/j.jcsr.2024.108919.
- [30] Dassault Systèmes Simulia, Abaqus CAE, 2021.
- [31] American Iron and Steel Institute, (2018), Test Standard for Determining the Strength and Deformation Characteristics of Cold-Formed Steel Connections. *American Iron and Steel Institute (AISI) Specifications, Standards, Manuals and Research Reports (1946 - present)*.
- [32] EN 1993-1-8 (2023), Eurocode 3, Design of steel structures – part 1-8: Joints
- [33] EN 1993-1-1 (2005), Eurocode 3, Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [34] Može, P. and Beg, D. (2014), A complete study of bearing stress in single bolt connections. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 95, pp. 126–140. doi: 10.1016/j.jcsr.2013.12.002.
- [35] Ho, H. C., Chung, K. F., Xiao, T. Y., Yam, M. C. H. and Nethercot, D. A. (2022), Non-linear necking behaviour of S275 to S960 structural steels under monotonic tension. *Engineering Structures*, vol. 261. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114263.
- [36] Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products 1, (2015) *ASTM International*. doi: 10.1520/A0370-15.