

بررسی آزمایشگاهی رفتار اتصالات کفستون‌ها به همراه میل‌مهارهای جوش شده بدون خروج از مرکزیت با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال

- ایمان کرمی^۱، سید رسول میرقادری^۲، امیررضا قیامی آزاد^{۳*}، محمود علی^۴
- ۱- کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران
 - ۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران
 - ۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران
 - ۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- imankarami@ut.ac.ir

۲- rmirghaderi@ut.ac.ir

۳- rghiami@ut.ac.ir

۴- mahmoud.ali@ut.ac.ir

چکیده:

در اتصالات کفستون متداول با پلاستیک شدن میل‌مهارها و عدم تماس بین ورق کفستون و بتن در حین بارگذاری، پینچینگ در نمودار هیستریزس رخ می‌دهد. هدف این پژوهش، ایجاد نوعی اتصال جوشی میل‌مهار زیر ورق کفستون جهت ایجاد باربری لحظه‌ای در میل‌مهارها، بدون خروج از مرکزیت نسبت به بال ستون می‌باشد. بنابراین جهت بررسی مقاومت چهار نوع اتصال جوشی تحت کشش شامل جوش گوشه ویژه، جوش شیاری با نفوذ کامل، جوش شیاری استوانه‌ای و جوش شیاری مخروطی، از اتصال T-شکل طراحی شده مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ها و مدهای گسیختگی استفاده شد. ظرفیت، نوع شکست و میدان کرنش اتصال جوشی میل‌مهار در هر نمونه با حالات مختلف به کمک روش همبستگی تصاویر دیجیتال سنجیده شدند. در نتیجه اتصالات جوشی، تقریباً توانایی تحمل ظرفیت نهایی میل‌مهارها را داشتند و تا آخرین لحظه از بارگذاری الاستیک باقی ماندند. البته شکست میل‌مهارهای پر مقاومت در ناحیه HAZ پدیده مهمی می‌باشند که از طریق عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش، قابلیت کنترل دارند. همچنین جوش گوشه ویژه از لحاظ هزینه و سهولت اجرا نسبت به بقیه اتصالات جوشی، در اولویت اول قرار دارد.

واژگان کلیدی:

اتصال کفستون، اتصال T-شکل، روش جزء، جوش شیاری، جوش گوشه، میل‌مهار، همبستگی تصاویر دیجیتال

* امیررضا قیامی آزاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران
ایمیل: rghiami@ut.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Experimental investigations of the behavior of column base connections with concentrically-welded anchor rods using digital image correlation method

I. Karami ^۱, R. Mirghaderi ^۲, A. Ghiami Azad ^۳, M. Ali ^۴

۱- M.S, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

۲- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

۳- Ph.D, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

۴- Ph.D student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

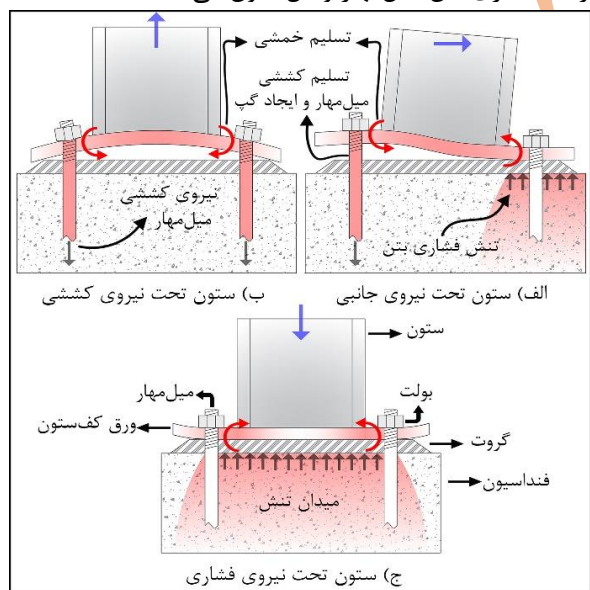
Abstract:

Base plate connections are one of the most important connections in steel structures. Besides the moment capacity of the connection, the rotational stiffness is an equally critical property that is frequently used in design. Because of the low rotational stiffness of the column base-plate, column base-plate connections do not have enough rigidity to create perfect plastic hinges. Therefore, concentrically-welded anchor rods were used under the column base plate to transfer loads properly. In this paper, four different weld types were used to connect the anchor rods to the bottom of the base plate. In this connection, the eccentricity between anchor rods and the steel column is removed to improve the stiffness of the base plate connections. The aim of this paper is to design four different weld types according to the specifications of welding standards. Five laboratory samples with different anchor rod strengths were tested to evaluate strength and ductility of each weld type under tensile loading. Anchor rods were the weakest member in transferring tensile load in each sample and expected to fail at the end of the test. The Digital image correlation method was used to provide full field strain information of each laboratory sample. Digital image correlation (DIC) is a non-contact and non-destructive technique in which digital images of the point of interest (POI) of a test specimen are captured continuously using a high-resolution camera all through the test. Brittle failure was observed in the samples with high strength anchor rods at the softened heat affected zone (HAZ) in the anchor rods. As a result, all the anchor rods in each laboratory sample fractured at a tensile strength higher than ultimate strength of the anchor rod. Therefore to prevent the failure of anchor rods in softened HAZ area, it is crucial to do pre-heating and post-heating before and after the welding process and design the anchor rods of the column base connections to remain elastic under cyclic loads. It was also concluded that the fillet weld had a better performance in terms of executive and economy compared to the other welds.

Keywords: Base plate connection, T-shape connection, Component method, Groove weld, Fillet weld, Anchor rod, DIC.

۱ - مقدمه و هدف تحقیق

تغییر شکل‌های ایجاد شده، مقاومت اتصال کفستون تحت تاثیر قرار می‌گیرد [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 قسمت‌های کناری ورق کفستون می‌شود. در این حالت میل‌مهارها هیچ مشارکتی در انتقال نیروی فشاری به فونداسیون ندارند [۵]. گومز^۷ و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی نشان دادند که عامل ایجاد پینچینگ، باعث کاهش انرژی مستهلک شده در نمودار هیستریزیس اتصال کفستون شده است. [۶]. مطابق با پژوهش‌های فهمی^۸ (۲۰۰۰) و روداس^۴ و همکاران (۲۰۱۶) با افزایش نیروهای وارده، خرابی‌های گزارش شده در اتصال کفستون‌های ضخیم، گسیختگی ترد میل‌مهارها و خوردشدگی بتن می‌باشد. بنابراین استفاده از کفستون ضخیم جهت جلوگیری از تغییر شکل‌های خمشی ورق و افزایش مقاومت و سختی ورق نیز، مودهای گسیختگی ترد را در اتصال به همراه دارد. [۷و۴]. نیروی برشی ستون نیز از طریق کلید برشی زیر ورق کفستون، به فونداسیون منتقل می‌شود. البته علت ایجاد تمام تغییر شکل‌های خمشی اتصالات کفستون متداول، وجود خروج از مرکزیت اجباری بین میل‌مهار و بال ستون می‌باشد.



امروزه اتصالات کفستون متداول یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سازه فولادی می‌باشند که نقش مهمی در انتقال نیروهای سازه به فونداسیون دارند. ورق کفستون، وظیفه انتقال تنش‌های فشاری وارده از طرف ستون به فونداسیون را به صورت تدریجی و کاهش داده شده دارد. بررسی‌های انجام شده در مورد خرابی‌های زلزله توسط ترمبلی^۱ و همکاران (۱۹۹۵) نشان دادند که اتصالات کفستون نمایان متداول در مقلیل مدهای گسیختگی از قبیل شکست جوش، تسلیم ورق کفستون، شکست میل‌مهار و خورد شدگی گروت، آسیب‌پذیر هستند [۱]. لاتور و ریزانو^۲ (۲۰۱۳) و لیم^۳ و همکاران (۲۰۱۷) در ارزیابی‌های عددی متعددی که انجام دادند، نتیجه گرفتند که فرض مفصلی یا گیردار کامل برای اتصالات کفستون متداول صحیح نیستند و اتصالات کفستون رفتار نیمه‌گیردار دارند [۳-۲]. در سیستم‌های قاب خمشی، ستون‌ها و اتصالات کفستون تحت نیروهای محوری و جانبی مطابق با 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 هیستریزیس تحت بارگذاری دوره‌ای رخ می‌دهد و پارامترهای سختی و مقاومت اتصال در حین باربرداری به دلیل عدم تماس نیرویی بین ورق کفستون و میل‌مهار، تحت تاثیر 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 کششی وارد بر ستون، باعث ایجاد تغییر شکل خمشی در ورق کفستون و تغییر شکل کششی در میل‌مهار می‌شود و به دلیل

^۵ Pinched

^۶ Astaneh-Asl

^۷ Gomez

^۸ Fahmy

^۱ Tremblay

^۲ Latour & Rizzano

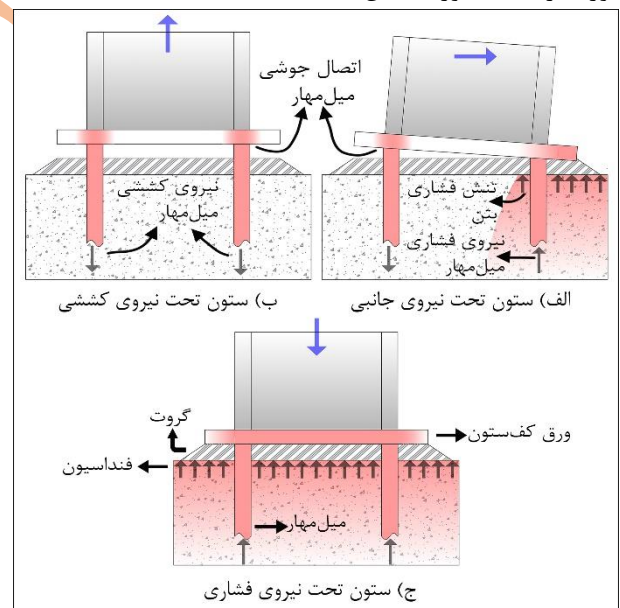
^۳ Lim

^۴ Rodas

شکل ۱: مکانیزم انتقال نیرو در اتصالات کفستون متداول [بازتولید شده از مرجع ۴-۵]

بنابراین جهت حذف عامل ایجاد پینچینگ در نمودار هیستریزس اتصالات 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 زیرین بال ستون با اتصالات جوشی به صورت عمودی متصل شوند. مطابق با شکل (۲-الف)، با حذف خروج از مرکزیت بین میل مهار و بال ستون و قرارگیری میل مهارها زیر ناحیه بال ستون، میل مهارهای فشاری و کششی توسط اتصالات جوشی، نیروهای وارده از طرف ستون را بدون ایجاد خمش در ورق کفستون، به صورت مستقیم به فونداسیون منتقل می کنند. به دلیل اتصال پایدار و همیشگی میل مهار به ورق کفستون توسط اتصالات جوشی و فعال شدن باربری فشاری میل مهارها، عامل ایجاد پینچینگ از نمودار هیستریزس اتصال حذف می شود.

در شکل (۲)، پیکربندی اتصالات کفستون‌ها با اتصالات جوشی میل مهار به زیر ورق کفستون و چگونگی انتقال بارهای جانبی و محوری از لحاظ تئوری نشان داده شده است.



شکل ۲: مکانیزم انتقال نیرو در اتصالات کفستون

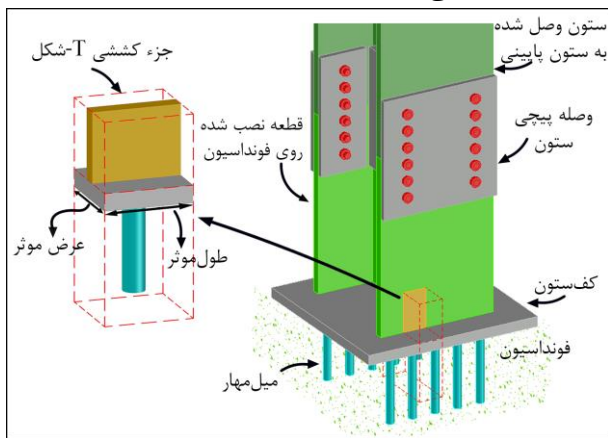
مطابق با شکل (۲-الف)، لنگرهای خمشی ناشی از نیروهای جانبی وارد بر ستون، توسط میل مهارهای کششی و فشاری و گروت به فونداسیون منتقل می شوند. در این حالت تغییرشکل طولی در میل مهارهای کششی رخ می دهد اما در هنگام بارگذاری خلاف

جهت، بر خلاف اتصالات 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 دوره‌ای امکان پذیر است. به همین دلیل حالت پینچینگ در نمودار هیستریزس تحت بارگذاری‌های دوره‌ای 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، بر خلاف اتصالات 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 کفستون پیشنهادی در حین بارگذاری، یا تحت کشش مستقیم و یا تحت فشار مستقیم هستند. در میل مهارها و اتصال جوشی تحت نیروی فشاری، به دلیل اتکای میل مهار به ورق و محصورشدگی جوش از طرف گروت و عدم کمانش میل مهار در بتن، هیچ گونه مد خرابی برای اتصالات جوشی تحت فشار مدنظر نیست. به همین دلیل رفتار اتصال جوشی تحت فشار کاملاً واضح است و نیازی به بررسی و ارزیابی مقاومت اتصال جوشی تحت فشار نمی باشد. اما در اتصال جوشی تحت نیروی کششی، ممکن است خرابی یا کاهش مقاومت در اتصال یا میل مهار رخ دهد و میل مهار کششی به دلیل اثر پواسون از بدنه بتن جدا می شود. بنابراین بین اجزای اتصال کفستون پیشنهادی، اتصالات جوشی میل مهار به ورق تحت نیروی کششی، رفتار و پاسخ ناشناخته‌ای دارند.

بنابراین هدف اصلی از این پژوهش، بررسی رفتار ناشناخته و مقاومت اتصالات جوشی تحت کشش می باشد. جهت بررسی و ارزیابی مقاومت اتصالات جوشی، از اتصال T-شکل که متشکل از بخشی از میل مهار، اتصال جوشی، ورق کفستون و بال ستون می باشد، استفاده شده است. منظور از اتصال T-شکل، اتصال عمودی میل مهار بر ورق فولادی توسط اتصالات جوشی به همراه بال ستون می باشد. بنابراین جهت درک بهتر و واضح رفتار اتصال جوشی میل مهار به ورق کفستون، باید قسمتی از اتصال کفستون

وصله پیچی در یک سوم میانی طبقه به ستون متصل به ورق کفستون وصل می‌شوند.



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

در اتصالات کفستون پیشنهادی به دلیل عدم تعویض یا ترمیم‌پذیری اجزای اتصال، طبق آیین‌نامه AISC-۳۶۰ [۱۰] باید تمام اجزای اتصال از جمله ورق کفستون، اتصالات جوشی، میل‌مهاریها و بتن، به صورت الاستیک طراحی شوند. همچنین جهت شناسایی رفتار این اتصالات، اتصالات جوشی باید در برابر نیروی گسیختگی میل‌مهاریها به صورت الاستیک طراحی شده و انتظار می‌رود اتصالات جوشی در اتصال T-شکل، ظرفیت نهایی کششی میل‌مهاریها را تحمل کنند و در انتها میل‌مهاریها شکسته شود تا اطمینان از ظرفیت مقاومتی این اتصالات حاصل شود. البته در طراحی اتصال کفستون پیشنهادی، میل‌مهاریها نیز در طراحی کلی اتصالات کفستون باید در برابر ظرفیت ستون، الاستیک طراحی شوند.

در یک ارزیابی عددی انجام شده توسط وکیلی صادقی و همکاران [۹] (۲۰۲۲)، میل‌مهاریها بدون در نظر گرفتن نوع اتصال جوشی، زیر ورق‌های کف دیوار مختلط برشی به صورت قائم با اتصالات جوشی جایگذاری شدند و عملکرد و مکانیزم انتقال نیروها در این اتصال مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش تعداد ۴ نوع اتصال جوشی میل‌مهاریها به ورق مطابق با شکل (۴) بدون در نظر گرفتن جزئیات هندسی و معیارهای طراحی جهت ایجاد اتصال پیشنهاد شدند [۹].

را جدا کرده و تحت نیروی کششی، مورد بررسی قرار داد. آیین‌نامه 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 جزءها، نقش مهمی در تامین مقاومت و سختی اتصال دارند. برای ستون‌های پیشنهادی با اتصالات میل‌مهاریهای 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 میل‌مهاری کششی، اتصال جوشی تحت کشش، ورق کفستون و بال ستون می‌باشد و همچنین جزء فشاری T-شکل متشکل از میل‌مهاری فشاری، اتصال جوشی تحت فشار، ورق کفستون و بال ستون می‌باشد. بر اساس پژوهش انجام شده توسط وکیلی صادقی [۲۰۲۲] و همکاران، به دلیل محصور شدن میل‌مهاری در بتن و عدم کمانش آن، جزء T-شکل کششی بحرانی‌تر از جزء T-شکل فشاری است [۹]. همچنین به دلیل مشخص بودن رفتار و پاسخ اتصالات جوشی تحت فشار، از انجام آزمایش روی اتصالات جوشی تحت فشار صرف نظر شد. همچنین بررسی‌های دقیق عددی و آزمایشگاهی رفتار کلی اتصال کفستون پیشنهادی به همراه اتصالات جوشی در مقیاس واقعی، خارج از بحث این پژوهش می‌باشد.

مطابق با شکل (۳)، جزء T-شکل کششی از ورق کفستون بر اساس ضوابط Eurocode ۳ [۸]، به اندازه طول موثر و عرض موثر از ورق کفستون جدا شده است. مقدار طول موثر و عرض موثر از طریق حداقل فاصله مجاز آیین‌نامه‌ای بین میل‌مهاریها تعیین می‌شوند.

مطابق با شکل (۳)، نحوه اجرای این نوع اتصالات به طوری است که در ابتدا میل‌مهاریها به زیر ورق کفستون در کارخانه جوش می‌شوند. در مرحله بعدی قسمتی از ستون اصلی با ارتفاع مشخصی به ورق کفستون در کارخانه جوش داده می‌شود و اتصال کفستون آماده شده به محل ساخت سازه فرستاده می‌شود. بعد از نصب دقیق اتصال در محل فونداسیون و بتن‌ریزی، ستون‌های اصلی با اتصال

^۲ Vakili Sadeghi

^۱ Component Method

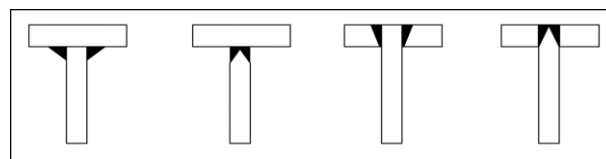
اولویت‌بندی، تحت نیروی کششی پرداخته شد. اتصالات T-شکل در نمونه‌های آزمایشگاهی، تحت تست‌های کشش مستقیم قرار گرفتند و در انتها نمودار نیرو-جلبه‌جایی و میدان کرنش هر یک از اتصالات جوشی و میل‌مه‌ارها توسط روش همبستگی تصاویر دیجیتال حاصل شدند. همچنین در هر یک از نمونه‌ها به بررسی شکست‌های محتمل ترده‌گونه در نواحی جوشکاری‌شده نیز پرداخته شده است.

۲- معرفی اتصالات جوشی میل‌مه‌ارها

۲-۱- جوش گوشه ویژه

جوش گوشه به عنوان جوشی که سهولت در اجرا و هزینه ساخت معقول دارد، به فراوانی در ساخت‌وساز به کار می‌رود. جوش‌های استاندارد از لحاظ تئوری، هندسه دو ساق مساوی دارند. خطا در اجرای دقیق ابعاد جوش گوشه در حین جوشکاری، باعث تغییر در اندازه گروی موثر 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 زاویه ۳۰-۶۰ درجه برای افزایش مقاومت اتصال جوش گوشه وجود دارد. بنابراین در این پژوهش از هندسه مقطع جوش گوشه با زاویه ۳۰-۶۰ درجه با ساق‌های نامساوی با نام جوش گوشه ویژه به‌جای هندسه مقطع جوش گوشه استاندارد با زاویه ۴۵ درجه، استفاده شده است. در جوش گوشه 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 گوشه استاندارد مهیا می‌شود. جزئیات هندسی جوش گوشه ویژه و اجزای اتصال قبل از جوشکاری به ترتیب در شکل (۵-الف) و (۵-ب) نشان داده شده‌اند.

مطابق با شکل (۵-الف)، جهت نفوذ بهتر فلز جوش در ریشه جوش گوشه، طبق ضوابط آیین‌نامه AWS-D1.4 [۲۱]، به اندازه یک میلی‌متر فاصله بین میل‌مه‌ار و ورق کفستون در نظر گرفته شد. ایجاد گپ یک میلی‌متری منجر به کاهش بعد گلوگاه موثر



شکل ۴: اتصالات جوشی میل‌مه‌ار به ورق کفستون [۹]

پژوهشگران نشان دادند که به دلیل ایجاد حرارت ناشی از جوشکاری در فلزات، تنش‌های پسماند زیادی در ورق ایجاد شده و احتمال وقوع شکست زودهنگام، کاهش ظرفیت مقاومتی، کاهش شکل‌پذیری و شکست ترده‌گونه یا محتمل در مصالح پرمقاومت در ناحیه HAZ وجود دارد. [۱۱-۱۵]

طبق پژوهش‌های بیورک^۱ و همکاران (۲۰۱۸) و برزگر^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، در حین انجام عملیات جوشکاری روی ورق فولادی، گرمای زیادی در جهت ضخامت ورق ایجاد می‌شود و میزان ضخامت ورق کفستون، بر نرخ سردشوندگی آن تأثیر زیادی دارد. به عبارت دیگر با کاهش مقدار ضخامت ورق کفستون، نرخ سردشوندگی ورق افزایش یافته و با افزایش سرعت سرد شدن ورق فولادی، تنش‌های پسماند بیشتری حین سرد شدن محل جوشکاری‌شده در ورق کفستون باقی می‌ماند. بنابراین برای کنترل نرخ سردشوندگی، حداقل ضخامت ورق کفستون برابر با اندازه قطر میل‌مه‌ار مصرفی زیر ورق، توصیه شده است [۱۶-۱۷]. همچنین تاجیک^۳ و همکاران (۲۰۲۴) توصیه کردند جهت جلوگیری از ایجاد اثرات مخرب حرارت در ناحیه HAZ، عملیات‌های پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش، بعد و قبل از جوشکاری فلزات انجام شوند. [۱۸].

طبق پژوهش‌های کامتکار^۴ (۱۹۸۲) و نی و دانگ^۵ (۲۰۱۲)، جوش‌های دو ساق نامساوی با زاویه ۳۰-۶۰ درجه، ماکزیمم ظرفیت کششی نسبت به جوش‌های استاندارد دو ساق مساوی با حجم جوش یکسان دارند [۱۹-۲۰].

در پژوهش فعلی بر اساس معیارهای طراحی و ضوابط آیین‌نامه‌ای، جزئیات هندسی دقیق‌تری برای هر یک از اتصالات جوشی مشخص شدند. سپس به بررسی مقاومت و مقایسه انواع اتصالات جوشی بین میل‌مه‌ار و ورق کفستون در شرایط مختلف و

^۴ Kamtekar

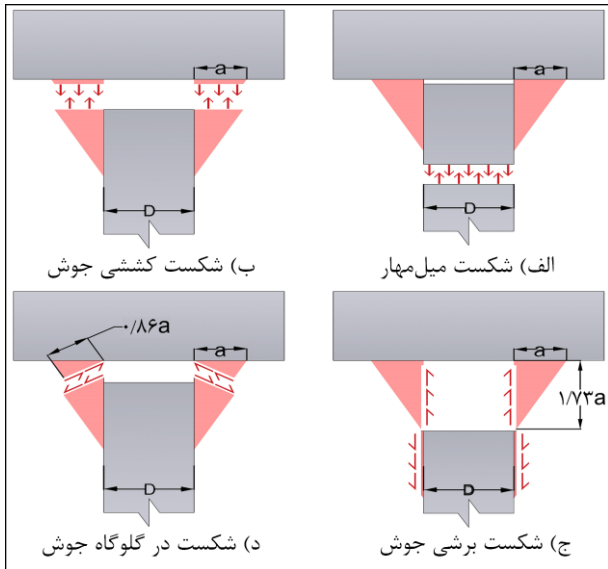
^۵ Nie & Dong

^۱ Björk

^۲ Barzegar

^۳ Tajik

پارامتر σ_w ماکزیمم ظرفیت کششی جوش در مد گسیختگی دوم، پارامتر D قطر میل مهاری، F_{uw} ماکزیمم ظرفیت کششی فلز جوش a بعد افقی جوش گوشه ویژه مطابق با شکل (۵-الف) می باشد. مقدار ظرفیت کششی جوش باید از مقدار ظرفیت نهایی میل مهاری بیشتر باشد تا شکست میل مهاری حاکم بر طرح باشد.



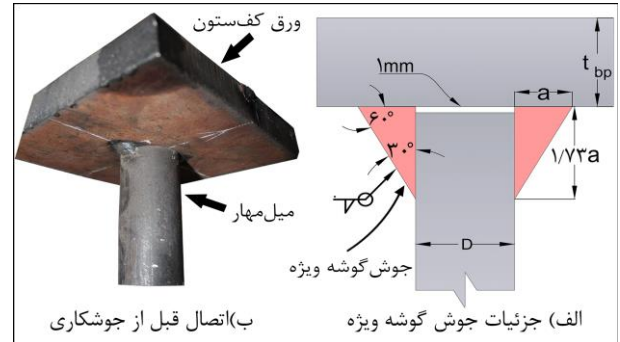
شکل ۵: اتصال جوش گوشه ویژه

شکل ۶: مدهای گسیختگی جوش گوشه ویژه تحت بارگذاری کششی مد گسیختگی سوم مرتبط با شکست برشی جوش بین بدنه بیرونی میل مهاری و جوش در شکل (۶-ج) نشان داده شده است. ظرفیت برشی مرتبط به این مد گسیختگی بر اساس رابطه (۳) تعیین شده است و ضریب کاهش مقاومت در رابطه (۳) برابر با 0.75 در نظر گرفته شده و پارامتر τ_w ماکزیمم ظرفیت برشی جوش در مد گسیختگی سوم می باشد.

$$T_u \leq \phi \tau_w = \phi \times ((1/73a)\pi D \times (0.16 F_{uw})) \quad (3)$$

مد گسیختگی چهارم مرتبط با شکست گلوئی موثر جوش گوشه مطابق با شکل (۶-د) می باشد. در آیین نامه [۱۰] AISC-۳۶۰ و [۲۳] AWS-D۱.۱ نیروی اعمالی به جوش گوشه استاندارد، به صورت برش خالص بر سطح گلوئی موثر جوش در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل (۷-الف) و بر اساس آیین نامه Eurocode ۳ [۸]، نیروی اعمالی به جوش گوشه با استفاده از روش جهتی^۱، به صورت تنش های عمودی و عرضی نسبت به صفحه گلوئی موثر جوش و تنش های موازی و عرضی نسبت به محور طولی جوش

جوش شده و جهت اصلاح، ابعاد جوش گوشه به اندازه کافی افزایش داده شد. جوش گوشه ویژه به صورت دورانی به دور سطح میل مهاری جوشکاری می شود و مطابق با شکل (۵-ب) میل مهاری بر ورق کفستون عمود می باشد.



برای ارزیابی مقاومت کششی اتصال جوش گوشه ویژه، از معیارهای طراحی بر اساس مدهای گسیختگی نشان داده شده در شکل (۶) استفاده شده است. طراحی ابعاد جوش گوشه ویژه بر اساس ماکزیمم نیروی گسیختگی کششی میل مهاری انجام شده و بقیه اجزای اتصال از قبیل ورق بال ستون و ورق کفستون در فرایند طراحی، الاستیک در نظر گرفته شدند تا میل مهاری به حد گسیختگی برسد. به عبارت دیگر طراحی کل اتصال جزء کششی توسط شکست میل مهاری کنترل می شود. بر اساس آیین نامه [۲۲] ACI-۳۱۸ و مطابق با شکل (۶-الف)، پارامتر T_u ماکزیمم ظرفیت کششی میل مهاری حاصل از مد گسیختگی اول (شکست میل مهاری) در نظر گرفته شده و در رابطه (۱) بیان شده است. در رابطه (۱) پارامتر A_s سطح مقطع میل مهاری و پارامتر f_{ur} ماکزیمم مقاومت کششی میل مهاری می باشند. انتظار می رود مد گسیختگی اول (شکست میل مهاری)، 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) نشان داده شده است و مقاومت کششی حاصل از این مد گسیختگی در رابطه (۲) محاسبه می شود. ضریب کاهش مقاومت (ϕ) در رابطه (۲) برابر با 0.75 می باشد.

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

^۱ Directional Method

تجزیه می‌شود. مطابق با آیین نامه ۳ Eurocode [۸]، طراحی ابعاد جوش گوشه بر اساس رابطه (۴) و (۵) تعیین می‌شود.

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{1/5} \leq f_u / (\beta_w \times \gamma_{M2}) \quad (4)$$

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

پارامتر σ_{\perp} ، تنش نرمال عمود بر سطح گلولی موثر جوش و τ_{\perp} تنش برشی مماس بر سطح گلولی موثر جوش و عمود بر محور طولی جوش می‌باشند. σ_{\parallel} معرف تنش نرمال عمود بر مقطع جوش و موازی با محور طولی جوش و τ_{\parallel} معرف تنش برشی مماس بر گلولی موثر جوش و موازی با محور طولی جوش می‌باشند. f_u ماکزیمم مقاومت کششی عضو ضعیف‌تر اتصال، β_w ضریب همبستگی برابر با ۱ و γ_{M2} ضریب ایمنی برابر با ۱/۲۵ در نظر گرفته شدند.

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

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

با جایگذاری روابط (۶) و (۷) در روابط (۴) و (۵)، ظرفیت مقاومتی جوش گوشه ویژه مرتبط با مد گسیختگی چهارم بر اساس روابط (۸) و (۹) تعیین می‌شود.

$$T_u \leq \frac{f_u \times D \times a \times \pi}{\beta_w \times \gamma_{M2} \times \sqrt{3}} \quad (8)$$

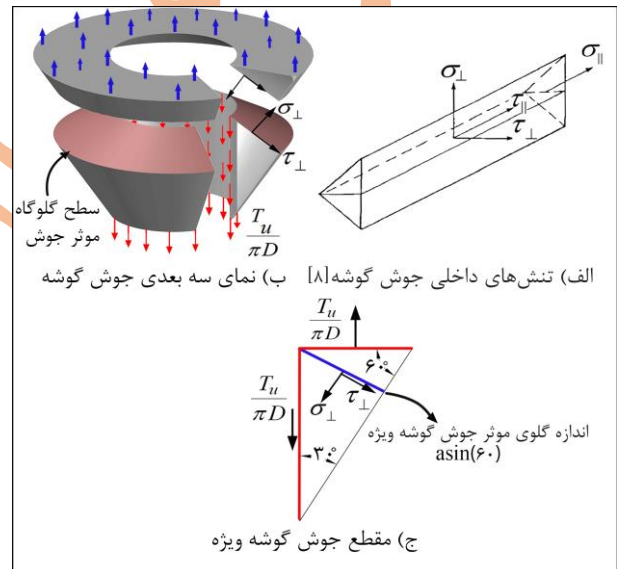
$$T_u \leq 0.9 \frac{f_u \times D \times a \times \pi}{\gamma_{M2}} \quad (9)$$

به دلیل وجود فاصله بین مرکز سطح مقطع جوش گوشه با بدنه میل‌مه‌ار، انتقال نیروی کششی به همراه خروج از مرکزیت می‌باشد. بنابراین آیین‌نامه‌ها، جوش‌های شیاری با نفوذ کامل را به دلیل انتقال نیرو بدون خروج از مرکزیت پیشنهاد می‌دهند که در قسمت بعدی توضیحات مربوطه داده شده است.

۲-۲- جوش شیاری با نفوذ کامل

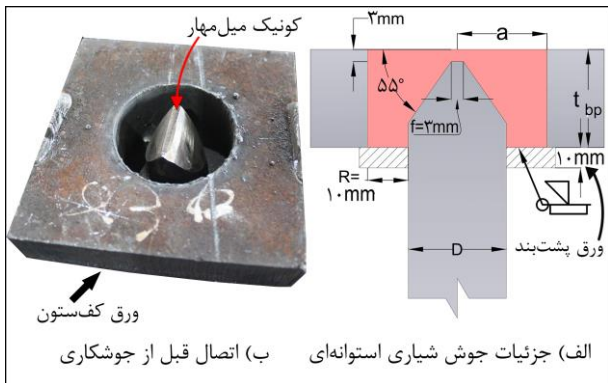
جوش‌های شیاری یکی دیگر از انواع جوش‌ها هستند که در ساخت اتصالات مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود. جوش شیاری با نفوذ کامل، نیروی کششی میل‌مه‌ار را بدون خروج از مرکزیت انتقال می‌دهد و باید آماده سازی‌هایی از قبیل کونیک‌دار کردن میل‌مه‌ارها برای اتصال جوش شیاری انجام شود. مطابق با شکل (۸-الف) و بر اساس آیین‌نامه AWS-D1.1 [۲۳] جهت ایجاد نفوذ کامل در جوش شیاری، دو طرف نوک میل‌مه‌ار با زاویه ۵۵ درجه کونیک‌دار شدند. جزئیات هندسی و پیکربندی کلی اتصال قبل از جوشکاری به ترتیب در شکل (۸-الف) و شکل (۸-ب) نشان داده شدند. مقادیر دهانه ریشه جوش (R) و پیشانی ریشه جوش (f) بر اساس آیین‌نامه AWS-D1.1، به ترتیب برابر با ۴ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. همچنین الکتروود مصرفی در این اتصال باید سازگار با فلز پایه (ورق کفستون) باشد.

مد گسیختگی مرتبط به شکست کششی جوش از سطح ورق کفستون، در شکل (۸-ج) نشان داده شده است و طراحی بعد افقی جوش شیاری (a) بر اساس ظرفیت کششی جوش طبق رابطه (۱۰) انجام شده است و ضریب کاهش مقاومت در این رابطه ۰/۷۵



شکل ۷: جزئیات هندسی و تنش‌های داخلی جوش گوشه ویژه برای طراحی محافظه‌کارانه ابعاد جوش گوشه ویژه، از روابط آیین‌نامه ۳ Eurocode در این پژوهش استفاده شده است. مطابق با شکل (۷-ب)، به دلیل اینکه جوش‌های گوشه به صورت 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} صرف نظر شده است. مطابق با شکل (۷-ج) و با استفاده از معادلات تعادل استاتیکی، مقادیر σ_{\perp} و τ_{\perp} به صورت روابط (۶) و (۷) تعیین می‌شوند.

میل‌مهاریها، دسترسی بهتر جوشکار برای جوشکاری کل فضای خالی و نفوذ بهتر فلز جوش می‌باشد.



شکل ۹: اتصال جوش شیاری استوانه‌ای

مطابق با آیین‌نامه AWS-D1.1 و دستورالعمل جوش‌های شیاری با نفوذ کامل، مقدار دهانه ریشه (R) برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و همچنین برای جلوگیری از ریزش فلز مذاب جوش از ناحیه پایینی ورق کفستون و ایجاد شرایط بهتر برای نفوذ کافی جوش، از ورق‌های پشت بند هم جنس 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 استوانه‌ای برای ورق‌های با ضخامت کم، با در نظر گرفتن حداکثر زاویه ۵۵ درجه برای کونیک کردن میل‌مهاریها استفاده شود. مطابق با شکل (۹-الف)، مقطع جوش شیاری استوانه‌ای مشابه با جوش شیاری نیم‌جناغی می‌باشد که حول محور مرکزی میل‌مهاری دوران داشته است. با در نظر گرفتن مقدار دهانه ریشه جوش به اندازه ۱۰ میلی‌متر و به دلیل قرار گرفتن میل‌مهاری زیر ناحیه بال سستون، احتمال گسیختگی برشی فلز جوش بین جوش و بدنه ورق کفستون در داخل اتصال و گسیختگی برش پانچ بسیار کم می‌باشد. طراحی این اتصال بر اساس ضوابط هندسی آیین‌نامه‌ای مخصوص جوش‌های شیاری انجام شد و انتظار می‌رود شکست میل‌مهاری حاکم بر طرح باشد.

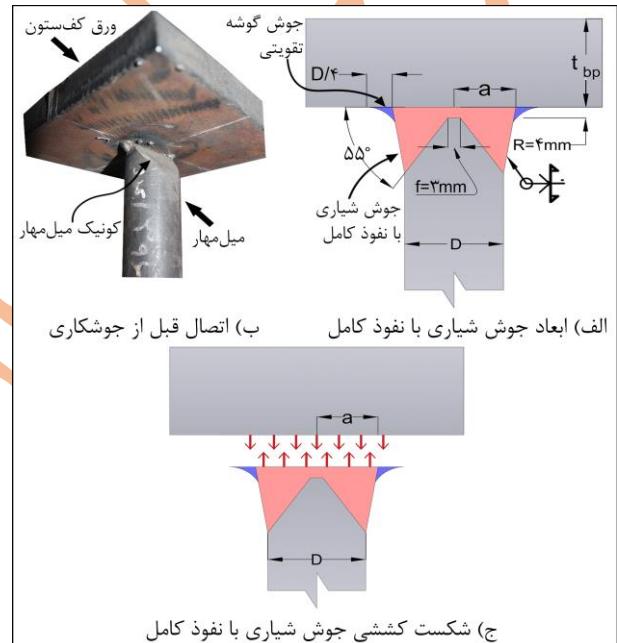
۲-۴- جوش شیاری مخروطی

در این اتصال جوشی، نیاز به سوراخ کردن ورق‌های کفستون به صورت نیم مخروطی می‌باشد. سپس میل‌مهاری مطابق با شکل (۱۰-الف) و (۱۰-ب) از ناحیه زیرین ورق کفستون در داخل سوراخ

می‌باشد. مقدار ظرفیت کششی جوش باید از مقدار ظرفیت نهایی میل‌مهاری بیشتر باشد تا شکست میل‌مهاری حاکم بر طرح شود.

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

در رابطه (۱۰) پارامتر σ_{wg} بیانگر ماکزیمم ظرفیت کششی جوش شیاری با نفوذ کامل مربوط به مد گسیختگی شکل (۸-ج) می‌باشد. همچنین برای کاهش تمرکز تنش در محل اتصال جوش شیاری به ورق و جلوگیری از ایجاد پدیده خستگی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای، در آیین‌نامه AISC-۳۶۰ استفاده از جوش گوشه تقویتی به اندازه یک چهارم قطر میل‌مهاری توصیه شده است.



شکل ۸: اتصال جوش شیاری با نفوذ کامل

۲-۳- جوش شیاری استوانه‌ای

در اجرای اتصال جوش شیاری استوانه‌ای، بعد از انجام عملیات سوراخ‌کاری در ورق، جوشکاری میل‌مهاری به ورق آغاز می‌شود. مطابق با شکل (۹-الف) و شکل (۹-ب)، سوراخی استوانه‌ای بزرگ‌تر از قطر میل‌مهاری در ورق کفستون ایجاد و سپس بر انتهای میل‌مهاری، کونیک دو طرفه ۵۵ درجه با دستگاه برش زده می‌شود. با قرار دادن قسمت کونیک شده میل‌مهاری در داخل سوراخ از ناحیه زیرین ورق کفستون، جوشکاری فضای خالی بین میل‌مهاری و ورق کفستون از ناحیه بالایی ورق کفستون انجام می‌شود. علت کونیک دار کردن

قرار داده شده و از ناحیه بالای ورق کفستون، جوشکاری فضای خالی به صورت دورانی انجام می‌شود. در اتصال جوش شیاری استوانه‌ای برای دسترسی بهتر، میل‌مهاری با زاویه مشخص کونیک شدند اما در اتصال جوش شیاری مخروطی، ورق‌های کفستون مطابق با ضوابط آیین‌نامه AWS-D1.1، با زاویه ۴۰ درجه به وسیله دستگاه برش CNC با مته مخصوص نیم مخروطی شکل سوراخ می‌شوند. با توجه به شکل (۱۰-الف)، مقطع جوش شیاری مخروطی شبیه به جوش شیاری نیم جناغی می‌باشد که حول محور مرکزی میل‌مهاری داشته است. مطابق با آیین‌نامه AWS-D1.1، مقدار دهانه ریشه جوش (R) و جزئیات هندسی اتصال در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده است. اندازه بعد a برای جوش شیاری مخروطی به ضخامت ورق کفستون و اندازه دهانه ریشه جوش شیاری بستگی دارد. در این اتصال نیز همانند اتصال قبلی، 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، اندازه بعد افقی a، حجم فلز جوش مورد استفاده افزایش می‌یابد. طراحی جوش شیاری مخروطی نیز بر اساس ضوابط آیین‌نامه AWS-D1.1 انجام شد. انتظار می‌رود حالت شکست میل‌مهاری حاکم بر طرح باشد و همچنین در مورد جزئیات این نوع اتصالات در آیین‌نامه‌های طراحی جوش، جزئیاتی ارائه نشده است و هدف از این پژوهش، طراحی اتصالات بر اساس ضوابط آیین‌نامه و مدهای گسیختگی می‌باشد.

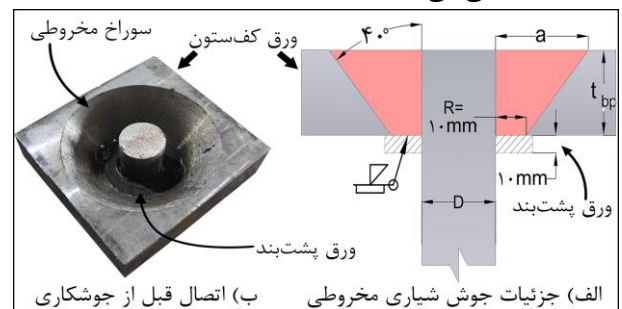
نتایج تست‌های کشش جهت تعیین مشخصات مکانیکی قسمتی از مصالح میلگرد CK۴۵ و CK۶۰ با قطر ۲۵ میلی‌متر و ورق‌های فولادی St۵۲ نورد شده با ضخامت ۲۰ میلی‌متر در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. متناسب با فلز ورق کفستون از الکتروود نوع EA۰۱۸ با مقاومت کششی نهایی ۵۵۲ مگاپاسکال برای جوشکاری اتصالات جوشی استفاده شده است.

جدول شماره (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٪

۳-۲- طراحی و مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی به طوری ساخته شده‌اند که در هر نمونه، دو جزء کششی T-شکل بدون خروج از مرکزیت میل‌مهاری نسبت به بال‌ستون به همراه اتصالات 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



شکل ۱۰: اتصال جوش شیاری مخروطی

به دلیل قرار گرفتن میل‌مهاری زیر ناحیه بال‌ستون، نیروی کششی به صورت مستقیم از میل‌مهاری به بال‌ستون منتقل می‌شود و ورق کفستون به عنوان عضو رابط عمل می‌کند. در اتصالات جوش گوشه ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل که نیازی به سوراخ‌کاری ورق کفستون نمی‌باشد، نیروی محوری در جهت عمود

کشش افزایش یافت تا لغزشی بین فک و سطح ورق بال ستون ایجاد نشود.

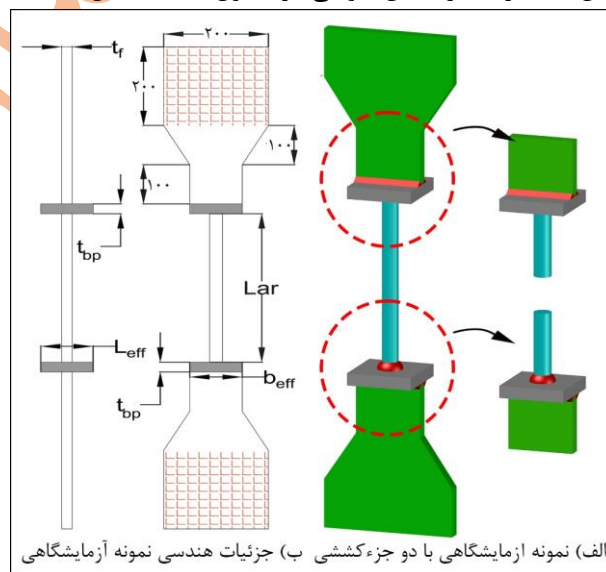
جدول شماره (۲) - ابعاد هندسی نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر

نمونه	نوع میلگرد	D	L_r	t_{bp}	B_{eff}	L_{eff}	t_f
C۲۵-۱	CK۴۵	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
C۲۵-۲	CK۴۵	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
D۱	CK۶۰	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
D۲	CK۶۰	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
D۳	CK۶۰	۲۵	۴۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰

در نمونه C۲۵-۱، اتصال T-شکل اول با جوش گوشه ویژه و اتصال T-شکل دوم با جوش شیاری با نفوذ کامل می‌باشد. در نمونه C۲۵-۲، دو اتصال جوش شیاری مخروطی و جوش شیاری استوانه‌ای با ابعاد تعیین شده مرتبط با میل‌مهارهای مشخص وجود دارند. در نمونه D۱ جوش گوشه ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل، در نمونه D۲ جوش گوشه ویژه و جوش شیاری مخروطی و در نمونه D۳ جوش گوشه ویژه و جوش شیاری استوانه‌ای قرار داده شده‌اند. استفاده از دو اتصال جوشی مختلف در یک نمونه آزمایشگاهی، به دلیل انجام تست کشش برای دو اتصال جوشی به صورت همزمان جهت مقایسه بین آن‌ها در نیرویی برابر می‌باشد و در اکثر نمونه‌های آزمایشگاهی به دلیل پرکاربرد بودن جوش گوشه ویژه، از این اتصال استفاده شده است. برای جلوگیری از مصرف میل‌مهارهای شکل‌پذیر با قطر بزرگتر یا تعداد بیشتر و صرفه‌جویی در مصرف فلز جوش، پیشنهاد به استفاده از میل‌مهارهای پرمقاومت برای ستون‌های با ظرفیت بالاتر می‌شود. بنابراین از ابعاد اتصالات جوشی طراحی شده مخصوص میل‌مهار CK۴۵، برای نمونه‌های حاوی میل‌مهار CK۶۰ استفاده شده است. به عبارت دیگر طراحی ابعاد اتصالات جوشی میل‌مهارها در نمونه‌های D۱، D۲ و D۳ بر اساس نیروی گسیختگی میل‌مهار CK۶۰ نمی‌باشد و از ابعاد ارائه شده در جدول (۳) برای اتصالات جوشی این نمونه‌ها استفاده شده است. به عبارت دیگر بدون تغییر در ابعاد اتصالات جوشی، مقاومت میل‌مهار مصرفی افزایش یافته است تا عملکرد هر اتصال در این حالت سنجیده شود.

مقاومت، مقایسه انواع اتصالات جوشی و نوع شکست میل‌مهارها ساخته شدند و تحت آزمایش‌های کشش مستقیم قرار گرفتند. برای صرفه‌جویی در مصرف تعداد بالای میل‌مهارهای CK۴۵ برای ستون‌هایی با ظرفیت نیرویی بالاتر، استفاده از میل‌مهارهای پرمقاومت CK۶۰ در اتصالات کف‌ستون مورد بررسی به همراه اتصالات جوشی پیشنهاد شده است.

جهت ایجاد فضای کافی برای شکل‌پذیری و باریک‌شدگی^۱ میل‌مهارها، میل‌مهارهایی با طول ۴۰ سانتی‌متر در هر نمونه استفاده شدند. بر اساس هندسه جزء کششی T-شکل و آیین‌نامه ACI-۳۱۸ [۲۲]، مقدار عرض و طول موثر برای ورق کف‌ستون جزء کششی، چهار برابر قطر میل‌مهار مصرفی در هر نمونه، در نظر گرفته شده است که این مقدار، حداقل فاصله مجاز آیین‌نامه‌ای میل‌مهارها از یکدیگر در فونداسیون بتنی می‌باشد. ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (۱۱-ب) بر اساس ضوابط تعیین شده برای هر اتصال جوشی در جدول (۲) مشخص شدند.



شکل ۱۱: نمای روبه‌رو و جانبی نمونه آزمایشگاهی

طبق فرضیات طراحی، ورق بال ستون و ورق کف‌ستون در حین بارگذاری باید الاستیک باقی بمانند. به همین دلیل بر اساس نیروی گسیختگی میل‌مهار، مقدار ضخامت ورق بال ستون در نمونه‌های آزمایشگاهی برابر با ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین قسمتی از عرض ورق بال ستون در محل قرارگیری فک‌های دستگاه

^۱ Necking

بازرسی‌های چشمی^۲ مطابق الزامات آیین‌نامه AWS-B1.10M [۲۵] انجام شدند و نقصی در بازرسی مشاهده نشد.

۳-۳ - ستاپ آزمایشگاهی و جمع‌آوری داده‌ها به روش همبستگی تصاویر دیجیتال

برای تست کشش هر نمونه آزمایشگاهی، از دستگاه کشش مستقیم Schenck با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتون استفاده شد. تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف تست شدند. نمونه‌های آزمایشگاهی توسط فک‌های نگهدارنده دستگاه کشش مستقیم مطابق با شکل (۱۲) نگه داشته شدند. دستگاه Schenck مجهز به وسیله اندازه‌گیری تغییر مکان سنج خطی^۴ بود که به وسیله آن نمودار نیرو-جاب‌جایی هر نمونه تهیه شد. در حین انجام تست‌ها با کمترین سرعت بارگذاری، از روش همبستگی تصاویر دیجیتال [۲۶ و ۲۷] برای بررسی میدان کرنش و جابه‌جایی‌های هر نقطه از سطح میل‌مه‌ار در هر لحظه از آزمایش کشش استفاده شد. با افزایش سرعت بارگذاری در ناحیه الاستیک، هیچ تغییری در مشخصات مکانیکی مصالح و نتایج رخ نمی‌دهد. اما در ناحیه پلاستیک به دلیل فراهم نبودن زمان جهت ایجاد شکل‌پذیری، تنش تسلیم و گسیختگی میل‌مه‌ار افزایش می‌یابد [۲۸ و ۲۹] و در این پژوهش تحلیل حساسیت به سرعت بارگذاری و اثر آن بر نتایج اتصالات جوشی انجام نشد. همچنین از افزایش سرعت بارگذاری به دلیل تعداد عکس‌برداری‌های زیاد متوالی و سنجش میدان کرنش در هر لحظه از آزمایش جلوگیری شد. در این روش از یک دوربین عکس‌برداری مدل CANON ۱۲۰۰D با کیفیت ۱۸ مگاپیکسلی که دارای لنز با فاصله کانونی ۵۵-۱۸ میلی‌متر بود مطابق با شکل (۱۲) به کار برده شد.

برای استفاده از این روش، در ابتدا باید سطح میل‌مه‌ار مطابق با شکل (۱۳-الف) عاری از هرگونه گرد و لکه باشد. سپس باید با اسپری رنگ مشکی روی سطح میل‌مه‌ار را مطابق با شکل (۱۳-ب) به صورت کامل پوشاند و بعد از خشک شدن رنگ مشکی، اسپری رنگ سفید را با مقدار خیلی کم روی سطح مشکی، به صورت نقطه‌ای و با تراکم مناسب مطابق با شکل (۱۳-ج) پاشید. سپس

برای طراحی ابعاد جوش گوشه ویژه، در ابتدا مقدار نیروی گسیختگی میل‌مه‌ارهای CK۴۵ به عنوان بیشترین نیروی کششی اعمالی به اتصالات جوشی، طبق رابطه (۱) محاسبه شد و با استفاده از روابط (۲)، (۳)، (۸) و (۹) مقدار ماکزیمم بعد افقی a برای جوش گوشه ویژه تعیین شد. برای طراحی ابعاد جوش شیاری با نفوذ کامل نیز با استفاده از رابطه (۱۰) مقدار بعد افقی a مخصوص جوش شیاری با نفوذ کامل تعیین شده است. برای طراحی جوش شیاری استوانه‌ای و جوش شیاری مخروطی، مقدار دهانه ریشه جوش برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و بقیه ابعاد بر اساس ضوابط آیین‌نامه AWS-D1.1 تعیین شدند. در طراحی جوش شیاری مخروطی، مقدار ضخامت ورق‌های کفستون و ریشه جوش ملاک طراحی می‌باشند و با توجه به ضخامت ۲۵ میلی‌متری ورق کفستون، مقدار بعد a برای این اتصال جوشی تعیین شده است. در جدول (۳) مقادیر طراحی شده بعد a برای هر اتصال جوشی مشخص شده است.

جدول شماره (۳) - ابعاد هندسی اتصالات جوشی (بر حسب میلی‌متر)

اتصال جوشی	معیار حاکم	بعد طراحی شده a
		D۲۵ - CK۴۵ $t_{bp}=۲۵\text{mm}$
جوش گوشه ویژه	رابطه ۸	۱۵
جوش شیاری با نفوذ کامل	رابطه ۱۰	۱۶
جوش شیاری استوانه‌ای	R , D	۲۲/۵
جوش شیاری مخروطی	R , t_{bp}	۳۱

در جوشکاری اتصالات، از روش جوشکاری قوسی با گاز محافظ^۱ استفاده شد. در این روش با استفاده از قوسی که بین فلز پرکننده مصرف‌شدنی (فیلر) و حوضچه جوش به وجود می‌آید، فیلر ذوب شده و اتصال قطعات برقرار می‌شود و برای ایجاد قوس، از گاز کربن‌دی‌اکسید استفاده شده است. برای اتصال جوش بین میل‌مه‌ارها و ورق کفستون از الکتروود^۲ E۸۰۱۸ و برای اتصال جوش شیاری با نفوذ کامل بین ورق کفستون و بال ستون از الکتروود EY۰۱۶ استفاده شد. بعد از اتمام جوشکاری دستی،

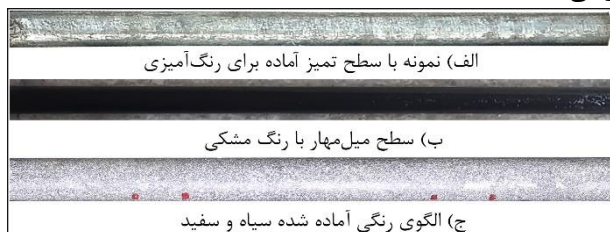
^۲ Visual Testing (VT)

^۴ Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

^۱ Gas Metal Arc Welding (GMAW)

^۲ Electrode Welding

تحلیل نیز میدان کرنش همه نمونه‌ها به صورت کانتورهای رنگی نشان داده شدند. از کانتورهای رنگی میدان کرنش جهت تشخیص نوع شکست شکل پذیر یا تردگونه میل‌مهاریا، وضعیت باریک‌شدگی میل‌مهاریا قبل از شکست و وضعیت الاستیک باقی ماندن اتصالات جوشی استفاده شده است.



شکل ۱۳: الگوی رنگی مخصوص روش همبستگی تصاویر دیجیتال نمونه‌ها، تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند و در نمونه‌های دارای میل‌مهاریا CK60 که شکست میل‌مهاریا در هر نمونه در ناحیه HAZ نزدیک به اتصالات جوشی رخ داده بود، در دو مرحله تست کشش مطابق با شکل (۱۴-الف) و (۱۴-ب) انجام شد. در نمونه‌های دارای میل‌مهاریا CK60، تست مرحله دوم جهت تعیین ظرفیت مقاومتی اتصال جوشی به صورت تک انجام شد. به دلیل اینکه میل‌مهاریاها پرمقاومت در حین شکست در مرحله اول، با توجه به میدان‌های کرنش، مقادیر کرنش بسیار کمی نسبت به کرنش گسیختگی نهایی میل‌مهاریا داشتند و به طور کامل به کرنش گسیختگی نرسیده و همچنان تقریباً الاستیک باقی ماندند، می‌توان در مرحله دوم با قرار دادن قسمت گسیخته شده در درون فک و حذف این قسمت از مشارکت در تحمل نیروی کششی، آزمایش کشش روی اتصال جوشی به صورت تک را انجام داد.



شکل ۱۴: نمونه‌های آزمایشگاهی در مرحله اول و دوم تست کشش

۴- نتایج آزمایشات

کیفیت الگوی رنگی سیاه و سفید آماده شده، توسط نرم افزار GOM-Correlate [۲۸]، بررسی شد. همچنین به جهت تنظیم نور محیط و افزایش دقت عکس‌برداری از سطح الگوی رنگی، از یک پروژکتور نور مدل AVLK5۷۶LED استفاده شد.



شکل ۱۲: محیط آزمایشگاه- (۱) دستگاه کشش- (۲) فک ثابت (۳) فک متحرک- (۴) تغییر مکان سنج خطی- (۵) نمونه آزمایشگاهی (۶) دوربین عکس‌برداری- (۷) سه پایه- (۸) لب تاپ- (۹) نورپردازی برای جلوگیری از لرزش دوربین و حفظ ارتفاع آن، یک سه پایه به همراه دوربین در فاصله ۱ متری از نمونه آزمایشگاهی قرار گرفت و در حین آزمایش کشش، در هر ۱۵ ثانیه یک عکس از سطح الگوی رنگی میل‌مهاریا گرفته شد و اطلاعات عکس با یک کابل رابط به لب تاپ جهت ذخیره اطلاعات عکس منتقل می‌شد. در انتها نیز با استفاده از مقدار نیروی مشخص شده در دستگاه کشش در هر لحظه از آزمایش و مقدار جابه‌جایی به دست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و انجام فرایند تحلیل در نرم افزار GOM-Correlate [۲۸]، نمودار نیرو-جابه‌جایی و میدان کرنش سطح میل‌مهاریا از این روش نوین تهیه شد. در مرحله فرایند تحلیل در نرم افزار GOM-Correlate، اندازه وجهی^۱ و فاصله نقطه‌ای از هم به ترتیب ۲۱ و ۱۶ پیکسل در نظر گرفته شد و در انتهای

^۱ Facet size

در پایان آزمایش‌های انجام شده، در همه نمونه‌ها ورق‌های کفستون متصل به میل‌مهار تا لحظه شکست میل‌مهار، الاستیک باقی ماندند و در هیچ کدام از نمونه‌ها در حین آزمایش، لایه لایه شدن یا پارگی ورق کفستون رخ نداد. نوع شکست میل‌مهاری بر اساس مقایسه نیرو و کرنش حین شکست میل‌مهار با نیرو و کرنش گسیختگی میل‌مهار با توجه به جدول (۱) مشخص شده است. نتایج هر تست آزمایشگاهی در جدول (۴) بیان شده است. همچنین نتایج نمودارهای نیرو-جابجایی به دست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال با نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل شده از دستگاه کشش، تقریباً مطابقت داشتند.

مقادیر کرنش قبل از شکست میل‌مهار و محل شکست میل‌مهار در نمونه‌های C۲۵-۱ و C۲۵-۲ به ترتیب در شکل‌های (۱۵-الف)، (۱۵-ب)، (۱۵-د) و (۱۵-ه) نشان داده شده‌اند. به دلیل نمایان بودن

اتصالات جوشی در نمونه C۲۵-۱ و مقادیر کرنش خیلی کم در جوش‌ها، نتیجه‌گیری شد که تا آخرین لحظه از بارگذاری، اتصالات جوش گوشه ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل، الاستیک باقی ماندند. بقیه اتصالات جوشی نمایان نبودند. به دلیل باریک‌شدگی به همراه کرنش‌های زیاد، کرنش در محل شکست نمونه C۲۵-۱، مقدار بیشتری نسبت به کرنش در محل باریک‌شدگی نمونه C۲۵-۲ دارد. بر اساس نیروی حین شکست میل‌مهاری در هر دو نمونه C۲۵-۱ و C۲۵-۲ مطابق با شکل‌های (۱۵-ج) و (۱۵-ی) هر چهار نوع اتصال جوشی، توانایی تحمل نیروی گسیختگی میل‌مهاری مصرفی را داشتند و آسیبی در اتصالات ایجاد نشد. همچنین برای میل‌مهاری معمولی CK۴۵ در هر دو نمونه مربوطه، شکست در ناحیه HAZ رخ نداد.

جدول شماره (۴) - نتایج تست‌های آزمایشگاهی

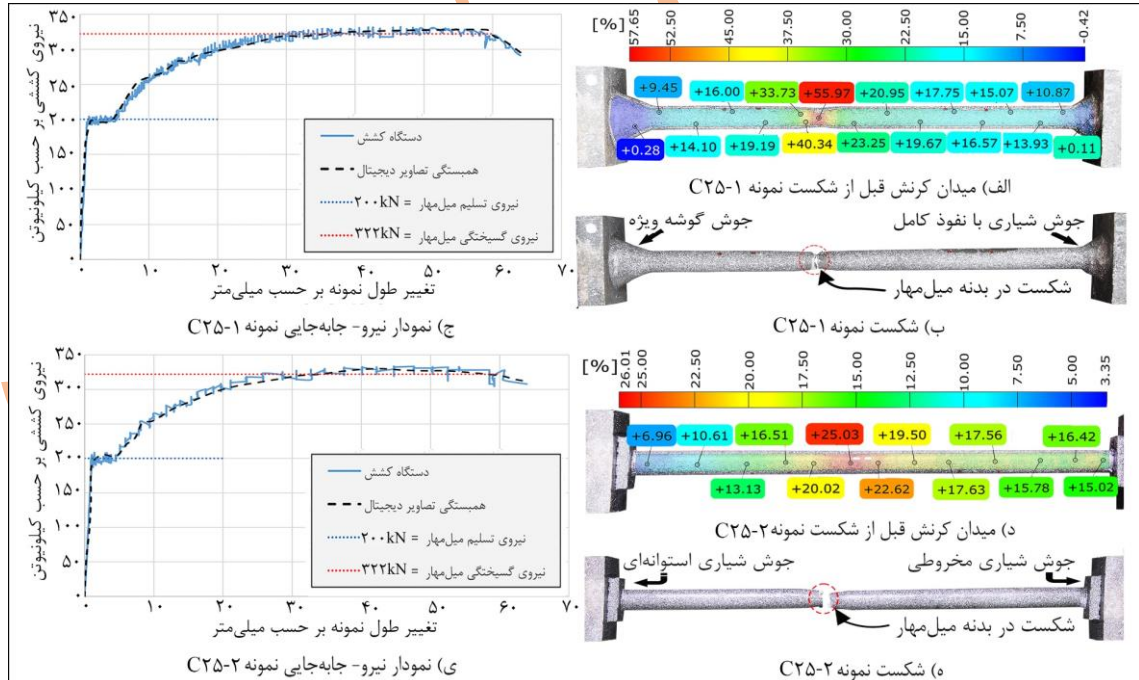
نمونه	نوع میل‌مهار	نوع اتصال جوشی	ماکزیمم نیروی میل‌مهار KN	ماکزیمم کرنش میل‌مهار %	تغییر طول نهایی mm	نوع شکست	محل شکست
C۲۵-۱	CK۴۵	جوش گوشه ویژه جوش شیاری با نفوذ کامل	۳۰۰	۵۵/۹۷	۶۴	شکل‌پذیر	وسط میل‌مهار - شکل (۱۵-ب)
C۲۵-۲	CK۴۵	جوش نفوذی استوانه‌ای جوش شیاری مخروطی	۳۱۰	۲۵/۰۳	۶۳	شکل‌پذیر	وسط میل‌مهار - شکل (۱۵-ه)
D۱	CK۶۰	جوش گوشه ویژه جوش شیاری با نفوذ کامل	۳۰۰	۱/۴	۳	ترد	نزدیک به جوش شیاری با نفوذ کامل HAZ شکل (۱۶-ب)
*D۱	CK۶۰	جوش گوشه ویژه	۴۷۰	۱۵/۱۴	۲۶	شکل‌پذیر	نزدیک به فک - شکل (۱۶-د)
D۲	CK۶۰	جوش گوشه ویژه جوش شیاری مخروطی	۳۱۰	۱/۳۴	۳	ترد	نزدیک به جوش گوشه ویژه HAZ شکل (۱۷-ب)
*D۲	CK۶۰	جوش شیاری مخروطی	۴۴۰	۱۱/۵۲	۹/۸	ترد	نزدیک به جوش نفوذی مخروطی HAZ شکل (۱۷-د)
D۳	CK۶۰	جوش گوشه ویژه جوش شیاری استوانه‌ای	۳۴۰	۲/۷۵	۳/۶	ترد	نزدیک به جوش گوشه ویژه HAZ شکل (۱۸-ب)
*D۳	CK۶۰	جوش شیاری استوانه‌ای	۴۱۰	۸/۷۶	۴/۵	ترد	نزدیک به جوش نفوذی استوانه‌ای HAZ شکل (۱۸-د)
نیروی تسلیم و گسیختگی میل‌مهار مصرفی CK۴۵ به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۳۲۲ کیلونیوتن می‌باشند.							
نیروی تسلیم و گسیختگی میل‌مهار مصرفی CK۶۰ به ترتیب برابر با ۲۵۰ و ۴۵۶ کیلونیوتن می‌باشند.							

بارگذاری، الاستیک باقی ماندند. جزئیات مربوط به کلیه نتایج نمونه‌های D1، D2 و D3، به ترتیب در شکل‌های (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده‌اند. در مرحله اول برای هر نمونه آزمایشگاهی ذکر شده، اتصالات جوشی مورد بررسی به دلیل اثر حرارت در ناحیه HAZ توانایی تحمل نیروی تسلیم میل‌مهار را داشته و در مرحله دوم در همین نمونه‌ها، اتصالات جوشی به صورت تکی، تقریباً توانایی تحمل نیروی گسیختگی میل‌مهارها را داشتند.

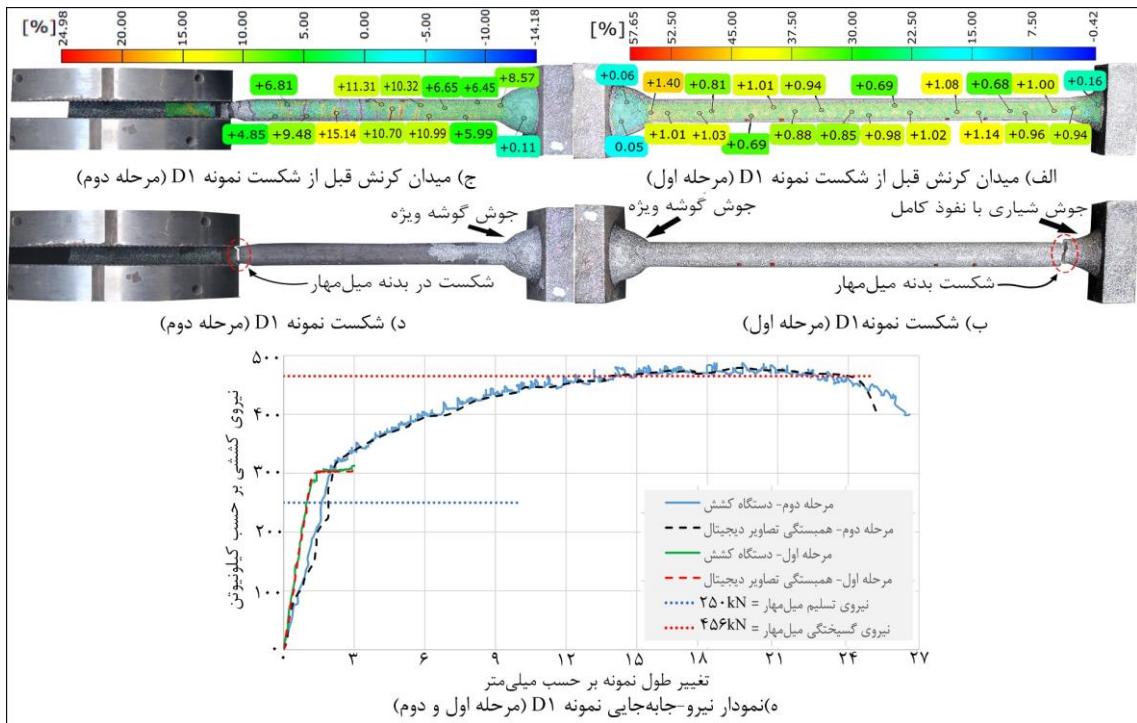
شکست شکل‌پذیر میل‌مهار در مرحله دوم تست نمونه D1 در محل نزدیک به فک دستگاه، به دلیل اعمال نیروی عرضی فشاری از طرف فک و کشش طولی در میل‌مهار حین آزمایش بود. تنش‌های بحرانی ایجاد شده در لبه فک، اثر بحرانی‌تری نسبت به اثر حرارت جوشکاری در ناحیه HAZ اتصال جوش گوشه ویژه به دلیل حجم جوشکاری کم داشتند. اما در تست دوم نمونه‌های D2 و D3 به دلیل حجم جوشکاری زیاد در اتصالات جوش شیاری مخروطی و استوانه‌ای، اثر حرارت ناشی از جوشکاری در ناحیه HAZ، بحرانی‌تر از ناحیه فک بود.

در نمونه‌های D1، D2 و D3، شکست تمامی میل‌مهارها به جز تست دوم در نمونه D1 در هر مرحله به صورت ترد و شکننده رخ داده بود. در مرحله اول تست کشش هر نمونه، مواردی همچون خطای ساخت ایجاد شده ناشی از جوشکاری و ضعف مقاومت در ناحیه جوشکاری شده، باعث ایجاد شکست میل‌مهارها در منطقه HAZ به همراه کاهش ظرفیت نیروی میل‌مهار شدند. به دلیل شکست میل‌مهارها در هر دو مرحله در نمونه‌های دارای میل‌مهار مصرفی CK60 با کرنشی کمتر از کرنش گسیختگی، نوع شکست میل‌مهار نزدیک به اتصالات جوشی به صورت ترد و زود هنگام می‌باشد. بنابراین جهت جلوگیری از شکست ترد میل‌مهارهای پر مقاومت به همراه کاهش نیرو در ناحیه HAZ، اجرای عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش در حین جوشکاری اتصالات جوشی مخصوصاً اتصال جوش شیاری مخروطی و استوانه‌ای به دلیل حجم و حرارت زیاد جوشکاری، الزامی است.

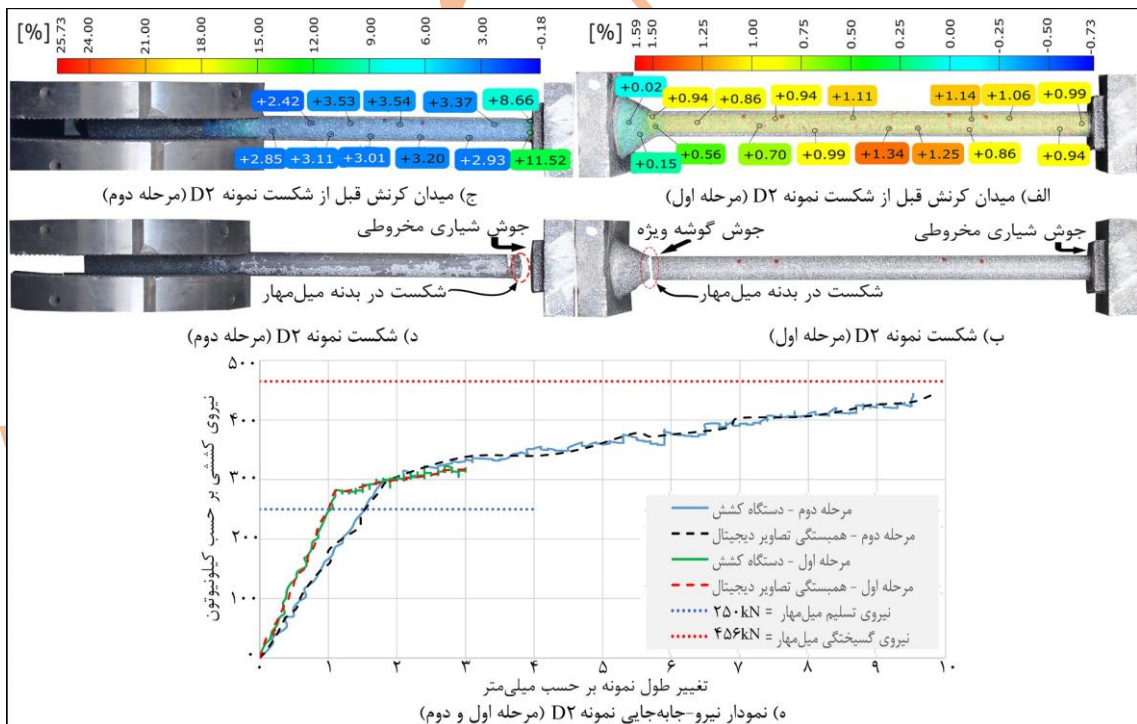
برای اتصالات جوشی نمایان از جمله جوش گوشه ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل، مقادیر کرنش بسیار کمی نسبت به بقیه نواحی میل‌مهار مشاهده و نتیجه‌گیری شد که جوش‌ها تا آخرین لحظه



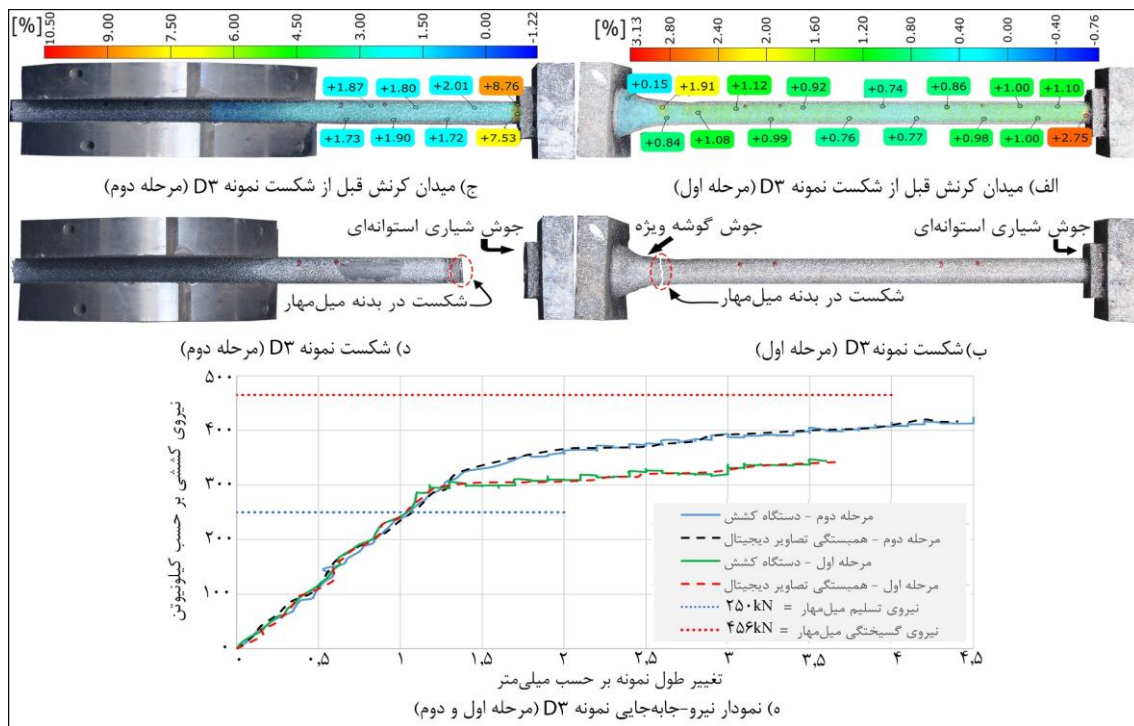
شکل ۱۵: نتایج و نمودارهای نمونه C25-1 و C25-2



شکل ۱۶: نتایج و نمودارهای نمونه D1



شکل ۱۷: نتایج و نمودارهای نمونه D2



شکل ۱۸: نتایج و نمودارهای نمونه D3

۵ - نتیجه گیری

از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای مشخص کردن میدان کرنش سطوح مورد بررسی، تعیین نوع شکست میل مهارها و رسم نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه استفاده شد. در نمونه‌های دارای میل مهار معمولی CK45، شکست میل مهارها با توجه به مقادیر کرنش، از نوع شکل پذیر بودند و چهار نوع اتصال جوشی معرفی شده در این نمونه‌ها توانایی تحمل ظرفیت نهایی کششی میل مهارها را داشتند و تا لحظه نهایی، سالم و الاستیک باقی ماندند. در نمونه‌های دارای میل مهار پرمقاومت CK60، شکست میل مهارها در نیروی نهایی برابر با نیروی گسیختگی و با توجه به مقادیر کرنش کمتر از کرنش نهایی، به صورت کاملاً تردگونه و زود هنگام به دلیل ضعف میل مهار پرمقاومت در برابر جوشکاری، در ناحیه HAZ رخ دادند. بنابراین نوع میل مهار انتخابی برای اتصالات کفستون مورد بررسی بسیار مهم می‌باشد. البته با انجام عملیات پیش گرمایش و پس گرمایش می‌توان از ایجاد شکست‌های ترد واقع در ناحیه HAZ برای انواع مختلف اتصال جوشی میل مهار جلوگیری کرد. در همه نمونه‌های دارای میل مهار پرمقاومت، هر ۴ نوع اتصال جوشی تا لحظه نهایی آزمایش، سالم و الاستیک باقی ماندند.

در اتصالات کفستون نمایان، به دلیل عدم تماس ورق کفستون و بتن بعد از غیر خطی شدن میل مهارها در حین بارگذاری، پینچینگ در نمودار هیستریزس اتصال کفستون رخ می‌دهد. به دلیل قرار گرفتن میل مهار زیر ورق کفستون توسط اتصالات جوشی در ناحیه زیرین بالستون و فعال شدن عملکرد فشاری-کششی میل مهارها حین بارگذاری، عامل ایجاد پینچینگ در نمودار هیستریزس اتصال کفستون حذف می‌شود. در این پژوهش خروج از مرکزیت بین میل مهار و بالستون در اتصالات کفستون مورد بررسی نیز حذف شدند. تعداد چهار نوع جوش معرفی شده به نام‌های جوش گوشه ویژه، جوش شیاری با نفوذ کامل، جوش شیاری استوانه‌ای و جوش شیاری مخروطی برای ارزیابی مقاومت کششی اتصال جوشی میل مهار تحت کشش به ورق کفستون مورد بررسی قرار گرفتند و هدف اصلی، حفظ مقاومت در اتصالات جوشی نسبت به نیروی گسیختگی میل مهارها بود. بر اساس جنس میل مهارهای مختلف، دو اتصال T-شکل جوشی متفاوت از هم، در پنج نمونه آزمایشگاهی مطابق با ضوابط آیین‌نامه جوشکاری، طراحی و ساخته شدند و تحت بار کششی قرار گرفتند.

همچنین ورق کفستون و اتصال‌های جوشی با توجه به مقادیر کرنش در هر ناحیه، همگی الاستیک باقی ماندند. نتایج نمودارهای نیرو-جاب‌جایی به دست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال با نمودارهای نیرو-جاب‌جایی حاصل شده از دستگاه کشش، تقریباً مطابقت داشتند.

جوش گوشه ویژه، به دلیل نداشتن عملیات تراشکاری و آماده‌سازی ورق، هزینه کمتری نسبت به بقیه جوش‌ها داشت. به دلیل پیکربندی جوش گوشه ویژه، نیروی محوری میل‌مهار بر خلاف بقیه اتصالات جوشی، به صورت با خروج از مرکزیت به ورق منتقل می‌شود. جوش شیاری با نفوذ کامل به دلیل حجم کم عملیات تراشکاری نسبت به جوش‌های شیاری مخروطی و استوانه‌ای، اجرای آسان‌تر و هزینه کم‌تر دارد. در اتصال جوش گوشه و جوش شیاری با نفوذ کامل، به دلیل عدم نیاز به سوراخ‌کاری در ورق و احتمال لایه لایه شدن در ورق کفستون، باید تست‌های التراسونیک جهت اطمینان از کیفیت مصالح ورق انجام شوند. همچنین جهت جلوگیری از ایجاد این پدیده، توصیه می‌شود از اتصالات جوش شیاری مخروطی یا استوانه‌ای به دلیل فرارگیری در سوراخ ایجاد شده در ورق، استفاده شود.

در جوش شیاری مخروطی و استوانه‌ای، هزینه و زمان انجام فرایند جوشکاری زیاد است. توصیه می‌شود از اتصالات جوشی مخروطی یا استوانه‌ای برای ورق‌های با ضخامت بالا به دلیل 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 استوانه‌ای، استفاده نشود. بنابراین برای ضخامت‌های زیاد ورق، اتصال جوش شیاری استوانه‌ای، غیر اجرایی و اتصال جوش شیاری مخروطی، غیر اقتصادی می‌باشد.

همچنین به دلیل حجم زیاد جوشکاری در اتصالات جوش شیاری مخروطی و استوانه‌ای، حرارت اعمال شده به اتصال، زیاد می‌باشد و شکست ناشی از حرارت در ناحیه HAZ این اتصالات بسیار محتمل‌تر نسبت به اتصالات جوش گوشه ویژه و جوش شیاری با نفوذ کامل می‌باشد.

در نتیجه جوش گوشه از لحاظ هزینه و اجرا با توجه به انجام تست‌های التراسونیک روی ورق، اولویت اول را نسبت به بقیه جوش‌ها دارد. جوش شیاری با نفوذ کامل نیز با توجه به عملیات

تراشکاری، در اولویت دوم قرار گرفته و جوش شیاری مخروطی و جوش شیاری استوانه‌ای نیز با توجه به شرایطی خاص به ترتیب اولویت سوم و چهارم را در اجرا و هزینه دارند.

در تمام نمونه‌ها هیچ شکست تردگونه‌ای در نیرویی کمتر از نیروی تسلیم میل‌مهارها رخ نداد و اتصالات جوشی در برابر ظرفیت نهایی میل‌مهارها مقاوم بودند. در نتیجه برای جلوگیری از رفتار تردگونه و شکست‌های زودهنگام ناشی از ضعف میل‌مهار پر مقاومت در برابر جوشکاری در ناحیه HAZ در اتصالات جوشی، توصیه می‌شود علاوه بر انجام عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش در حین جوشکاری، میل‌مهارهای جوش شده به ورق طبق آیین‌نامه‌ها به صورت الاستیک طراحی شوند و نیرو-کنترل باقی بمانند.

تقدیر و تشکر

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

منابع

- [۱] Tremblay, R., Filiatrault, A., Timler, P. and Bruneau, M., ۱۹۹۵. Performance of steel structures during the ۱۹۹۴ Northridge earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, ۲۲(۲), pp.۳۳۸-۳۶۰. <https://doi.org/10.1139/1995-046>
- [۲] Latour, M. and Rizzano, G., ۲۰۱۳. Full strength design of column base connections accounting for random material variability. *Engineering Structures*, ۴۸, pp.۴۵۸-۴۷۱. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.026>
- [۳] Lim, W.Y., Lee, D. and You, Y.C., ۲۰۱۷. Exposed column-base plate strong-axis connections for small-size steel construction. *Journal of Constructional Steel Research*, ۱۳۷, pp.۲۸۶-۲۹۶. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.018>
- [۴] Rodas, P.T., Zareian, F. and Kanvinde, A., ۲۰۱۶. Hysteretic model for exposed column-base connections. *Journal of Structural Engineering*, ۱۴۲(۱۲), p.۰۴۰۱۶۱۳۷. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001602](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001602)
- [۵] Astaneh-Asl, A., ۲۰۰۸. Seismic behavior and design of base plates in braced frames. *SteelTIPS*, Technical Information and Product Service, Structural Steel Educational Council.
- [۶] Gomez, I., Kanvinde, A. and Deierlein, G.G., ۲۰۱۰. Exposed column base connections subjected to axial compression and flexure. *AISC*, Chicago, ۲۵۷.
- [۷] Fahmy, M., ۲۰۰۰. Seismic behavior of moment-resisting steel column bases. *University of Michigan*.

- [۲۰] Nie, C. and Dong, P., ۲۰۱۲. A traction stress based shear strength definition for fillet welds. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, ۴۷(۸), pp.۵۶۲-۵۷۵. <https://doi.org/10.1177/0309324712456646>
- [۲۱] AWS-D۱.۴/D۱.۴M., ۲۰۱۸. Structural Welding Code Steel Reinforcing Bars. *American Welding Society*.
- [۲۲] ACI ۳۱۸-۱۹., ۲۰۱۹. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. *American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA*.
- [۲۳] AWS-D۱.۱/D۱.۱M., ۲۰۲۰. Structural Welding Code-Steel. *American Welding Society*.
- [۲۴] de Normalisation, C.E., ۲۰۰۵. Eurocode ۳: design of steel structures– part ۱-۱: material toughness and through-thickness properties. EN ۱۹۹۳-۱-۱۰, Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- [۲۵] AWS-B۱.۱/M/B۱.۱., ۲۰۱۶. Guide for the Non-destructive Examination of Welds. *American Welding Society*.
- [۲۶] Ekstrom, M.P., ۲۰۱۲. *Digital image processing techniques* (Vol. ۲). Academic Press.
- [۲۷] Pan, B., Xie, H., Wang, Z., Qian, K. and Wang, Z., ۲۰۰۸. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics express*, ۱۶(۱۰), pp.۷۳۷-۷۴۸. <https://doi.org/10.1364/OE.16.007037>
- [۲۸] Idhar, R.A., Sjah, J., Handika, N. and Tjahjono, E., ۲۰۲۰, May. Evaluation of loading rate to the stress-strain response of reinforcing steel bar. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. ۸۰۱, No. ۱, p. ۰۱۲۰۱۶). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/801/1/012016>
- [۲۹] Callister Jr, W.D., ۲۰۰۷. *Materials science and engineering an introduction*.
- [۳۰] GOM Correlate. GOM—Precise Industrial 3D Metrology. *Braunschweig, Germany*. Available online: <https://www.gom.com/index.html>.
- [۸] Eurocode ۳, (۲۰۰۵), Design of steel structures, part ۱-۸: Design of joints.
- [۹] Vakili Sadeghi, H., Mirghaderi, S.R., Epackachi, S., Asgarpoor, M. and Gharavi, A., ۲۰۲۲. 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*, ۳۱(۱۱), p.e۱۹۳۷. <https://doi.org/10.1002/tal.۱۹۳۷>
- [۱۰] AISC-۳۶۰., ۲۰۱۶. Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction.
- [۱۱] Lee, C.K., Chiew, S.P. and Jiang, J., ۲۰۱۲. Residual stress study of welded high strength steel thin-walled plate-to-plate joints, Part ۱: Experimental study. *Thin-Walled Structures*, ۵۶, pp.۱۰۳-۱۱۲. <https://doi.org/10.1016/j.tws.۲۰۱۲.۰۳.۰۱۵>
- [۱۲] Wang, Y.B., Li, G.Q. and Chen, S.W., ۲۰۱۲. The assessment of residual stresses in welded high strength steel box sections. *Journal of Constructional Steel Research*, ۷۶, pp.۹۳-۹۹. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.۲۰۱۲.۰۳.۰۲۵>
- [۱۳] Mohandas, T., Reddy, G.M. and Kumar, B.S., ۱۹۹۹. Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels. *Journal of Materials Processing Technology*, ۸۸(۱-۳), pp.۲۸۴-۲۹۴. [https://doi.org/10.1016/S0924-6460\(98\)00404-X](https://doi.org/10.1016/S0924-6460(98)00404-X)
- [۱۴] Gáspár, M., ۲۰۱۹. Effect of welding heat input on simulated HAZ areas in S۹۶۰QL high strength steel. *Metals*, ۹(۱۱), p.۱۲۲۶. <https://doi.org/10.3390/met9112226>
- [۱۵] Chen, C., Zhang, X., Zhao, M., Lee, C.K., Fung, T.C. and Chiew, S.P., ۲۰۱۷, February. Effects of welding on the tensile performance of high strength steel T-stub joints. In *Structures* (Vol. ۹, pp. ۷۰-۷۸). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.۲۰۱۶.۰۹.۰۰۸>
- [۱۶] Björk, T., Ahola, A. and Tuominen, N., ۲۰۱۸. On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel. *Welding in the World*, ۶۲, pp.۹۸۵-۹۹۵. doi.org/10.1007/s۴۰۱۹۴-۰۱۸-۰۶۲۴-۴
- [۱۷] Barzegar-Mohammadi, S., Haghpanahi, M., Zeinoddini, M. and Miresmaeili, R., ۲۰۲۳, 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* (Vol. ۵۰, pp. ۱۲۸۵-۱۳۰۲). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.۲۰۲۳.۰۲.۰۱۹>
- [۱۸] Tajik, N., Mirghaderi, S.R., Asghari, A. and Hamidia, M., ۲۰۲۴. Experimental and numerical study on weld strengths of built-up steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*, ۲۱۳, p.۱۰۸۳۶۲. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.۲۰۲۳.۱۰۸۳۶۲>
- [۱۹] Kamtekar, A.G., ۱۹۸۲. A new analysis of the strength of some simple fillet welded connections. *Journal of Constructional Steel Research*, ۲(۲), pp.۳۳-۴۵. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(82\)90024-۴](https://doi.org/10.1016/0143-974X(82)90024-۴)