

بررسی آزمایشگاهی رفتار اتصال‌های کفستون‌ها به همرا میل‌مهارهای جوش‌شده بدون خروج از مرکزیت با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال

ایمان کرمی (کارشناس ارشد)

سید رسول میرقادری (استاد)

امیررضا قیامی آزاد* (استادیار)

محمود علی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران.

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۳)
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۳، صص. ۱۳۸-۱۵۲، (پژوهشی)

در اتصال‌های کفستون متداول، با خمیری شدن میل‌مهارها و عدم تماس بین ورق کفستون و بتن در حین بارگذاری، پینچینگ در نمودار هیستریزس رخ می‌دهد. هدف پژوهش حاضر، ایجاد نوعی اتصال جوشی میل‌مهار زیر ورق کفستون جهت ایجاد باربری لحظه‌یی در میل‌مهارها بدون خروج از مرکزیت نسبت به بال ستون است. بنابراین، جهت بررسی مقاومت، ۴ نوع اتصال جوشی تحت کشش، شامل: جوش گوشه‌ی ویژه، جوش شیاری با نفوذ کامل، جوش شیاری استوانه‌یی، و جوش شیاری مخروطی از اتصال T- شکل طراحی شده مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ها و مدهای گسیختگی استفاده شده است. ظرفیت، نوع شکست، و میدان کرنش اتصال جوشی میل‌مهار در هر نمونه با حالت‌های مختلف به کمک روش همبستگی تصاویر دیجیتال سنجیده شده‌اند. در نتیجه، اتصال‌های جوشی تقریباً توانایی تحمل ظرفیت نهایی میل‌مهارها را داشتند و تا آخرین لحظه از بارگذاری، در حالت کشسان باقی ماندند. البته شکست میل‌مهارهای پُرمقاومت در ناحیه‌ی HAZ، پدیده‌ی مهمی است، که از طریق عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش قابلیت کنترل دارند. همچنین جوش گوشه‌ی ویژه از لحاظ هزینه و سهولت اجرا نسبت به بقیه‌ی اتصال‌های جوشی، در اولویت اول قرار دارد.

imankarami@ut.ac.ir
rmirghaderi@ut.ac.ir
rghiami@ut.ac.ir
mahmoud.ali@ut.ac.ir

واژگان کلیدی: اتصال کفستون، اتصال T- شکل، روش جزء، جوش شیاری، جوش گوشه، میل‌مهار، همبستگی تصاویر دیجیتال.

۱. مقدمه

شکل ۱ قرار می‌گیرند. مطابق با شکل (۱- الف)، نیروهای جانبی وارد بر ستون، در اتصال کفستون از طریق نیروی کششی میل‌مهار و تنش فشاری ایجاد شده زیر ورق کفستون به فونداسیون منتقل می‌شوند. روداس^۴ و همکاران (۲۰۱۶) نتیجه گرفتند که با افزایش نیروی جانبی اعمال شده به ستون مطابق با شکل (۱- الف)، در ابتدا تسلیم خمشی ورق کفستون و سپس تسلیم میل‌مهارهای کششی که باعث ایجاد گپ بین ورق کفستون و گروت می‌شوند، رخ می‌دهند. به همین دلیل، پینچینگ^۵ در نمودار هیستریزس تحت بارگذاری دوره‌یی رخ می‌دهد و پارامترهای سختی و مقاومت اتصال در حین باربرداری به دلیل عدم تماس نیرویی بین ورق کفستون و میل‌مهار، تحت تأثیر قرار می‌گیرند.^[۴]

وجود نقص و ناپایداری در مسیر انتقال نیرو از سازه به فونداسیون، منجر به خرابی در سازه می‌شود. مطابق با پژوهش آستانه اصل^۶ (۲۰۰۸) و شکل (۱- ب)، نیروی

امروزه اتصال‌های کفستون متداول، یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سازه‌ی فولادی هستند، که نقش مهمی در انتقال نیروهای سازه به فونداسیون دارند. ورق کفستون، وظیفه‌ی انتقال تنش‌های فشاری وارده از طرف ستون به فونداسیون را به صورت تدریجی و کاهش داده‌شده دارد. بررسی‌های انجام شده در مورد خرابی‌های زلزله، توسط ترمبلی^۱ و همکاران (۱۹۹۵) نشان دادند که اتصال‌های کفستون نمایان متداول در مقابل مدهای گسیختگی، از قبیل: شکست جوش، تسلیم ورق کفستون، شکست میل‌مهار، و خردشدگی گروت، آسیب‌پذیر هستند.^[۱] لاتور و ریزانو^۲ (۲۰۱۳) و لیم^۳ و همکاران (۲۰۱۷)، در ارزیابی‌های عددی متعددی که انجام دادند، دریافتند که فرض مفصلی یا گیردار کامل برای اتصال‌های کفستون متداول صحیح نیستند و اتصال‌های کفستون، رفتار نیمه‌گیردار دارند.^[۲] در سیستم‌های قاب خمشی، ستون‌ها و اتصال‌های کفستون تحت نیروهای محوری و جانبی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۸/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷.

استناد به این مقاله:

کرمی، ایمان، میرقادری، سید رسول، قیامی آزاد، امیررضا، و علی، محمود، ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی رفتار اتصال‌های کفستون‌ها به همراه میل‌مهارهای جوش‌شده بدون خروج از مرکزیت با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، مهندسی عمران شریف، ۴۰(۳)، صص ۱۳۸-۱۵۲. DOI: 10.24200/j30.2024.63404.3271

^۴ Rodas

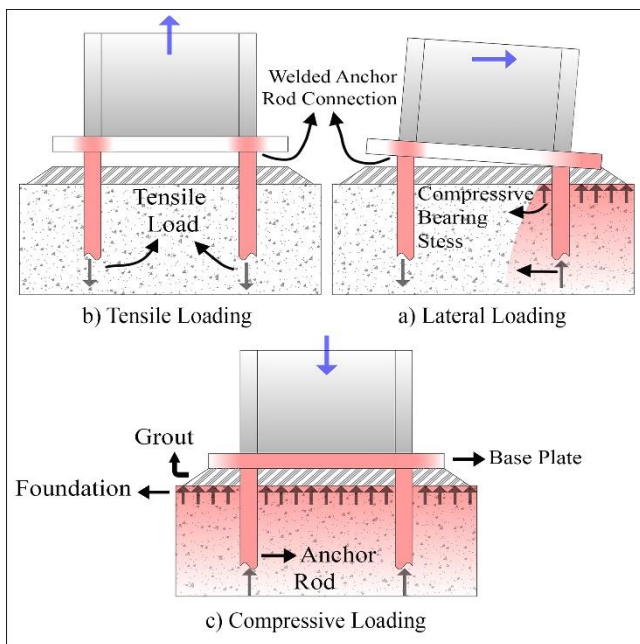
^۵ Pinched

^۶ Astaneh-Asl

^۱ Tremblay

^۲ Latour & Rizzano

^۳ Lim



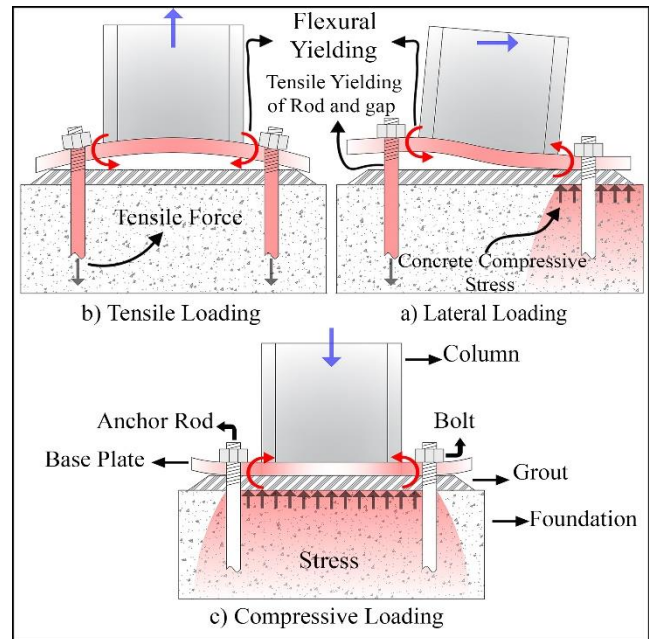
شکل ۲. مکانیزم انتقال نیرو در اتصالات های کفستون.

و همیشگی میل مهار به ورق کفستون توسط اتصالات های جوشی و فعال شدن باربری فشاری میل مهارها، عامل ایجاد پینچینگ از نمودار هیستریزس اتصال حذف می شود.

در شکل ۲، پیکربندی اتصالات های کفستون ها با اتصالات های جوشی میل مهار به زیر ورق کفستون و چگونگی انتقال بارهای جانبی و محوری از لحاظ تئوری مشاهده می شود.

مطابق با شکل (۲-الف)، لنگرهای خمشی ناشی از نیروهای جانبی وارد بر ستون، توسط میل مهارهای کششی و فشاری و گروت به فونداسیون منتقل می شوند. در این حالت، تغییرشکل طولی در میل مهارهای کششی رخ می دهد، اما در هنگام بارگذاری خلاف جهت، برخلاف اتصالات های کفستون متداول، هیچ عدم تماسی بین میل مهار و ورق کفستون به وجود نمی آید و بارگیری کششی و فشاری توسط میل مهارها در هر لحظه از بارگذاری دوره ای امکان پذیر است. به همین دلیل، حالت پینچینگ در نمودار هیستریزس تحت بارگذاری های دوره ای رخ نمی دهد. مطابق با شکل (۲-ب)، نیروی کششی اعمال شده به ستون، کاملاً توسط تمام میل مهارهای کششی به بتن منتقل می شود و در ورق کفستون در این حالت به دلیل عدم وجود خروج از مرکزیت بین میل مهار و بال ستون، برخلاف اتصالات های کفستون متداول، خمش و تغییرشکل خمشی در ورق تحت این نوع بارگذاری ایجاد نمی شود. همچنین مطابق با شکل (۲-ج)، نیروی فشاری وارد شده بر ستون با مشارکت تمام میل مهارهای فشاری و ورق کفستون به فونداسیون منتقل می شود.

میل مهارها در اتصالات های کفستون پیشنهادی در حین بارگذاری، یا تحت کشش مستقیم و یا تحت فشار مستقیم هستند. در میل مهارها و اتصالات جوشی تحت نیروی فشاری، به دلیل اتکاء میل مهار به ورق و محصورشدگی جوش از طرف گروت و عدم کمانش میل مهار در بتن، هیچ گونه مد خرابی برای اتصالات های جوشی تحت فشار مدنظر نیست. به همین دلیل، رفتار اتصال



شکل ۱. مکانیزم انتقال نیرو در اتصالات های کفستون متداول

[باز تولید شده از برخی منابع (۴ و ۵)].

کششی وارد بر ستون، باعث ایجاد تغییرشکل خمشی در ورق کفستون و تغییرشکل کششی در میل مهار می شود و به دلیل تغییرشکل های ایجاد شده، مقاومت اتصال کفستون تحت تأثیر قرار می گیرد. [۵] همچنین مطابق با شکل (۱-ج)، نیروی فشاری وارد بر ستون، فقط از طریق ورق کفستون به صورت تنش فشاری به فونداسیون بتنی منتقل و باعث خم شدن قسمت های کناری ورق کفستون می شود. در این حالت، میل مهارها هیچ مشارکتی در انتقال نیروی فشاری به فونداسیون ندارند. [۵] گومز^۱ و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی نشان دادند که عامل ایجاد پینچینگ، باعث کاهش انرژی مستهلک شده در نمودار هیستریزس اتصال کفستون شده است. [۶] مطابق با پژوهش های فهمی^۲ (۲۰۰۰) و روداس و همکاران (۲۰۱۶)، با افزایش نیروهای وارده، خرابی های گزارش شده در اتصال کفستون های ضخیم، گسیختگی ترد میل مهارها، و خردشدگی بتن بوده است. بنابراین، استفاده از کفستون ضخیم جهت جلوگیری از تغییرشکل های خمشی ورق و افزایش مقاومت و سختی ورق نیز مودهای گسیختگی ترد را در اتصال به همراه دارد. [۷ و ۴] نیروی برشی ستون نیز از طریق کلید برشی زیر ورق کفستون، به فونداسیون منتقل می شود. البته علت ایجاد تمام تغییرشکل های خمشی اتصالات های کفستون متداول، وجود خروج از مرکزیت اجباری بین میل مهار و بال ستون است.

بنابراین، جهت حذف عامل ایجاد پینچینگ در نمودار هیستریزس اتصالات های کفستون متداول و حذف خروج از مرکزیت میل مهار نسبت به بال ستون پیشنهاد شده است که میل مهارها به زیر ورق کفستون دقیقاً در ناحیه ی زیرین بال ستون با اتصالات های جوشی به صورت عمودی متصل شوند. مطابق با شکل (۲-الف)، با حذف خروج از مرکزیت بین میل مهار و بال ستون و قرارگرفتن میل مهارها زیر ناحیه ی بال ستون، میل مهارهای فشاری و کششی توسط اتصالات های جوشی، نیروهای وارده از طرف ستون را بدون ایجاد خمش در ورق کفستون، مستقیماً به فونداسیون منتقل می کنند. به دلیل اتصال پایدار

^۲ Fahmy

^۱ Gomez

مطابق با شکل ۳، جزء T- شکل کششی از ورق کفستون براساس ضوابط Eurocode ۳^[۸]، به اندازه‌ی طول و عرض مؤثر از ورق کفستون جدا شده است. مقدار طول و عرض مؤثر از طریق کمینه‌ی فاصله‌ی مجاز آیین‌نامه‌یی بین میل‌مه‌ارها تعیین می‌شوند.

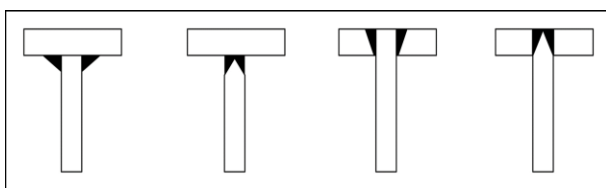
مطابق با شکل ۳، نحوه‌ی اجرای اتصال مذکور طوری است که در ابتدا میل‌مه‌ارها به زیر ورق کفستون در کارخانه جوش می‌شوند. در مرحله‌ی بعدی، قسمتی از ستون اصلی با ارتفاع مشخصی به ورق کفستون در کارخانه جوش داده می‌شود. سپس، اتصال کفستون آماده‌شده به محل ساخت سازه فرستاده می‌شود. بعد از نصب دقیق اتصال در محل فونداسیون و بتن‌ریزی، ستون‌های اصلی با اتصال وصله‌ی پیچی در یک سوم میانی طبقه به ستون متصل به ورق کفستون وصل می‌شوند.

در اتصال‌های کفستون پیشنهادی به دلیل عدم تعویض یا ترمیم‌پذیری اجزاء اتصال، طبق آیین‌نامه‌ی AISC-۳۶۰^[۱۰] باید تمام اجزاء اتصال از جمله: ورق کفستون، اتصال‌های جوشی، میل‌مه‌ارها، و بتن به صورت کشسان طراحی شوند. همچنین جهت شناسایی رفتار اتصال‌های ذکرشده، اتصال‌های جوشی باید در برابر نیروی گسیختگی میل‌مه‌ارها به صورت کشسان طراحی شوند و انتظار می‌رود اتصال‌های جوشی در اتصال T- شکل، ظرفیت نهایی کششی میل‌مه‌ارها را تحمل کنند و در انتها، میل‌مه‌ار شکسته شود تا اطمینان از ظرفیت مقاومتی اتصال‌های جوشی حاصل شود. البته در طراحی اتصال کفستون پیشنهادی، میل‌مه‌ارها نیز در طراحی کلی اتصال‌های کفستون باید در برابر ظرفیت ستون به صورت کشسان طراحی شوند.

در یک ارزیابی عددی انجام‌شده توسط وکیلی صادقی و همکاران (۲۰۲۲)^[۹] میل‌مه‌ارها بدون در نظر گرفتن نوع اتصال جوشی، زیر ورق‌های کف دیوار مختلط برشی به صورت قائم با اتصال‌های جوشی جای‌گذاری و عملکرد و مکانیزم انتقال نیروها در اتصال مذکور بررسی و چهار نوع اتصال جوشی میل‌مه‌ار به ورق، مطابق با شکل ۴، بدون در نظر گرفتن جزئیات هندسی و معیارهای طراحی جهت ایجاد اتصال پیشنهاد شده است.^[۹]

پژوهشگران نشان دادند که به دلیل ایجاد حرارت ناشی از جوشکاری در فلزات، تنش‌های پسماند زیادی در ورق ایجاد می‌شود و احتمال وقوع شکست زود هنگام، کاهش ظرفیت مقاومتی، کاهش شکل‌پذیری، و شکست تردگونه یا محتمل در مصالح پرمقاومت در ناحیه‌ی HAZ وجود دارد.^[۱۱-۱۵]

طبق پژوهش‌های بیورک^۳ و همکاران (۲۰۱۸) و برزگر^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، در حین انجام عملیات جوشکاری روی ورق فولادی، گرمای زیادی در جهت ضخامت ورق ایجاد می‌شود و میزان ضخامت ورق کفستون، در نرخ

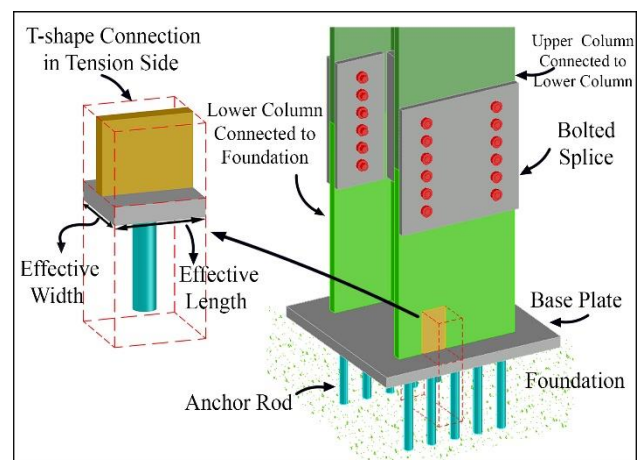


شکل ۴. اتصال‌های جوشی میل‌مه‌ار به ورق کفستون.^[۹]

جوشی تحت فشار کاملاً واضح است و نیازی به بررسی و ارزیابی مقاومت اتصال جوشی تحت فشار نیست. اما در اتصال جوشی تحت نیروی کششی، ممکن است خرابی یا کاهش مقاومت در اتصال یا میل‌مه‌ار رخ دهد و میل‌مه‌ار کششی به دلیل اثر پواسون از بدنه‌ی بتن جدا شود. بنابراین، بین اجزاء اتصال کفستون پیشنهادی، اتصال‌های جوشی میل‌مه‌ار به ورق تحت نیروی کششی، رفتار و پاسخ ناشناخته‌یی دارند.

بنابراین هدف اصلی از پژوهش حاضر، بررسی رفتار ناشناخته و مقاومت اتصال‌های جوشی تحت کشش است. جهت بررسی و ارزیابی مقاومت اتصال‌های جوشی، از اتصال T- شکل، که متشکل از بخشی از میل‌مه‌ار، اتصال جوشی، ورق کفستون، و بال ستون است، استفاده شده است. منظور از اتصال T- شکل، اتصال عمودی میل‌مه‌ار بر ورق فولادی توسط اتصال‌های جوشی به همراه بال ستون است. بنابراین، جهت درک بهتر و واضح رفتار اتصال جوشی میل‌مه‌ار به ورق کفستون، باید قسمتی از اتصال کفستون را جدا و تحت نیروی کششی بررسی کرد. آیین‌نامه‌ی Eurocode ۳^[۸] استفاده از روش جزء را برای تبدیل اتصال کفستون مطابق با شکل ۳، به جزء‌های کوچک‌تر تحت بارگذاری‌ها و موقعیت‌های مختلف پیشنهاد می‌دهد. در روش جزء ۱، هر کدام از اجزاء، نقش مهمی در تأمین مقاومت و سختی اتصال دارند. برای ستون‌های پیشنهادی با اتصال‌های میل‌مه‌ارهای جوشی تحت لنگر خمشی، دو نوع جزء T- شکل از سمت فشاری اتصال کفستون و دیگری از سمت کششی اتصال کفستون حاصل می‌شوند. جزء کششی T- شکل، متشکل از میل‌مه‌ار کششی، اتصال جوشی تحت کشش، ورق کفستون، و بال ستون است و همچنین جزء فشاری T- شکل، متشکل از میل‌مه‌ار فشاری، اتصال جوشی تحت فشار، ورق کفستون، و بال ستون است.

براساس پژوهش انجام‌شده توسط وکیلی صادقی^۲ (۲۰۲۲) و همکاران، به دلیل محصورشدن میل‌مه‌ار در بتن و عدم کمانش آن، جزء T- شکل کششی بحرانی‌تر از جزء T- شکل فشاری است.^[۹] لذا به دلیل مشخص بودن رفتار و پاسخ اتصال‌های جوشی تحت فشار، از انجام آزمایش روی اتصال‌های جوشی تحت فشار صرف‌نظر شده است. همچنین، بررسی‌های دقیق عددی و آزمایشگاهی رفتار کلی اتصال کفستون پیشنهادی به همراه اتصال‌های جوشی در مقیاس واقعی، خارج از بحث پژوهش حاضر است.



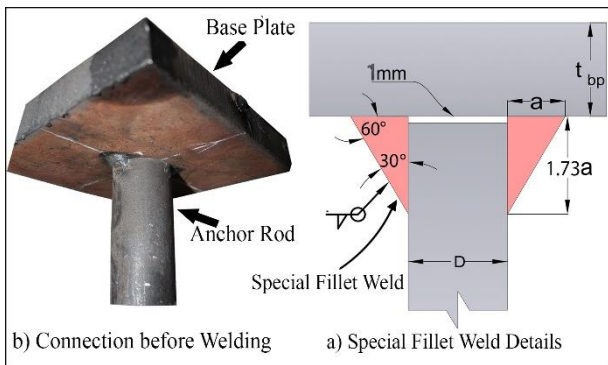
شکل ۳. اتصال کفستون و قسمت جزء کششی T- شکل.

^۳ Björk

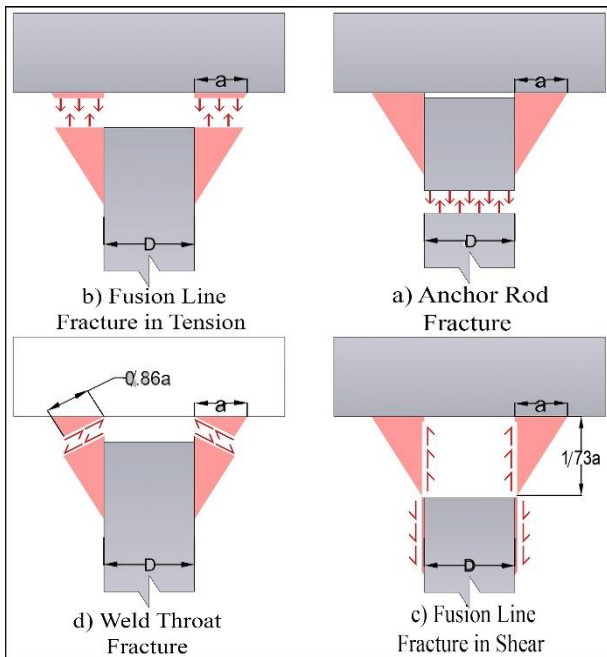
^۴ Barzegar

^۱ Component Method

^۲ Vakili Sadeghi



شکل ۵. اتصال جوش گوشه‌ی ویژه.



شکل ۶. مدهای گسیختگی جوش گوشه‌ی ویژه تحت بارگذاری کششی.

میلی‌متری منجر به کاهش بُعد گلوگاه مؤثر جوش می‌شود. جهت اصلاح نیز ابعاد جوش گوشه به اندازه‌ی کافی افزایش داده شده است. جوش گوشه‌ی ویژه به صورت دورانی به دور سطح میل‌مهار جوشکاری شده و مطابق با شکل (۵-ب)، میل‌مهار بر ورق کفستون عمود بوده است.

برای ارزیابی مقاومت کششی اتصال جوش گوشه‌ی ویژه، از معیارهای طراحی براساس مدهای گسیختگی نشان داده شده در شکل ۶ استفاده شده است. طراحی ابعاد جوش گوشه‌ی ویژه براساس بیشینه‌ی نیروی گسیختگی کششی میل‌مهاری انجام شد و بقیه‌ی اجزاء اتصال از قبیل ورق بال ستون و ورق کفستون در فرایند طراحی، کسان در نظر گرفته شدند تا میل‌مهار به حد گسیختگی برسد. به عبارت دیگر، طراحی کل اتصال جزء کششی توسط شکست میل‌مهار کنترل شده است. براساس آیین‌نامه‌ی ACI-۳۱۸^[۲۲] و مطابق با شکل (۶-الف)، T_u بیشینه‌ی ظرفیت کششی میل‌مهار حاصل از مد گسیختگی اول (شکست میل‌مهار) مطابق رابطه‌ی ۱ در نظر گرفته شده است؛ که در آن، A_s ، سطح مقطع میل‌مهار و f_u ، بیشینه‌ی مقاومت کششی میل‌مهار

سردشوندگی آن تأثیر زیادی دارد. به عبارت دیگر، با کاهش مقدار ضخامت ورق کفستون، نرخ سردشوندگی ورق افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت سرد شدن ورق فولادی، تنش‌های پسماند بیشتری حین سرد شدن محل جوشکاری شده در ورق کفستون باقی می‌مانند. بنابراین، برای کنترل نرخ سردشوندگی، کمینه‌ی ضخامت ورق کفستون برابر با اندازه‌ی قطر میل‌مهار مصرفی زیر ورق توصیه شده است.^[۱۶ و ۱۷] همچنین تاجیک^۱ و همکاران (۲۰۲۴) توصیه کردند جهت جلوگیری از ایجاد آثار مخرب حرارت در ناحیه‌ی HAZ، عملیات‌های پیش گرمایش و پس گرمایش، بعد و قبل از جوشکاری فلزات انجام شوند.^[۱۸]

طبق پژوهش‌های کامتکار^۲ (۱۹۸۲) و نی و دانگ^۳ (۲۰۱۲)، جوش‌های دو ساق نامساوی با زاویه‌ی ۳۰-۶۰ درجه، بیشینه‌ی ظرفیت کششی نسبت به جوش‌های استاندارد دو ساق مساوی با حجم جوش یکسان دارند.^[۱۹ و ۲۰]

در پژوهش حاضر، براساس معیارهای طراحی و ضوابط آیین‌نامه‌ی، جزئیات هندسی دقیق‌تری برای هر یک از اتصال‌های جوشی مشخص شده است. سپس به بررسی مقاومت و مقایسه‌ی انواع اتصال‌های جوشی بین میل‌مهار و ورق کفستون در شرایط مختلف و اولویت‌بندی، تحت نیروی کششی پرداخته شده است. اتصال‌های T-شکل در نمونه‌های آزمایشگاهی، تحت آزمون‌های کشش مستقیم قرار گرفتند و در انتها، نمودار نیرو-جابجایی و میدان کرنش هر یک از اتصال‌های جوشی و میل‌مهاری توسط روش همبستگی تصاویر دیجیتال حاصل شدند. همچنین در هر یک از نمونه‌ها به بررسی شکست‌های محتمل تُردگونه در نواحی جوشکاری شده نیز پرداخته شده است.

۲. معرفی اتصال‌های جوشی میل‌مهاری

۱.۲. جوش گوشه‌ی ویژه

جوش گوشه به عنوان جوشی که سهولت در اجرا و هزینه‌ی ساخت معقول دارد، به فراوانی در ساخت‌وساز به کار می‌رود. جوش‌های استاندارد از لحاظ تئوری هندسی، دو ساق مساوی دارند. خطا در اجرای دقیق ابعاد جوش گوشه در حین جوشکاری، باعث تغییر در اندازه‌ی گلوئی مؤثر جوش و به تبع آن منجر به تغییر در ظرفیت مقاومتی جوش گوشه می‌شود. همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، امکان استفاده از جوش‌های دو ساق نامساوی با زاویه‌ی ۳۰-۶۰ درجه برای افزایش مقاومت اتصال جوش گوشه وجود دارد. بنابراین، در پژوهش حاضر از هندسه‌ی مقطع جوش گوشه با زاویه‌ی ۳۰-۶۰ درجه با ساق‌های نامساوی با نام جوش گوشه‌ی ویژه به جای هندسه‌ی مقطع جوش گوشه‌ی استاندارد با زاویه‌ی ۴۵ درجه استفاده شده است. در جوش گوشه‌ی ویژه، به دلیل کمتر شدن فاصله بین مرکز سطح مقطع جوش گوشه به سطح میل‌مهار، شرایط انتقال نیرو از سطح جانبی میل‌مهار به ورق کفستون به صورت تدریجی‌تر نسبت به حالت جوش گوشه‌ی استاندارد مهیا می‌شود. جزئیات هندسی جوش گوشه‌ی ویژه و اجزاء اتصال قبل از جوشکاری به ترتیب در شکل ۵ (الف و ب) مشاهده می‌شوند.

مطابق با شکل (۵-الف)، جهت نفوذ بهتر فلز جوش در ریشه‌ی جوش گوشه، طبق ضوابط آیین‌نامه‌ی AWS-D۱.۴^[۲۱] به اندازه‌ی یک میلی‌متر فاصله بین میل‌مهار و ورق کفستون در نظر گرفته شده است. ایجاد فاصله‌ی یک

^۳ Nie & Dong

^۱ Tajik

^۲ Kamtekar

به‌صورت تنش‌های عمودی و عرضی نسبت به صفحه‌ی گلوگاه مؤثر جوش و تنش‌های موازی و عرضی نسبت به محور طولی جوش تجزیه می‌شود. مطابق با آیین‌نامه‌ی Eurocode ۳^[۸]، طراحی ابعاد جوش گوشه براساس رابطه‌های ۴ و ۵ تعیین می‌شود.

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{1/2} \leq f_u / (\beta_w \times \gamma_{M2}) \quad (4)$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0.9(f_u / \gamma_{M2}) \quad (5)$$

که در آن‌ها، σ_{\perp} ، تنش نرمال عمود بر سطح گلوئی مؤثر جوش و τ_{\perp} تنش برشی مماس بر سطح گلوئی مؤثر جوش و عمود بر محور طولی جوش هستند. همچنین، σ_{\parallel} معرف تنش نرمال عمود بر مقطع جوش و موازی با محور طولی جوش و τ_{\parallel} معرف تنش برشی مماس بر گلوئی مؤثر جوش و موازی با محور طولی جوش هستند. f_u نیز بیشینه‌ی مقاومت کششی عضو ضعیف‌تر اتصال، β_w ضریب همبستگی برابر با ۱، و γ_{M2} ضریب ایمنی برابر با ۱/۲۵ در نظر گرفته شده‌اند.

برای طراحی محافظه‌کارانه‌ی ابعاد جوش گوشه‌ی ویژه، از روابط آیین‌نامه‌ی Eurocode ۳ در پژوهش حاضر استفاده شده است. مطابق با شکل (۷-ب)، به‌دلیل اینکه جوش‌های گوشه به‌صورت دورانی و متقارن به دور میل‌مه‌ار جوشکاری می‌شوند و نیروی کششی از میل‌مه‌ار به جوش به صورت نیروی محیطی سطحی متقارن $T_u / \pi D$ منتقل می‌شود، از مقادیر σ_{\perp} و τ_{\perp} صرف‌نظر شده است. مطابق با شکل (۷-ج) و با استفاده از معادلات تعادل استاتیکی، مقادیر σ_{\perp} و τ_{\perp} مطابق روابط ۶ و ۷ تعیین می‌شوند.

$$\sigma_{\perp} = \frac{(\frac{T_u}{\pi D}) \sin(\epsilon_0)}{a \times \sin(\epsilon_0)} = \frac{T_u}{a \times \pi \times D} \quad (6)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{(\frac{T_u}{\pi D}) \cos(\epsilon_0)}{a \times \sin(\epsilon_0)} = \frac{T_u}{a \times \pi \times D \times \sqrt{3}} \quad (7)$$

با جای‌گذاری روابط ۶ و ۷ در روابط ۴ و ۵، ظرفیت مقاومتی جوش گوشه‌ی ویژه مرتبط با مد گسیختگی چهارم براساس روابط ۸ و ۹ تعیین می‌شود.

$$T_u \leq \frac{f_u \times D \times a \times \pi}{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{2}} \quad (8)$$

$$T_u \leq 0.9 \frac{f_u \times D \times a \times \pi}{\gamma_{M2}} \quad (9)$$

به‌دلیل وجود فاصله بین مرکز سطح مقطع جوش گوشه تا بدنه‌ی میل‌مه‌ار، انتقال نیروی کششی به همراه خروج از مرکزیت است. بنابراین، آیین‌نامه‌ها جوش‌های شیاری با نفوذ کامل را به‌دلیل انتقال نیرو بدون خروج از مرکزیت پیشنهاد می‌دهند، که در بخش ۲.۲ توضیحات مرتبط ارائه شده است.

۲.۲ جوش شیاری با نفوذ کامل

جوش‌های شیاری، یکی دیگر از انواع جوش‌ها هستند، که در ساخت اتصال‌های مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود. جوش شیاری با نفوذ کامل، نیروی کششی میل‌مه‌ار را بدون خروج از مرکزیت انتقال می‌دهد و باید آماده‌سازی‌هایی از

هستند. انتظار می‌رود مد گسیختگی اول (شکست میل‌مه‌ار)، حاکم بر طراحی اتصال باشد.

$$T_u = A_s F_{ur} \quad (1)$$

مد گسیختگی دوم مرتبط با شکست کششی بین فلز جوش و ورق کف‌ستون در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود و مقاومت کششی حاصل از مد گسیختگی دوم مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود. ضریب کاهش مقاومت (ϕ) در رابطه‌ی ۲ برابر با ۰/۷۵ است.

$$T_u \leq \phi \sigma_w = \phi \times ((\pi(D+2a)^2 - \pi D^2) / 4) \times (F_{uw}) \quad (2)$$

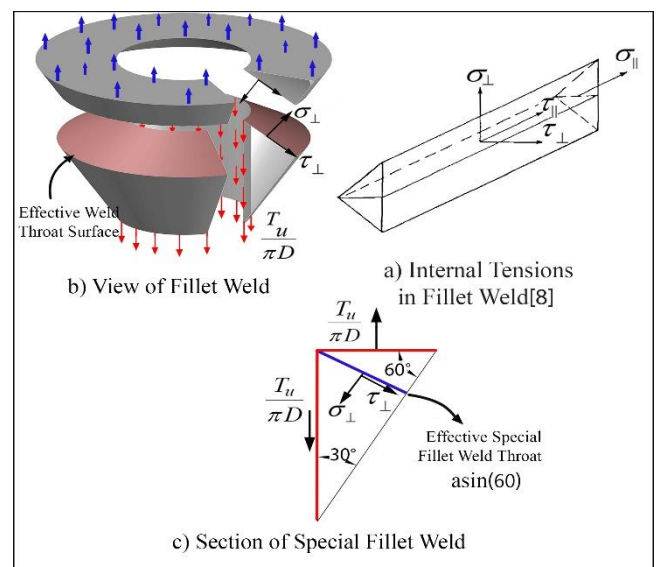
که در آن، σ_w بیشینه‌ی ظرفیت کششی جوش در مد گسیختگی دوم، D قطر میل‌مه‌ار، F_{uw} بیشینه‌ی ظرفیت کششی فلز جوش، و a بُعد افقی جوش گوشه‌ی ویژه مطابق با شکل (۵-الف) است. مقدار ظرفیت کششی جوش باید از مقدار ظرفیت نهایی میل‌مه‌ار بیشتر باشد، تا شکست میل‌مه‌ار حاکم بر طرح باشد.

مد گسیختگی سوم، مرتبط با شکست برشی جوش بین بدنه‌ی بیرونی میل‌مه‌ار و جوش در شکل (۶-ج) مشاهده می‌شود. ظرفیت برشی مرتبط با مد گسیختگی سوم براساس رابطه‌ی ۳ تعیین و ضریب کاهش مقاومت در رابطه‌ی مذکور، برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است. همچنین، τ_w بیشینه‌ی ظرفیت برشی جوش در مد گسیختگی سوم است.

$$T_u \leq \phi \tau_w = \phi \times ((1/\sqrt{3}) \pi D \times (0.6 F_{uw})) \quad (3)$$

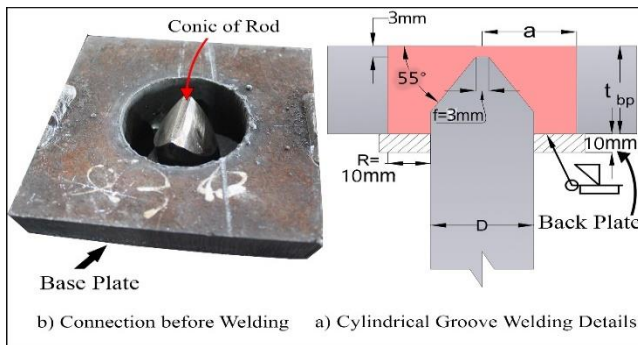
مد گسیختگی چهارم، نیز مرتبط با شکست گلوئی مؤثر جوش گوشه مطابق با شکل (۶-د) است.

در آیین‌نامه‌های AISC-۳۶۰^[۱۰] و AWS-D۱.۱^[۲۳]، نیروی اعمالی به جوش گوشه‌ی استاندارد، به‌صورت برش خالص بر سطح گلوئی مؤثر جوش در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل (۷-الف) و براساس آیین‌نامه‌ی Eurocode ۳^[۸]، نیروی اعمالی به جوش گوشه با استفاده از روش جهتی^۱،

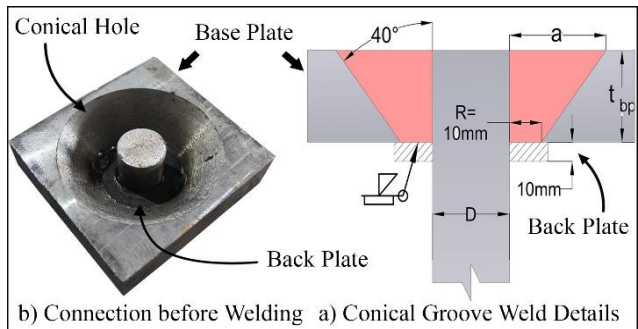


شکل ۷. جزئیات هندسی و تنش‌های داخلی جوش گوشه‌ی ویژه.

^۱ Directional Method



شکل ۹. اتصال جوش شیاری استوانه‌یی.

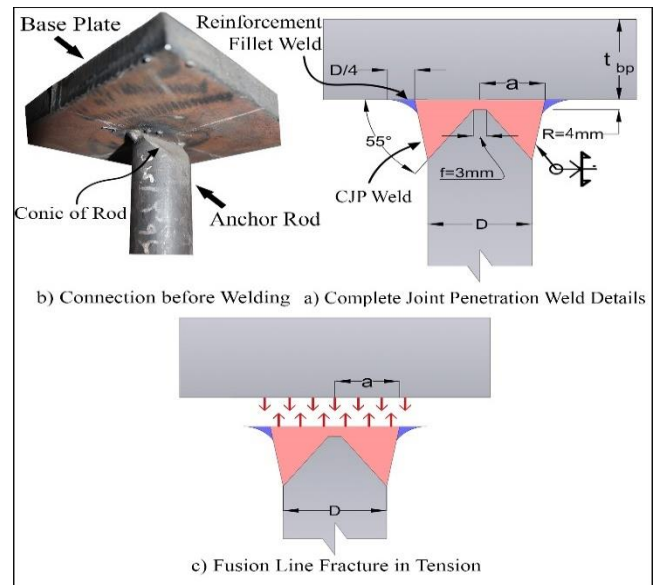


شکل ۱۰. اتصال جوش شیاری مخروطی.

مطابق با آیین‌نامه‌ی AWS-D1.1 و دستورالعمل جوش‌های شیاری با نفوذ کامل، مقدار دهانه‌ی ریشه (R) برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین برای جلوگیری از ریزش فلز مذاب جوش از ناحیه‌ی پایینی ورق کفستون و ایجاد شرایط بهتر برای نفوذ کافی جوش، از ورق‌های پشت‌بند هم‌جنس با ورق کفستون به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در زیر ورق کفستون استفاده شده است. جهت ایجاد دسترسی کافی برای جوشکاری فضای خالی و نفوذ کامل جوش، توصیه می‌شود از جوش شیاری استوانه‌یی برای ورق‌های با ضخامت کم، با در نظر گرفتن بیشینه‌ی زاویه‌ی ۵۵ درجه برای کونیک‌کردن میل‌مهاریها استفاده شود. مطابق با شکل (۹-الف)، مقطع جوش شیاری استوانه‌یی مشابه با جوش شیاری نیم‌جناغی است، که حول محور مرکزی میل‌مهاری دوران داشته است. با در نظر گرفتن مقدار دهانه‌ی ریشه‌ی جوش به اندازه‌ی ۱۰ میلی‌متر و به دلیل قرار گرفتن میل‌مهاری زیر ناحیه‌ی بال ستون، احتمال گسیختگی برشی فلز جوش بین جوش و بدنه‌ی ورق کفستون در داخل اتصال و گسیختگی برش پانچ بسیار کم است. طراحی اتصال اخیر، براساس ضوابط هندسی آیین‌نامه‌یی مخصوص جوش‌های شیاری انجام شده است و انتظار می‌رود شکست میل‌مهاری حاکم بر طرح باشد.

۴.۲. جوش شیاری مخروطی

در اتصال جوش شیاری مخروطی، نیاز به سوراخ‌کردن ورق‌های کفستون به صورت نیم‌مخروطی است. سپس میل‌مهاری مطابق با شکل ۱۰ (الف و ب) از ناحیه‌ی زیرین ورق کفستون در داخل سوراخ قرار می‌گیرد و از ناحیه‌ی بالای ورق کفستون، جوشکاری فضای خالی به صورت دورانی انجام می‌شود. برای دسترسی بهتر در اتصال جوش شیاری استوانه‌یی، میل‌مهاریها با زاویه‌ی مشخص کونیک می‌شوند؛ اما در اتصال جوش شیاری مخروطی، ورق‌های کفستون مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ی AWS-D1.1، با زاویه‌ی ۴۰ درجه به وسیله‌ی دستگاه برش CNC با مته‌ی مخصوص نیم‌مخروطی شکل سوراخ می‌شوند. با توجه به شکل (۱۰-الف)، مقطع جوش شیاری مخروطی شبیه



شکل ۸. اتصال جوش شیاری با نفوذ کامل.

قبیل کونیک‌دار کردن میل‌مهاریها برای اتصال جوش شیاری انجام شود. مطابق با شکل (۸-الف) و براساس آیین‌نامه‌ی AWS-D1.1^[۲۳]، جهت ایجاد نفوذ کامل در جوش شیاری، دو طرف نوک میل‌مهاری با زاویه‌ی ۵۵ درجه کونیک‌دار شدند. جزئیات هندسی و پیکربندی کلی اتصال قبل از جوشکاری به ترتیب در شکل ۸ (الف و ب) مشاهده می‌شوند. مقادیر دهانه‌ی ریشه‌ی جوش (R) و پیشانی ریشه‌ی جوش (f) براساس آیین‌نامه‌ی AWS-D1.1، به ترتیب برابر با ۴ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. همچنین الکتروود مصرفی در اتصال مذکور باید سازگار با فلز پایه (ورق کفستون) باشد.

مد گسیختگی مرتبط به شکست کششی جوش از سطح ورق کفستون، در شکل (۸-ج) مشاهده می‌شود. طراحی بعد افقی جوش شیاری (a) براساس ظرفیت کششی جوش طبق رابطه‌ی ۱۰ انجام شده و ضریب کاهش مقاومت در رابطه‌ی مذکور ۰/۷۵ بوده است. مقدار ظرفیت کششی جوش باید از مقدار ظرفیت نهایی میل‌مهاری بیشتر باشد، تا شکست میل‌مهاری حاکم بر طرح شود.

$$T_u \leq \phi \sigma_{wg} = \phi \times \pi a^2 \times (F_{uw}) \quad (10)$$

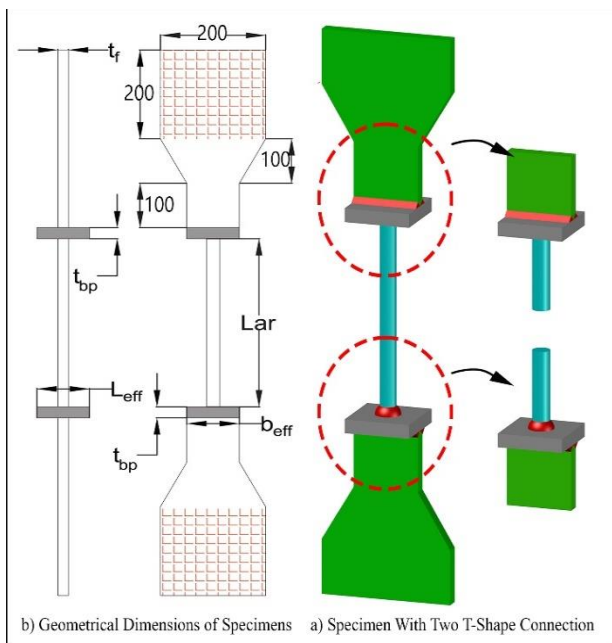
که در آن، σ_{wg} بیانگر بیشینه‌ی ظرفیت کششی جوش شیاری با نفوذ کامل مربوط به مد گسیختگی شکل (۸-ج) است. همچنین برای کاهش تمرکز تنش در محل اتصال جوش شیاری به ورق و جلوگیری از ایجاد پدیده‌ی خستگی تحت بارگذاری‌های لرزه‌یی، در آیین‌نامه‌ی AISC-۳۶۰ استفاده از جوش گوشه‌ی تقویتی به اندازه‌ی یک‌چهارم قطر میل‌مهاری توصیه شده است.

۳.۲. جوش شیاری استوانه‌یی

در اجرای اتصال جوش شیاری استوانه‌یی، بعد از انجام عملیات سوراخ‌کاری در ورق، جوشکاری میل‌مهاری به ورق آغاز می‌شود. مطابق با شکل ۹ (الف و ب)، یک سوراخ استوانه‌یی بزرگ‌تر از قطر میل‌مهاری در ورق کفستون ایجاد و سپس بر انتهای میل‌مهاری، کونیک دو طرفه‌ی ۵۵ درجه با دستگاه برش زده می‌شود. با قراردادن قسمت کونیک‌شده‌ی میل‌مهاری در داخل سوراخ از ناحیه‌ی زیرین ورق کفستون، جوشکاری فضای خالی بین میل‌مهاری و ورق کفستون از ناحیه‌ی بالای ورق کفستون انجام می‌شود. علت کونیک‌دار کردن میل‌مهاریها، دسترسی بهتر جوشکار برای جوشکاری کل فضای خالی و نفوذ بهتر فلز جوش است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح.

میل‌مهاری	D (mm)	F_y (Mpa)	F_u (Mpa)	ϵ_u
CK۴۵	۲۵	۴۰۶	۶۵۷	٪۲۵/۵
CK۶۰	۲۵	۵۰۸	۹۴۶	٪۱۳
ورق بال‌ستون	t (mm)	F_y (Mpa)	F_u (Mpa)	ϵ_u
St۵۲	۲۰	۳۶۷	۵۶۴	٪۲۶



شکل ۱۱. نمای روبه‌رو و جانبی نمونه‌ی آزمایشگاهی.

کفستون از الکتروود نوع E۸۰۱۸ با مقاومت کششی نهایی ۵۵۲ مگاپاسکال برای جوشکاری اتصال‌های جوشی استفاده شده است.

۲.۳. طراحی و مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی طوری ساخته شده‌اند که در هر نمونه، دو جزء کششی T- شکل بدون خروج از مرکزیت میل‌مهاری نسبت به بال‌ستون به همراه اتصال‌های جوشی متفاوت مطابق با شکل (۱۱-الف) قرار گرفته باشند. تعداد ۲ نمونه با میل‌مهاری CK۴۵ و ۳ نمونه با میل‌مهاری پرمقاومت CK۶۰ جهت ارزیابی مقاومت، مقایسه‌ی انواع اتصال‌های جوشی، و نوع شکست میل‌مهاری ساخته شدند و تحت آزمایش‌های کشش مستقیم قرار گرفتند. برای صرفه‌جویی در مصرف تعداد بالای میل‌مهاری CK۴۵ برای ستون‌هایی با ظرفیت نیرویی بالاتر، استفاده از میل‌مهاری پرمقاومت CK۶۰ در اتصال‌های کفستون بررسی شده به همراه اتصال‌های جوشی پیشنهاد شده است.

جهت ایجاد فضای کافی برای شکل‌پذیری و باریک‌شدگی^۱ میل‌مهاری، میل‌مهاری با طول ۴۰ سانتی‌متر در هر نمونه استفاده شدند. براساس هندسه‌ی جزء کششی T- شکل و آیین‌نامه‌ی ACI-۳۱۸^[۲۲] مقدار عرض و طول مؤثر برای ورق کفستون جزء کششی، چهار برابر قطر میل‌مهاری مصرفی در هر نمونه در نظر گرفته شده است؛ که این مقدار، کمینه‌ی فاصله‌ی مجاز

به جوش شیاری نیم‌جناغی است، که حول محور مرکزی میل‌مهاری دوران داشته است. مطابق با آیین‌نامه‌ی AWS-D۱.۱، مقدار دهانه‌ی ریشه‌ی جوش (R) و جزئیات هندسی اتصال در شکل (۱۰-الف) مشاهده می‌شود. اندازه‌ی بُعد a

برای جوش شیاری مخروطی به ضخامت ورق کفستون و اندازه‌ی دهانه‌ی ریشه‌ی جوش شیاری بستگی دارد. در اتصال ذکرشده نیز همانند اتصال شیاری استوانه‌یی، برای جلوگیری از ریزش فلز مذاب جوش از ورق‌های پشت‌بند با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. مطابق با شکل (۱۰-الف)، با افزایش ضخامت ورق کفستون، اندازه‌ی بُعد افقی a، حجم فلز جوش استفاده‌شده افزایش یافته است. طراحی جوش شیاری مخروطی نیز براساس ضوابط آیین‌نامه‌ی AWS-D۱.۱ انجام شده است. انتظار می‌رود حالت شکست میل‌مهاری حاکم بر طرح باشد و همچنین در مورد جزئیات این نوع اتصال‌ها در آیین‌نامه‌های طراحی جوش، جزئیاتی ارائه نشده و هدف از پژوهش حاضر، طراحی اتصال‌ها براساس ضوابط آیین‌نامه و مدهای گسیختگی بوده است.

به‌دلیل قرار گرفتن میل‌مهاری زیر ناحیه‌ی بال‌ستون، نیروی کششی مستقیماً از میل‌مهاری به بال‌ستون منتقل می‌شود و ورق کفستون به عنوان عضو رابط عمل می‌کند. در اتصال‌های جوش گوشه‌ی ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل، که نیازی به سوراخ‌کاری ورق کفستون نیست، نیروی محوری در جهت عمود بر صفحه‌ی ورق کفستون به بال‌ستون منتقل می‌شود. در این حالت، امکان لایه‌لایه‌شدن و پارگی در ورق کفستون (مخصوصاً ورق‌های ضخیم) به‌دلیل احتمال وجود ناپیوستگی در ساختار ورق فولادی نوردشده و خطا در نوردکاری وجود دارد. بنابراین پارگی و لایه‌لایه‌شدن ورق کفستون در عملکرد انتقال نیرو در جهت ضخامت ورق تأثیر دارد،^[۲۴] و برای جلوگیری از این حالت، باید با دستگاه اولتراسونیک از عدم وجود ناپیوستگی در ورق فولادی اطمینان حاصل کرد. در اتصال‌های جوش شیاری استوانه‌یی و جوش شیاری مخروطی، به‌دلیل وجود فرآیند سوراخ‌کاری و پُرشدن سوراخ با فلز جوش، احتمال لایه‌لایه‌شدن ورق کفستون وجود ندارد و نیروی محوری مستقیماً از میل‌مهاری به فلز جوش و سپس به بال‌ستون منتقل می‌شود. هزینه و حجم جوشکاری اتصال‌های جوش شیاری مخروطی و جوش شیاری استوانه‌یی از دیگر اتصال‌ها بسیار بیشتر است.

۳. توضیحات فرآیند آزمایشگاهی

۱.۳. مشخصات مکانیکی مصالح استفاده‌شده

نتایج آزمون‌های کشش جهت تعیین مشخصات مکانیکی قسمتی از مصالح میلگرد CK۴۵ و CK۶۰ با قطر ۲۵ میلی‌متر و ورق‌های فولادی St۵۲ نوردشده با ضخامت ۲۰ میلی‌متر در جدول ۱ ارائه شده‌اند. متناسب با فلز ورق

^۱ Necking

جدول ۲. ابعاد هندسی نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر.

نمونه	نوع میلگرد	D	L _r	t _{bp}	B _{eff}	L _{eff}	t _f
C1-۲۵	CK۴۵	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
C۲-۲۵	CK۴۵	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
D1	CK۶۰	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
D۲	CK۶۰	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
D۳	CK۶۰	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰

جدول ۳. ابعاد هندسی اتصال‌های جوشی (بر حسب میلی‌متر).

اتصال جوشی	معیار حاکم	بعد طراحی شده‌ی a
		D۲۵ - CK۴۵ t _{bp} =۲۵mm
جوش گوشه‌ی ویژه	رابطه‌ی ۸	۱۵
جوش شیاری با نفوذ کامل	رابطه‌ی ۱۰	۱۶
جوش شیاری استوانه‌یی	R , D	۲۲/۵
جوش شیاری مخروطی	R , t _{bp}	۳۱

برای نمونه‌های حاوی میل‌مه‌ار CK۶۰ استفاده شده است. به عبارت دیگر، طراحی ابعاد اتصال‌های جوشی میل‌مه‌ارها در نمونه‌های D1، D۲، و D۳ براساس نیروی گسیختگی میل‌مه‌ار CK۶۰ نبوده و از ابعاد ارائه شده در جدول ۳ برای اتصال‌های جوشی نمونه‌های اخیر استفاده شده است. به عبارت دیگر، بدون تغییر در ابعاد اتصال‌های جوشی، مقاومت میل‌مه‌ار مصرفی افزایش یافته است، تا عملکرد هر اتصال در این حالت سنجیده شود.

برای طراحی ابعاد جوش گوشه‌ی ویژه، در ابتدا مقدار نیروی گسیختگی میل‌مه‌ارهای CK۴۵ به عنوان بیشترین نیروی کششی اعمالی به اتصال‌های جوشی، طبق رابطه‌ی ۱ محاسبه شد و با استفاده از روابط ۲، ۳، ۸، و ۹، مقدار بیشینه‌ی بعد افقی a برای جوش گوشه‌ی ویژه تعیین شد. برای طراحی ابعاد جوش شیاری با نفوذ کامل نیز با استفاده از رابطه‌ی ۱۰، مقدار بعد افقی a مخصوص جوش شیاری با نفوذ کامل تعیین شده است. برای طراحی جوش شیاری استوانه‌یی و جوش شیاری مخروطی، مقدار دهانه‌ی ریشه‌ی جوش برابر با ۱۰ میلی‌متر و بقیه‌ی ابعاد براساس ضوابط آیین‌نامه‌ی AWS-D1.۱ تعیین شده‌اند. در طراحی جوش شیاری مخروطی، مقدار ضخامت ورق‌های کف‌ستون و ریشه‌ی جوش ملاک طراحی هستند و با توجه به ضخامت ۲۵ میلی‌متری ورق کف‌ستون، مقدار بعد a برای اتصال جوشی شیاری مخروطی تعیین شده است. در جدول ۳، مقادیر طراحی شده‌ی بعد a برای هر اتصال جوشی مشخص شده است.

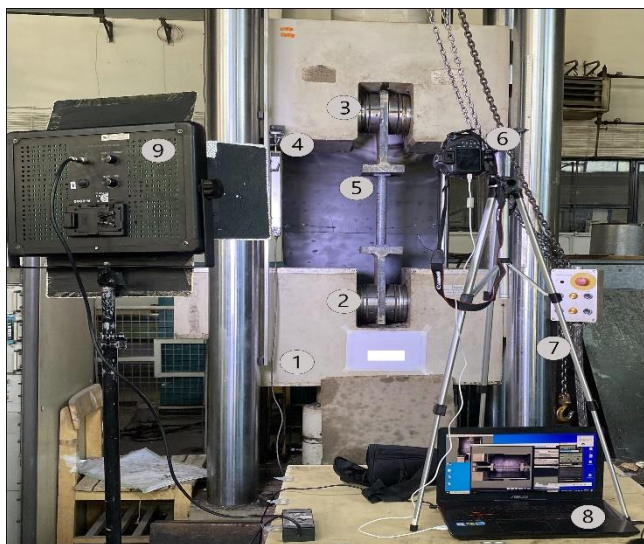
در جوشکاری اتصال‌ها، از روش جوشکاری قوسی با گاز محافظ (GMAW)^۱ استفاده شده است؛ که در آن، با استفاده از قوسی که بین فلز پُرکننده‌ی مصرف‌شده‌ی (فیلمر) و حوضچه‌ی جوش به وجود می‌آید، فیلمر ذوب و اتصال قطعات برقرار می‌شود و برای ایجاد قوس، از گاز دی‌اکسیدکربن استفاده شده

آیین‌نامه‌ی میل‌مه‌ارها از یکدیگر در فونداسیون بتنی است. ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (۱۱-ب) براساس ضوابط تعیین شده برای هر اتصال جوشی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

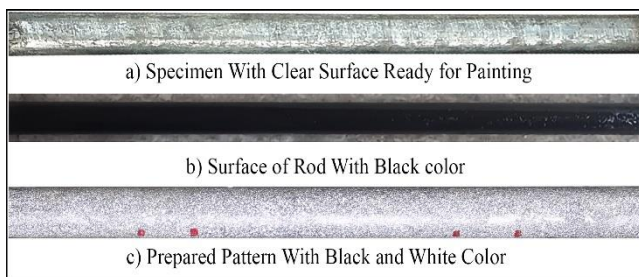
طبق فرضیات طراحی، ورق‌های بال‌ستون و کف‌ستون در حین بارگذاری باید کشان باقی بمانند. به همین دلیل، براساس نیروی گسیختگی میل‌مه‌ار، مقدار ضخامت ورق بال‌ستون در نمونه‌های آزمایشگاهی برابر با ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین قسمتی از عرض ورق بال‌ستون در محل قرارگرفتن فک‌های دستگاه کشش افزایش یافت، تا لغزشی بین فک و سطح ورق بال‌ستون ایجاد نشود.

در نمونه‌ی C1-۲۵، اتصال T- شکل اول با جوش گوشه‌ی ویژه و اتصال T- شکل دوم با جوش شیاری با نفوذ کامل بوده است. در نمونه‌ی C۲-۲۵، دو اتصال جوش شیاری مخروطی و جوش شیاری استوانه‌یی با ابعاد تعیین شده مرتبط با میل‌مه‌ارهای مشخص وجود دارند. در نمونه‌ی D1، جوش گوشه‌ی ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل؛ در نمونه‌ی D۲، جوش گوشه‌ی ویژه و جوش شیاری مخروطی؛ و در نمونه‌ی D۳، جوش گوشه‌ی ویژه و جوش شیاری استوانه‌یی استفاده شده‌اند. استفاده از دو اتصال جوشی مختلف در یک نمونه‌ی آزمایشگاهی، به دلیل انجام آزمون کشش برای دو اتصال جوشی به صورت هم‌زمان جهت مقایسه بین آن‌ها در نیرویی برابر بوده است. البته، در بیشتر نمونه‌های آزمایشگاهی به دلیل پُرکاربرد بودن جوش گوشه‌ی ویژه از آن استفاده شده است. برای جلوگیری از مصرف میل‌مه‌ارهای شکل‌پذیر با قطر بزرگ‌تر یا تعداد بیشتر و صرفه‌جویی در مصرف فلز جوش، استفاده از میل‌مه‌ارهای پُر مقاومت برای ستون‌های با ظرفیت بالاتر پیشنهاد شده است. بنابراین، از ابعاد اتصال‌های جوشی طراحی شده‌ی مخصوص میل‌مه‌ار CK۴۵،

^۱ Gas Metal Arc Welding



شکل ۱۲. محیط آزمایشگاه: (۱) دستگاه کشش، (۲) فک ثابت، (۳) فک متحرک، (۴) تغییرمکان سنج خطی، (۵) نمونه‌ی آزمایشگاهی، (۶) دوربین عکس‌برداری، (۷) سه پایه، (۸) لپ‌تاپ، (۹) نورپردازی.



شکل ۱۳. الگوی رنگی مخصوص روش همبستگی تصاویر دیجیتال.

به‌دست‌آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و انجام فرایند تحلیل در نرم‌افزار GOM-Correlate^[۲۸] نمودار نیرو-جابجایی و میدان کرنش سطح میل‌مهار از این روش نوین تهیه شد. در مرحله‌ی فرآیند تحلیل در نرم‌افزار GOM-Correlate، اندازه‌ی وجهی^۵ و فاصله‌ی نقطه‌یی از هم به ترتیب ۲۱ و ۱۶ پیکسل در نظر گرفته شد و در انتهای تحلیل نیز میدان کرنش همگی نمونه‌ها به‌صورت کانتورهای رنگی نشان داده شدند. از کانتورهای رنگی میدان کرنش جهت تشخیص نوع شکست شکل‌پذیر یا تردگونه‌ی میل‌مهارها، وضعیت باریک‌شدگی میل‌مهار قبل از شکست و وضعیت کشسان باقی‌ماندن اتصال‌های جوشی استفاده شده است.

نمونه‌ها، تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند و در نمونه‌های دارای میل‌مهارهای CK۶۰، که شکست میل‌مهار در هر نمونه در ناحیه‌ی HAZ نزدیک به اتصال‌های جوشی رخ داده بود، در دو مرحله‌ی آزمون کشش مطابق با شکل ۱۴ (الف و ب) انجام شد. در نمونه‌های دارای میل‌مهار CK۶۰، آزمون مرحله‌ی دوم جهت تعیین ظرفیت مقاومتی اتصال جوشی به‌صورت تک انجام شد. به‌دلیل اینکه میل‌مهارهای پرمقاومت در حین شکست در مرحله‌ی اول، با توجه به میدان‌های کرنش، مقادیر کرنش بسیار کمی نسبت به کرنش

است. برای اتصال جوش بین میل‌مهارها و ورق کف‌ستون از الکتروود^۱ E۸۰۱۸ و برای اتصال جوش شیری با نفوذ کامل بین ورق کف‌ستون و بال ستون از الکتروود E۷۰۱۶ استفاده شده است. بعد از اتمام جوشکاری دستی، بازرسی‌های چشمی (VT)^۲ مطابق الزام‌های آیین‌نامه‌ی AWS-B۱.۱۰M^[۲۵]، انجام شده و نقیصی در بازرسی مشاهده نشده است.

۳.۳. راه‌اندازی^۳ آزمایشگاه و جمع‌آوری داده‌ها به روش همبستگی

تصاویر دیجیتال

برای آزمون کشش هر نمونه‌ی آزمایشگاهی، از دستگاه کشش مستقیم Schenck با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف آزمایش شده‌اند. نمونه‌های آزمایشگاهی توسط فک‌های نگهدارنده‌ی دستگاه کشش مستقیم مطابق با شکل ۱۲ نگه‌داشته شدند. دستگاه Schenck مجهز به وسیله‌ی اندازه‌گیری تغییرمکان سنج خطی (LVDT)^۴ بود، که به وسیله‌ی آن نمودار نیرو-جابجایی هر نمونه تهیه شد. در حین انجام آزمون‌ها با کمترین سرعت بارگذاری، از روش همبستگی تصاویر دیجیتال^[۲۶] و^[۲۷] برای بررسی میدان کرنش و جابجایی‌های هر نقطه از سطح میل‌مهار در هر لحظه از آزمایش کشش استفاده شد. با افزایش سرعت بارگذاری در ناحیه‌ی کشسان، هیچ تغییری در مشخصات مکانیکی مصالح و نتایج رخ نمی‌دهد؛ اما در ناحیه‌ی خمیری، به دلیل فراهم نبودن زمان جهت ایجاد شکل‌پذیری، تنش تسلیم و گسیختگی میل‌مهار افزایش می‌یابد.^[۲۸] لذا در پژوهش حاضر، تحلیل حساسیت به سرعت بارگذاری و اثر آن در نتایج اتصال‌های جوشی انجام نشده است. همچنین از افزایش سرعت بارگذاری به‌دلیل تعداد عکس‌برداری‌های زیاد متوالی و سنجش میدان کرنش در هر لحظه از آزمایش جلوگیری شده است. در روش مذکور از یک دوربین عکس‌برداری مدل CANON۱۲۰۰D با کیفیت ۱۸ مگاپیکسلی، که دارای لنز با فاصله‌ی کانونی ۱۸-۵۵ میلی‌متر بود، مطابق شکل ۱۲ استفاده شده است.

برای استفاده از روش مذکور، در ابتدا باید سطح میل‌مهار مطابق با شکل (۱۳-الف) عاری از هرگونه گرد و لکه باشد. سپس باید با اسپری مشکی رنگ روی سطح میل‌مهار را مطابق با شکل (۱۳-ب) به‌صورت کامل پوشاند و بعد از خشک شدن رنگ مشکی، اسپری رنگ سفید را با مقدار خیلی کم روی سطح مشکی، به صورت نقطه‌یی و با تراکم مناسب مطابق با شکل (۱۳-ج) پاشید. سپس کیفیت الگوی رنگی سیاه و سفید آماده‌شده، توسط نرم‌افزار GOM-Correlate^[۲۸] بررسی شد. همچنین به جهت تنظیم نور محیط و افزایش دقت عکس‌برداری از سطح الگوی رنگی، از یک پروژکتور نور مدل AVLK۵۷۶LED استفاده شده است.

برای جلوگیری از لرزش دوربین و حفظ ارتفاع آن، یک سه پایه به همراه دوربین در فاصله‌ی ۱ متری از نمونه‌ی آزمایشگاهی قرار گرفت و در حین آزمایش کشش، در هر ۱۵ ثانیه یک عکس از سطح الگوی رنگی میل‌مهار گرفته شد و اطلاعات عکس با یک کابل رابط به لپ‌تاپ جهت ذخیره‌ی اطلاعات عکس منتقل می‌شد. در انتها نیز با استفاده از مقدار نیروی مشخص‌شده در دستگاه کشش در هر لحظه از آزمایش و مقدار جابجایی

^۴ Linear Variable Differential Transformer

^۵ Facet size

^۱ Electrode Welding

^۲ Visual Testing

^۳ set up

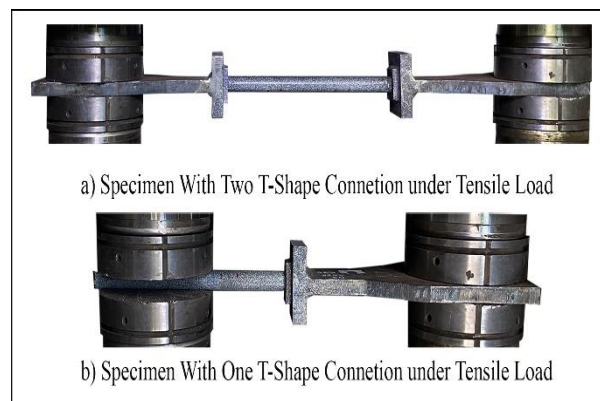
جدول ۴. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی.

نمونه	نوع میل مهار	نوع اتصال جوشی	بیشینه نیروی میل مهار (KN)	بیشینه کرنش میل مهار (%)	تغییر طول نهایی (mm)	نوع شکست	محل شکست
C25-1	CK45	جوش گوشه‌ی ویژه جوش شیاری با نفوذ کامل	۳۰۰	۵۵/۹۷	۶۴	شکل پذیر	وسط میل مهار - شکل (۱۵-ب)
C25-2	CK45	جوش نفوذی استوانه‌یی جوش شیاری مخروطی	۳۱۰	۲۵/۰۳	۶۳	شکل پذیر	وسط میل مهار - شکل (۱۵-ه)
D1	CK60	جوش گوشه‌ی ویژه جوش شیاری با نفوذ کامل	۳۰۰	۱/۴	۳	ترد	نزدیک به جوش شیاری با نفوذ کامل HAZ (شکل ۱۶-ب)
*D1	CK60	جوش گوشه‌ی ویژه	۴۷۰	۱۵/۱۴	۲۶	شکل پذیر	نزدیک به فک (شکل ۱۶-د)
D2	CK60	جوش گوشه‌ی ویژه جوش شیاری مخروطی	۳۱۰	۱/۳۴	۳	ترد	نزدیک به جوش گوشه‌ی ویژه HAZ (شکل ۱۷-ب)
*D2	CK60	جوش شیاری مخروطی	۴۴۰	۱۱/۵۲	۹/۸	ترد	نزدیک به جوش نفوذی مخروطی HAZ (شکل ۱۷-د)
D3	CK60	جوش گوشه‌ی ویژه جوش شیاری استوانه‌یی	۳۴۰	۲/۷۵	۳/۶	ترد	نزدیک به جوش گوشه‌ی ویژه HAZ (شکل ۱۸-ب)
*D3	CK60	جوش شیاری استوانه‌یی	۴۱۰	۸/۷۶	۴/۵	ترد	نزدیک به جوش نفوذی استوانه‌یی HAZ (شکل ۱۸-د)
* نیروی تسلیم و گسیختگی میل مهار مصرفی CK45 به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۳۲۲ کیلونیوتن هستند.							
* نیروی تسلیم و گسیختگی میل مهار مصرفی CK60 به ترتیب برابر با ۲۵۰ و ۴۵۶ کیلونیوتن هستند.							

شده است. نتایج هر آزمون آزمایشگاهی در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین نتایج نمودارهای نیرو-جابجایی به دست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال با نمودارهای نیرو-جابه جایی حاصل شده از دستگاه کشش، تقریباً مطابقت داشتند.

مقادیر کرنش قبل از شکست میل مهار و محل شکست میل مهار در نمونه‌های C25-1 و C25-2 به ترتیب در شکل‌های ۱۵ (الف، ب، د، و ه) نشان داده شده‌اند. به دلیل نمایان بودن اتصال‌های جوشی در نمونه‌ی C1-25 و مقادیر کرنش خیلی کم در جوش‌ها، نتیجه گرفته شد که تا آخرین لحظه از بارگذاری، اتصال‌های جوش گوشه‌ی ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل، کشسان باقی ماندند. بقیه‌ی اتصال‌های جوشی نمایان نبودند. به دلیل باریک‌شدگی همراه کرنش‌های زیاد، کرنش در محل شکست نمونه‌ی C1-25، مقدار بیشتری نسبت به کرنش در محل باریک‌شدگی نمونه‌ی C25-2 داشته است. براساس نیروی حین شکست میل مهارها در هر دو نمونه‌ی C1-25 و C25-2 مطابق با شکل‌های ۱۵ (ج و ی)، هر چهار نوع اتصال جوشی، توانایی تحمل نیروی گسیختگی میل مهارهای مصرفی را داشتند و آسیبی در اتصال‌ها ایجاد نشده است. همچنین برای میل مهارهای معمولی CK45 در هر دو نمونه‌ی مرتبط، شکست در ناحیه‌ی HAZ رخ نداده است.

در نمونه‌های D1، D2، و D3، شکست تمامی میل مهارها به جز آزمون دوم در نمونه‌ی D1، در هر مرحله به صورت ترد و شکننده رخ داده بود. در مرحله‌ی اول آزمون کشش هر نمونه، مواردی همچون خطای ساخت ایجاد شده ناشی از جوشکاری و ضعف مقاومت در ناحیه‌ی جوشکاری شده، باعث ایجاد شکست میل مهارها در منطقه‌ی HAZ به همراه کاهش ظرفیت نیرویی میل مهار شده‌اند. به دلیل شکست میل مهارها در هر دو مرحله در نمونه‌های دارای

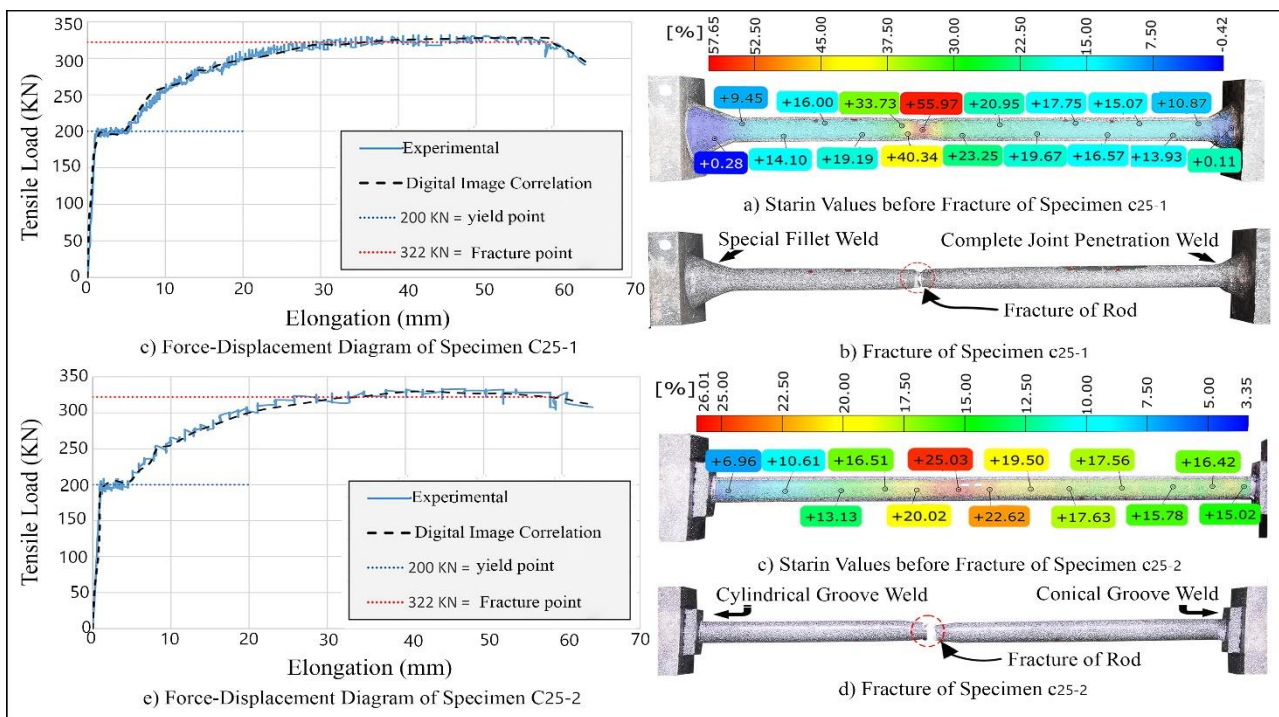


شکل ۱۴. نمونه‌های آزمایشگاهی در مرحله‌های اول و دوم آزمون کشش.

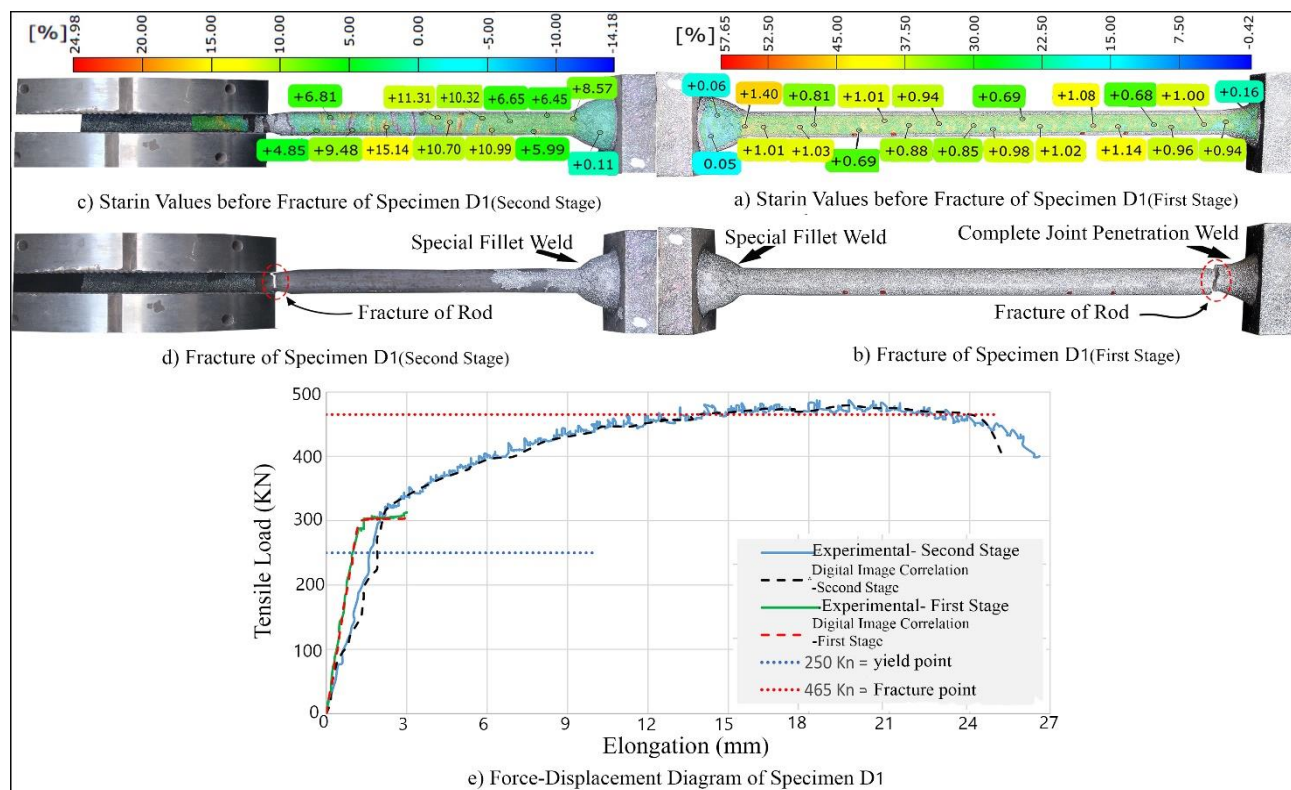
گسیختگی نهایی میل مهار داشتند و کاملاً به کرنش گسیختگی نرسیده و همچنان تقریباً کشسان باقی مانده‌اند، می‌توان در مرحله‌ی دوم با قراردادن قسمت گسیخته شده در درون فک و حذف این قسمت از مشارکت در تحمل نیروی کششی، آزمایش کشش روی اتصال جوشی را به صورت تک انجام داد.

۴. نتایج آزمایش‌ها

در پایان آزمایش‌های انجام شده، در همه‌ی نمونه‌ها، ورق‌های کفستون متصل به میل مهار تا لحظه‌ی شکست میل مهار، کشسان باقی ماندند و در هیچ‌کدام از نمونه‌ها در حین آزمایش، لایه‌لایه شدن یا پارگی ورق کفستون رخ نداده است. نوع شکست میل مهارها براساس مقایسه‌ی نیرو و کرنش حین شکست میل مهار با نیرو و کرنش گسیختگی میل مهار با توجه به جدول ۱ مشخص



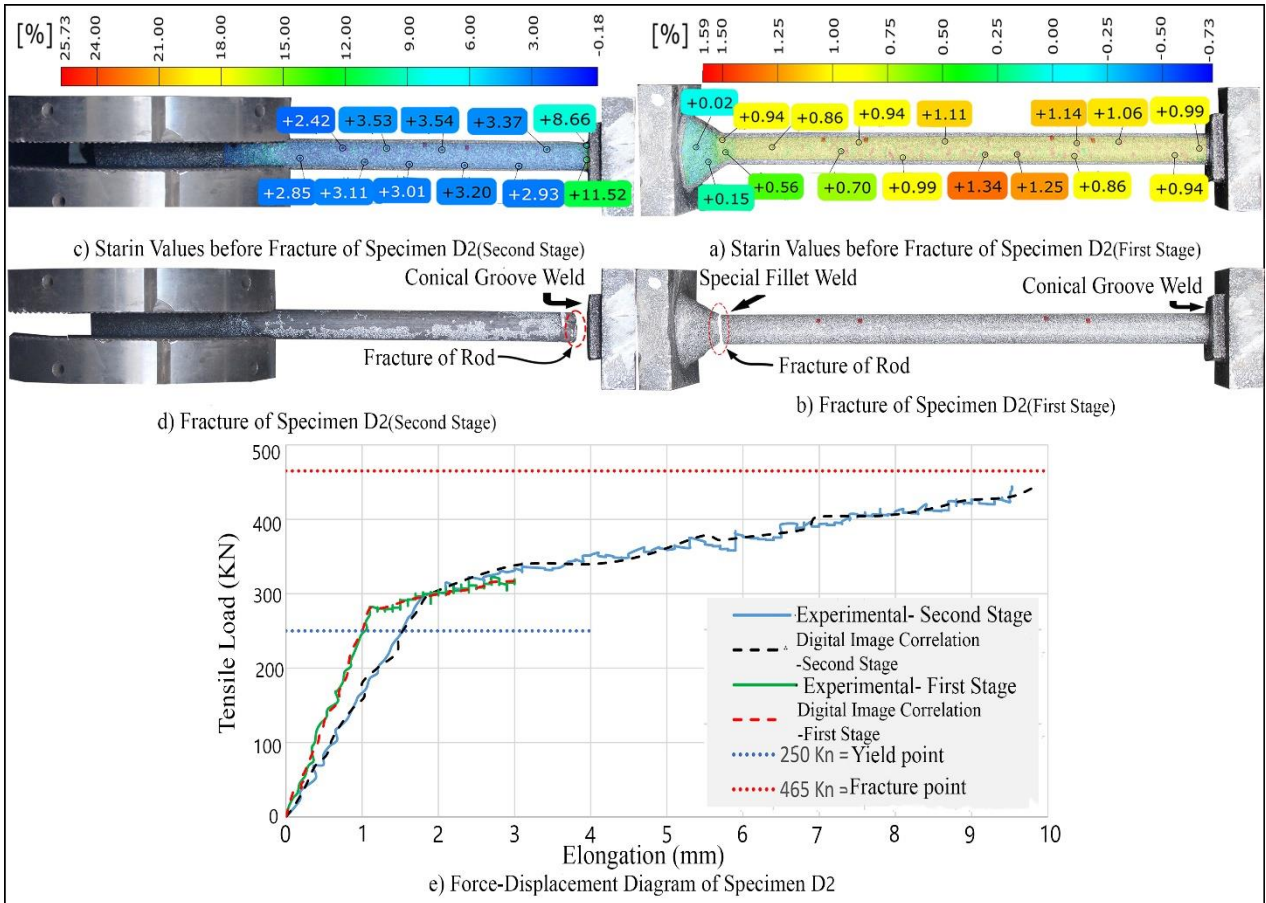
شکل ۱۵. نتایج و نمودارهای نمونه‌های C25-1 و C25-2.



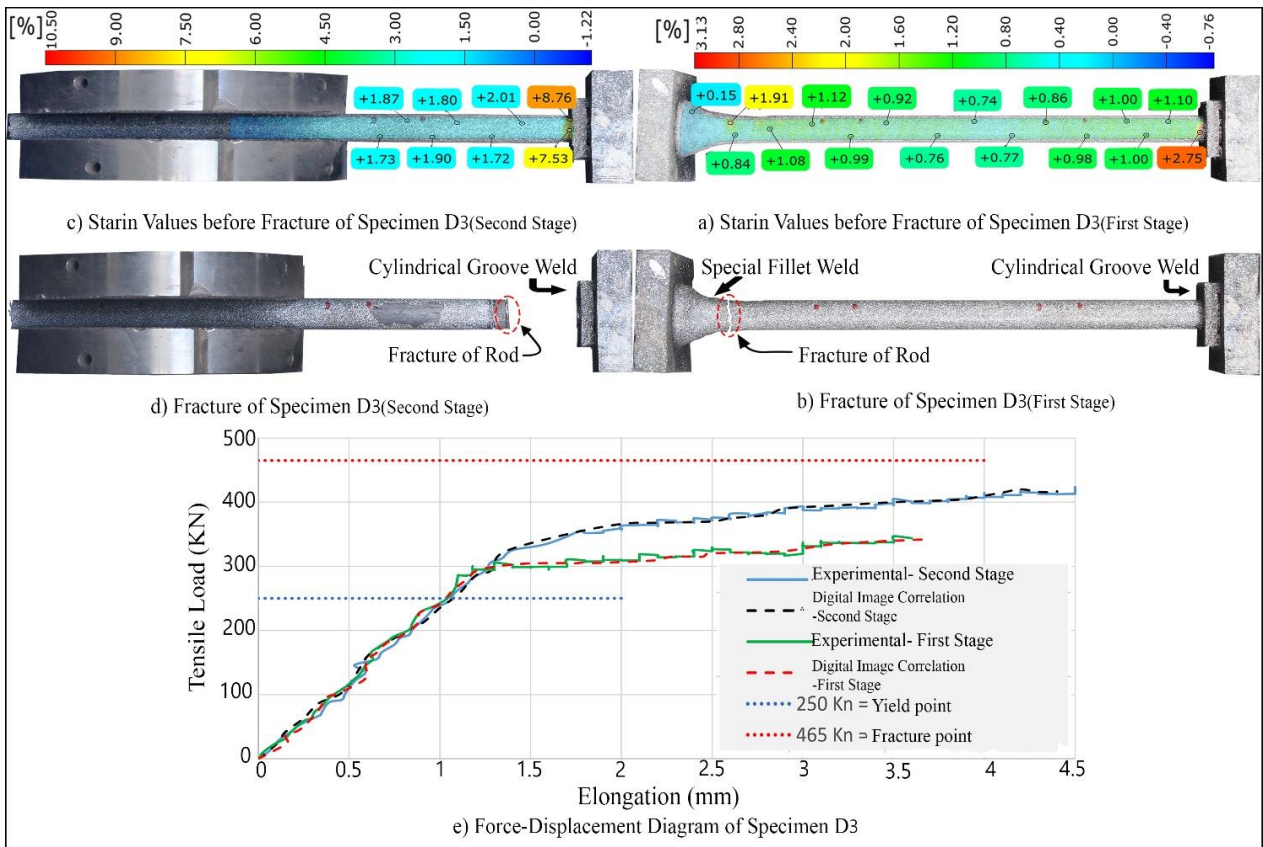
شکل ۱۶. نتایج و نمودارهای نمونه‌ی D1.

اتصال‌های جوشی نمایان، از جمله جوش گوشه‌ی ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل، مقادیر کرنش بسیار کمی نسبت به بقیه‌ی نواحی میل‌مهار مشاهده و نتیجه‌گیری شد که جوش‌ها تا آخرین لحظه‌ی بارگذاری، کشسان باقی مانده‌اند. جزئیات مربوط به کلیه‌ی نتایج نمونه‌های D1، D2 و D3، به ترتیب در شکل‌های ۱۶ الی ۱۸ مشاهده می‌شوند. در مرحله‌ی اول، برای هر نمونه‌ی آزمایشگاهی ذکرشده، اتصال‌های جوشی بررسی شده به دلیل اثر حرارت در

میل‌مهار مصرفی CK60 با کرنشی کمتر از کرنش گسیختگی، نوع شکست میل‌مهار نزدیک به اتصال‌های جوشی به صورت ترد و زودهنگام بوده است. بنابراین، جهت جلوگیری از شکست ترد میل‌مهاری پرمقاومت به همراه کاهش نیرو در ناحیه‌ی HAZ، اجرای عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش در حین جوشکاری اتصال‌های جوشی مخصوصاً اتصال جوش شیاری مخروطی و استوانه‌یی به دلیل حجم و حرارت زیاد جوشکاری الزامی است. برای



شکل ۱۷. نتایج و نمودارهای نمونه‌ی D۲.



شکل ۱۸. نتایج و نمودارهای نمونه‌ی D۳.

به‌دست‌آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال با نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل‌شده از دستگاه کشش تقریباً مطابقت داشتند.

جوش گوشه‌ی ویژه، به‌دلیل نداشتن عملیات تراشکاری و آماده‌سازی ورق، هزینه‌ی کمتری نسبت به بقیه‌ی جوش‌ها داشته است. به‌دلیل پیکربندی جوش گوشه‌ی ویژه، نیروی محوری میل‌مهار برخلاف بقیه‌ی اتصال‌های جوشی، با خروج از مرکزیت به ورق منتقل می‌شود. جوش شیاری با نفوذ کامل به‌دلیل حجم کم عملیات تراشکاری نسبت به جوش‌های شیاری مخروطی و استوانه‌یی، اجرای آسان‌تر و هزینه‌ی کمتر دارد. در اتصال جوش گوشه و جوش شیاری با نفوذ کامل، به‌دلیل عدم نیاز به سوراخ‌کاری در ورق و احتمال لایه‌لایه‌شدن در ورق کف‌ستون، باید آزمون‌های التراسونیک جهت اطمینان از کیفیت مصالح ورق انجام شوند. همچنین جهت جلوگیری از ایجاد پدیده‌ی اخیر، توصیه می‌شود از اتصال‌های جوش شیاری مخروطی یا استوانه‌یی به‌دلیل قرارگرفتن در سوراخ ایجادشده در ورق استفاده شود.

در جوش شیاری مخروطی و استوانه‌یی، هزینه و زمان انجام فرایند جوشکاری زیاد است. توصیه می‌شود از اتصال‌های جوشی مخروطی یا استوانه‌یی برای ورق‌های با ضخامت بالا به‌دلیل حجم زیاد جوشکاری، هزینه و حرارت زیاد در اتصال جوش شیاری مخروطی و سختی اجرای جوشکاری در فضای کم و عدم نفوذ کامل جوش در اتصال جوش شیاری استوانه‌یی استفاده نشود. بنابراین، برای ضخامت‌های زیاد ورق، اتصال جوش شیاری استوانه‌یی، غیراجرای و اتصال جوش شیاری مخروطی، غیراقتصادی است.

همچنین به‌دلیل حجم زیاد جوشکاری در اتصال‌های جوش شیاری مخروطی و استوانه‌یی، حرارت اعمال‌شده به اتصال زیاد است. شکست ناشی از حرارت در ناحیه‌ی HAZ اتصال‌های مذکور، نیز بسیار محتمل‌تر نسبت به اتصال‌های جوش گوشه‌ی ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل است.

در نتیجه، جوش گوشه از لحاظ هزینه و اجرا با توجه به انجام آزمون‌های التراسونیک روی ورق، اولویت اول را نسبت به بقیه‌ی جوش‌ها دارد. جوش شیاری با نفوذ کامل نیز با توجه به عملیات تراشکاری، در اولویت دوم قرار دارد و جوش شیاری مخروطی و جوش شیاری استوانه‌یی نیز با توجه به شرایطی خاص به ترتیب اولویت‌های سوم و چهارم را در اجرا و هزینه دارند.

در تمام نمونه‌ها، هیچ شکست تردگونه‌یی در نیرویی کمتر از نیروی تسلیم میل‌مهارها رخ نداده و اتصال‌های جوشی در برابر ظرفیت نهایی میل‌مهارها مقاوم بوده‌اند. در نتیجه، برای جلوگیری از رفتار تردگونه و شکست‌های زود هنگام ناشی از ضعف میل‌مهار پُرمقاومت در برابر جوشکاری در ناحیه‌ی HAZ در اتصال‌های جوشی، توصیه می‌شود که علاوه بر انجام عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش در حین جوشکاری، میل‌مهارهای جوش‌شده به ورق طبق آیین‌نامه‌ها به صورت کشسان طراحی شوند و نیرو-کنترل باقی بمانند.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای مهندس حیدریان، مدیرعامل محترم شرکت آکام فولاد، که در تهیه‌ی مصالح و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، نویسندگان را یاری رساندند، صمیمانه تشکر می‌شود.

ناحیه‌ی HAZ توانایی تحمل نیروی تسلیم میل‌مهار را داشته‌اند. همچنین، در مرحله‌ی دوم در همان نمونه‌ها، اتصال‌های جوشی به‌صورت تکی تقریباً توانایی تحمل نیروی گسیختگی میل‌مهارها را داشته‌اند.

شکست شکل‌پذیر میل‌مهار در مرحله‌ی دوم آزمون نمونه‌ی D۱ در محل نزدیک به فک دستگاه، به‌دلیل اعمال نیروی عرضی فشاری از طرف فک و کشش طولی در میل‌مهار حین آزمایش بوده است. تنش‌های بحرانی ایجادشده در لبه‌ی فک، اثر بحرانی‌تری نسبت به اثر حرارت جوشکاری در ناحیه‌ی HAZ اتصال جوش گوشه‌ی ویژه به‌دلیل حجم جوشکاری کم داشتند. اما در آزمون دوم، نمونه‌های D۲ و D۳ به‌دلیل حجم جوشکاری زیاد در اتصال‌های جوش شیاری مخروطی و استوانه‌یی، اثر حرارت ناشی از جوشکاری در ناحیه‌ی HAZ، بحرانی‌تر از ناحیه‌ی فک بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

در اتصال‌های کف‌ستون نمایان، به‌دلیل عدم تماس ورق کف‌ستون و بتن بعد از غیرخطی‌شدن میل‌مهارها در حین بارگذاری، پینچینگ در نمودار هیستریزس اتصال کف‌ستون رخ می‌دهد. به‌دلیل قرارگرفتن میل‌مهار زیر ورق کف‌ستون توسط اتصال‌های جوشی در ناحیه‌ی زیرین بال‌ستون و فعال‌شدن عملکرد فشاری-کششی میل‌مهارها حین بارگذاری، عامل ایجاد پینچینگ در نمودار هیستریزس اتصال کف‌ستون حذف می‌شود. در پژوهش حاضر، خروج از مرکزیت بین میل‌مهار و بال‌ستون در اتصال‌های کف‌ستون بررسی‌شده نیز حذف شدند. تعداد چهار نوع جوش معرفی‌شده به نام‌های: جوش گوشه‌ی ویژه، جوش شیاری با نفوذ کامل، جوش شیاری استوانه‌یی، و جوش شیاری مخروطی برای ارزیابی مقاومت کششی اتصال جوشی میل‌مهار تحت کشش به ورق کف‌ستون بررسی شدند. هدف اصلی، حفظ مقاومت در اتصال‌های جوشی نسبت به نیروی گسیختگی میل‌مهارها بوده است. براساس جنس میل‌مهارهای مختلف، دو اتصال T- شکل جوشی متفاوت از هم، در ۵ نمونه‌ی آزمایشگاهی مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ی جوشکاری، طراحی و ساخته شدند و تحت بار کششی قرار گرفتند.

از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای مشخص کردن میدان کرنش سطوح بررسی‌شده، تعیین نوع شکست میل‌مهارها، و رسم نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه استفاده شد. در نمونه‌های دارای میل‌مهار معمولی CK۴۵، شکست میل‌مهارها با توجه به مقادیر کرنش، از نوع شکل‌پذیر بودند و ۴ نوع اتصال جوشی معرفی‌شده در نمونه‌های مذکور، توانایی تحمل ظرفیت نهایی کششی میل‌مهارها را داشتند و تا لحظه‌ی نهایی، سالم و کشسان باقی ماندند. در نمونه‌های دارای میل‌مهار پُرمقاومت CK۶۰، شکست میل‌مهارها در نیروی نهایی برابر با نیروی گسیختگی و با توجه به مقادیر کرنش کمتر از کرنش نهایی، به‌صورت کاملاً تردگونه و زود هنگام به‌دلیل ضعف میل‌مهار پُرمقاومت در برابر جوشکاری، در ناحیه‌ی HAZ رخ داده است. بنابراین، نوع میل‌مهار انتخابی برای اتصال‌های کف‌ستون بررسی‌شده بسیار مهم است. البته با انجام عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش می‌توان از ایجاد شکست‌های ترد واقع در ناحیه‌ی HAZ برای انواع مختلف اتصال جوشی میل‌مهار جلوگیری کرد. در همه‌ی نمونه‌های دارای میل‌مهار پُرمقاومت، هر ۴ نوع اتصال جوشی تا لحظه‌ی نهایی آزمایش، سالم و کشسان باقی ماندند.

همچنین ورق کف‌ستون و اتصال‌های جوشی با توجه به مقادیر کرنش در هر ناحیه، همگی کشسان باقی ماندند. نتایج نمودارهای نیرو-جابجایی

References - منابع

1. Tremblay, R., Filiatrault, A., Timler, P. and Bruneau, M., 1995. Performance of steel structures during the 1994 Northridge earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(2), pp.338-360. <https://doi.org/10.1139/195-046>.
2. Latour, M. and Rizzano, G., 2013. Full strength design of column base connections accounting for random material variability. *Engineering Structures*, 48, pp.458-471. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.026>.
3. Lim, W.Y., Lee, D. and You, Y.C., 2017. Exposed column-base plate strong-axis connections for small-size steel construction. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, pp.286-296. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.018>
4. Rodas, P.T., Zareian, F. and Kanvinde, A., 2016. Hysteretic model for exposed column-base connections. *Journal of Structural Engineering*, 142(12), p.04016137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001602](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001602).
5. Astaneh-Asl, A., 2008. Seismic behavior and design of base plates in braced frames. *SteelTIPS, Technical Information and Product Service, Structural Steel Educational Council*.
6. Gomez, I., Kanvinde, A. and Deierlein, G.G., 2010. Exposed column base connections subjected to axial compression and flexure. *AISC, Chicago*, 257.
7. Fahmy, M., 2000. *Seismic behavior of moment-resisting steel column bases*. University of Michigan.
8. Eurocode 3, (2005), Design of steel structures, part 1-8: Design of joints.
9. Vakili Sadeghi, H., Mirghaderi, S.R., Epackachi, S., Asgarpoor, M. and Gharavi, A., 2022. Numerical study on split base plate connection with concentric anchors between steel-plate composite wall and concrete basemat. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 31(11), p.e1937. <https://doi.org/10.1002/tal.1937>.
10. AISC-360., 2016. Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction.
11. Lee, C.K., Chiew, S.P. and Jiang, J., 2012. Residual stress study of welded high strength steel thin-walled plate-to-plate joints, Part 1: Experimental study. *Thin-Walled Structures*, 56, pp.103-112. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.03.015>.
12. Wang, Y.B., Li, G.Q. and Chen, S.W., 2012. The assessment of residual stresses in welded high strength steel box sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 76, pp.93-99. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.03.025>.
13. Mohandas, T., Reddy, G.M. and Kumar, B.S., 1999. Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 88(1-3), pp.284-294. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00404-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00404-X).
14. Gáspár, M., 2019. Effect of welding heat input on simulated HAZ areas in S960QL high strength steel. *Metals*, 9(11), p.1226. <https://doi.org/10.3390/met9111226>.
15. Chen, C., Zhang, X., Zhao, M., Lee, C.K., Fung, T.C. and Chiew, S.P., 2017, February. Effects of welding on the tensile performance of high strength steel T-stub joints. In *Structures* 9, pp. 70-78. Elsevier Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.09.008>.
16. Björk, T., Ahola, A. and Tuominen, N., 2018. On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel. *Welding in the World*, 62, pp.985-995. doi.org/10.1007/s40194-018-0624-4.
17. Barzegar-Mohammadi, S., Haghpanahi, M., Zeinoddini, M. and Miresmaeili, R., 2023, April. Cooling rate effects on fatigue life prediction using hardness measurements for in-service steel patch-welds with and without TIG dressing treatment. In *Structures* 50, pp. 1285-1302. Elsevier. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.019>.
18. Tajik, N., Mirghaderi, S.R., Asghari, A. and Hamidia, M., 2024. Experimental and numerical study on weld strengths of built-up steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 213, p.108362. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108362>.
19. Kamtekar, A.G., 1982. A new analysis of the strength of some simple fillet welded connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 2(2), pp.33-45. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(82\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0143-974X(82)90024-4).
20. Nie, C. and Dong, P., 2012. A traction stress based shear strength definition for fillet welds. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 47(8), pp.562-575. <https://doi.org/10.1177/0309324712456646>.
21. AWS-D1.4/D1.4M., 2018. Structural Welding Code Steel Reinforcing Bars. *American Welding Society*.

22. ACI 318-19., 2019. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. *American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA*.
23. American Welding Society. Structural Welding Committee, American Welding Society and American National Standards Institute, 2020. *Structural Welding Code--steel*. American Welding Society.
24. de Normalisation, C.E., 2005. *Eurocode 3: design of steel structures— part 1-10: material toughness and through-thickness properties*. EN 1993-1-10, Comité Européen de Normalisation, Brussels.
25. AWS-B1.10M/B1.10., 2016. Guide for the Non-destructive Examination of Welds. *American Welding Society*.
26. Ekstrom, M.P., 2012. *Digital image processing techniques 2*. Academic Press.
27. Pan, B., Xie, H., Wang, Z., Qian, K. and Wang, Z., 2008. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics express*, 16(10), pp.7037-7048. <https://doi.org/10.1364/OE.16.007037>.
28. Idhar, R.A., Sjah, J., Handika, N. and Tjahjono, E., 2020, May. Evaluation of loading rate to the stress-strain response of reinforcing steel bar. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 801*(1), p. 012016). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/801/1/012016>.
29. Callister Jr, W.D. and Rethwisch, D.G., 2020. *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley and sons.
30. GOM Correlate. GOM—Precise Industrial 3D Metrology. *Braunschweig, Germany*. Available online:<https://www.gom.com/index.html>