

ارزیابی آزمایشگاهی مقاومت اتصالات T شکل

جوشی میل مهارها با خروج از مرکزیت به

کفستونها در ستونهای فولادی با استفاده از

روش همبستگی تصاویر دیجیتال

ایمان کرمی^۱، امیررضا قیامی آزاد^{۲*}، سید رسول میرقادر^۳

۱- کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

*استاد تهران، صندوق پستی دانشکدگان فنی مهندسی عمران ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳، rgiami@ut.ac.ir

چکیده

در اتصالات کفستون ضخیم متداول به دلیل ایجاد حالت شدید پینچینگ در نمودار هیستریزس در حین باربرداری و بارگذاری برگشتی، سختی و مقاومت اتصال و میزان استهلاک انرژی کاهش می یابد. جهت جلوگیری از ایجاد پینچینگ و بهبود عملکرد لرزه ای اتصالات کفستون، پیشنهاد شده است میل مهارها در حالت کلی با خروج از مرکزیت نسبت به محور بال ستون، به زیر ورق کفستون با اتصالات جوشی متصل شوند. در اتصالات کفستون پیشنهادی به دلیل عدم تعویض یا ترمیم پذیری اجزای اتصال، طبق آیین نامه باید تمام اجزای اتصال از جمله ورق کفستون، اتصالات جوشی، میل مهارها و بتن، الاستیک باقی بمانند و منبع شکل پذیری، داخل مفصل پلاستیک در ناحیه انتهایی مقطع ستون باشد. در این حالت میل مهارها در هر لحظه به صورت همزمان توانایی باربری نیروی کششی و فشاری را دارند. به دلیل ناشناخته بودن رفتار اتصالات جوشی تحت کشش، از اتصالات T شکل برای ارزیابی مقاومت و سختی اتصالات جوش گوشه و یژه، جوش شیار با نفوذ کامل، جوش شیار استوانه ای و جوش شیار مخروطی استفاده شد. روش همبستگی تصاویر دیجیتال جهت سنجش میدان کرنش اتصالات جوشی و نوع شکست میل مهارها به کار برده شد. در نتیجه اتصالات جوشی توانایی تحمل ماکزیم ظرفیت کششی میل مهارها را دارا بودند و الاستیک باقی ماندند. در حین بارگذاری، میل مهارها در ناحیه الاستیک هیچ شکستی ناشی از کاهش مقاومت در منطقه HAZ نداشتند. در نتیجه هیچ عدم اطمینانی در رفتار اتصالات جوشی تحت کشش به عنوان جزء نیرو-کنترل در اتصالات پیشنهادی وجود ندارد. جوش گوشه و جوش شیار با نفوذ کامل، برتری بیش تری از لحاظ هزینه نسبت به بقیه جوش ها داشتند.

واژگان کلیدی

اتصال کفستون، اتصال T شکل، جوش شیار، جوش گوشه، همبستگی تصاویر دیجیتال

Experimental evaluation of the strength of the T-shape eccentrically-welded anchor rod connections to column bases in steel columns using digital image correlation method

I. Karami, A. Ghiami Azad, R. Mirghaderi

Abstract

In regular thick column base connections, because of severe pinching effect in the hysteresis diagram during loading and unloading, the stiffness and strength of the connection and the amount of energy consumption are reduced. In order to prevent pinching and improve the seismic performance of the column-base connections, it is suggested to connect the anchor rods vertically under the plates by welded connections without any eccentricity between anchor rods and the flange axis of the column. In the proposed column-base connections, because of the non-replaceability or repairability of the connection components, according to the design codes, all connection components, including the base plate, welded connections, anchor rods, and concrete, must remain elastic and the source of ductility should be inside the plastic hinge in the end section of the column. In this case, the anchor rods have the ability to carry tensile and compressive forces at any moment simultaneously. Because of the unknown behavior of welded connections under tensile loads, T-shaped connections were used to evaluate the strength and stiffness of special fillet welds, full penetration groove welds, cylindrical groove welds and conical groove welds. Digital images Correlation method was used to measure the strain field of welded connections and identify the type of failure of the anchor rods. As a result, the welded connections had the ability to withstand the maximum tensile capacity of the anchor rods and remained elastic. During the loading of the anchor rods, no failures occurred in the elastic region of the rods due to the reduction of resistance in the Heat Affected Zone (HAZ). As a result, there is no uncertainty in the behavior of welded connections under tensile load as a force-control component in the proposed connections. Fillet weld and full penetration groove welds were more superior in terms of cost than other welds.

Keywords

Base Plate Connection, T-Shape Connection, Groove Weld, Fillet Weld, DIC

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۵

۱- مقدمه

از اتصالات کف‌ستون به‌طور گسترده در قاب‌های فولادی خمشی برای انتقال نیرو از کل سازه از طریق ستون طبقه اول به فونداسیون بتنی استفاده می‌شود. **رومنو^۱** و **همکاران** (۲۰۲۳) نتیجه گرفتند که مقاومت و ظرفیت دورانی اجزای اتصال پای سازه بر مقاومت و شکل‌پذیری کل اتصال و قاب فولادی تأثیر دارند [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 نیست و اتصالات کف‌ستون رفتار نیمه‌گیردار دارد [۲ و ۳]. بررسی‌های انجام‌شده در مورد خرابی‌های زلزله توسط **ترمبلی^۴** و **همکاران** (۱۹۹۵) نشان داد که اتصالات کف‌ستون نمایان در مقابل مدهای گسیختگی از قبیل شکست جوش، تسلیم ورق کف‌ستون، شکست میل‌مهار و خرد شدن گروت یا بتن آسیب‌پذیر است [۴]. بر اساس پژوهش **دیوالف^۵** (۱۹۸۲)، کف‌ستون‌های ضخیم به‌دلیل ایجاد فشارهای بیش از حد در بتن یا گروت، باعث کاهش ظرفیت مقاومت اتصال و خردشدگی گروت یا بتن می‌شوند [۵]. همچنین **لی^۶** و **همکاران** (۲۰۰۲) در یک ارزیابی عددی نشان دادند که استفاده از ورق‌های ضخیم باعث ایجاد خردشدگی زودهنگام در بتن شده و همچنین توصیه کردند برای جلوگیری از ایجاد تنش‌های زیاد در میل‌مهارها، مقدار مشخصی برای ضخامت ورق کف‌ستون تعیین شود [۶].

در سازه‌های با سیستم قاب‌های خمشی متوسط و بلند به همراه بارگذاری‌های زیاد، از ورق‌های فولادی ضخیم برای اتصال کف‌ستون استفاده می‌شود. طبق پژوهش‌های انجام‌شده توسط **گومز^۷** و **همکاران** (۲۰۱۰)، با افزایش ضخامت ورق کف‌ستون، مقاومت خمشی و صلبیت ورق کف‌ستون افزایش می‌یابد و در نمودار هیستریزس اتصال کف‌ستون ضخیم، پینچینگ شدیدتری مشاهده شده است [۷]. همچنین **آستانه‌اصل** و **همکاران** (۱۹۹۲) و **فهمی** (۲۰۰۰) در تحقیقات دیگری نشان دادند که حین بارگذاری، نیروی کششی ایجادشده در میل‌مهارها و نیروی فشاری وارد بر گروت نیز با افزایش ضخامت ورق کف‌ستون نمایان

افزایش می‌یابند که منجر به تسلیم کششی میل‌مهارها و خردشدگی گروت می‌شود [۸ و ۹].

مطابق با پژوهش‌های **فهمی** (۲۰۰۰) و **روداس^۸** و **همکاران** (۲۰۱۶) با افزایش نیروهای وارده، خرابی‌های گزارش‌شده در اتصال کف‌ستون‌های ضخیم، تسلیم میل‌مهارها و خردشدگی بتن است. در اتصالات کف‌ستون متداول مطابق با شکل (۱-الف)، نیروهای وارد بر ستون از طریق نیروی کششی اعمال‌شده به میل‌مهارها و نیروی فشاری وارد بر گروت، به فونداسیون منتقل می‌شوند. مطابق با شکل (۱-ب) تسلیم کششی و افزایش طول در میل‌مهارها باعث ایجاد عدم تماس بین گروت و ورق کف‌ستون می‌شود. بنابراین در لحظه باربرداری و بارگذاری خلاف جهت جانبی، ستون آزادانه بدون هیچ مانعی، به سمت پایین حرکت می‌کند تا به گروت برخورد کند. در حین باربرداری، به‌دلیل عدم وجود مقاومت در برگشت، مقاومت و سختی اتصال کاهش می‌یابد. به همین دلیل پینچینگ در نمودار هیستریزس اتصال کف‌ستون به‌وجود می‌آید و تأخیر زمانی در باربری توسط میل‌مهار کششی در سیکل‌های بعدی ایجاد می‌شود [۹ و ۱۰]. طبق پژوهش **آستانه‌اصل** (۲۰۰۸) [۱۱]، افزایش ضخامت ورق کف‌ستون باعث کاهش شکل‌پذیری اتصالات کف‌ستون متداول می‌گردد. به عبارت دیگر شکل‌پذیری‌های ترد و شکننده مانند خردشدگی بتن و گسیختگی ترد میل‌مهارها، حاکم بر طرح می‌شوند.

در این پژوهش جهت حذف عامل ایجاد پینچینگ در نمودار هیستریزس اتصالات کف‌ستون ضخیم متداول، پیشنهاد شده است که میل‌مهارها با خروج از مرکزیت نسبت به محور بال ستون به‌صورت عمودی زیر ورق کف‌ستون با استفاده از اتصالات جوشی متصل شوند. بنابراین مطابق پیکربندی پیشنهادشده اتصال کف‌ستون به همراه اتصالات جوشی در شکل‌های (۱-ج) و (۱-د)، هیچ عدم تماسی در حین بارگذاری معکوس بین میل‌مهار و ورق کف‌ستون با ایجادشدن تغییرشکل کششی در میل‌مهارها رخ نمی‌دهد و اتصال بین میل‌مهار و ورق کف‌ستون در هر لحظه از بارگذاری پایدار است.

⁸ Rodas

¹ Romeo

² Latour & Rizzano

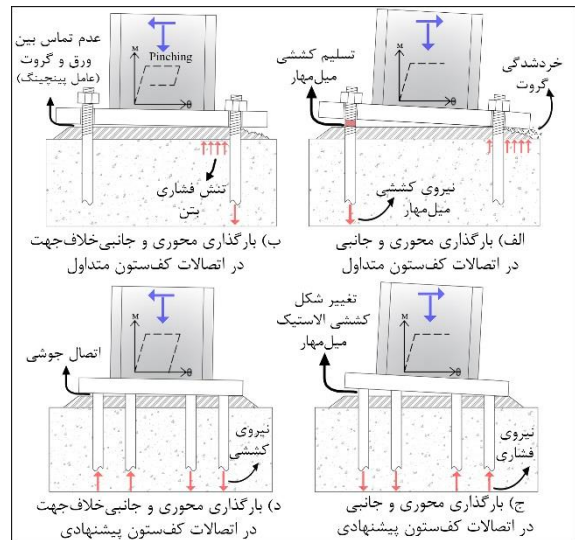
³ Lim

⁴ Tremblay

⁵ DeWolf

⁶ Lee

⁷ Gomez



شکل ۱- اتصالات کفستون متداول و پیشنهادی

پیشنهادی باید بیش‌تر از مقاومت و سختی مقطع ستون باشد و شکل‌پذیری و انرژی مستهلک‌شده در اتصال ناچیز باشد. بنابراین میل‌مهاریا به‌صورت الاستیک در هر لحظه زمانی، آماده برای باربری کششی و فشاری هستند. عمده نیروی وارده از طرف ستون، به‌دلیل اتصالات جوشی میل‌مهاریا، از طریق میل‌مهاریا فشاری و کششی به فونداسیون منتقل می‌شود. مشارکت بین بتن و میل‌مهاریا فشاری در تحمل نیرو از طریق اصل هم‌سازی کرنش‌ها است. در حین بارگذاری به‌دلیل این که میل‌مهاریا فشاری الاستیک هستند، بنابراین کرنش خیلی کمی دارند. در نتیجه با توجه به اصل هم‌سازی و اثر پواسون، کرنش بتن اطراف میل‌مهاریا نیز باید با کرنش میل‌مهاریا یکسان باشد. در این صورت از ایجاد شکل‌پذیری زیاد در بتن جلوگیری شده و خردشدگی در بتن رخ نمی‌دهد. در نتیجه بتن در حالت نیرو-کنترل باقی می‌ماند. همچنین با کاهش طول و عرض ورق کفستون پیشنهادی، بتن نقش مؤثری در تحمل مستقیم فشار از سمت ورق کفستون نخواهد داشت.

بین اجرای اتصال کفستون پیشنهادی، اتصالات جوشی میل‌مهاریا به ورق رفتار و پاسخ ناشناخته‌ای تحت کشش و فشار دارند. میل‌مهاریا در اتصالات کفستون پیشنهادی در حین بارگذاری، تحت کشش مستقیم و یا تحت فشار مستقیم هستند. هنگامی که میل‌مهاریا تحت نیروی فشاری هستند، در اتصالات جوشی به‌دلیل اتکای میل‌مهاریا به ورق و محصورشدگی جوش از طرف گروت و عدم کمانش میل‌مهاریا در بتن، هیچ‌گونه مد خرابی برای اتصالات جوشی تحت فشار مدنظر نیست. به همین دلیل رفتار اتصال جوشی تحت فشار کاملاً واضح است و نیازی به تست اتصال جوشی تحت فشار نیست.

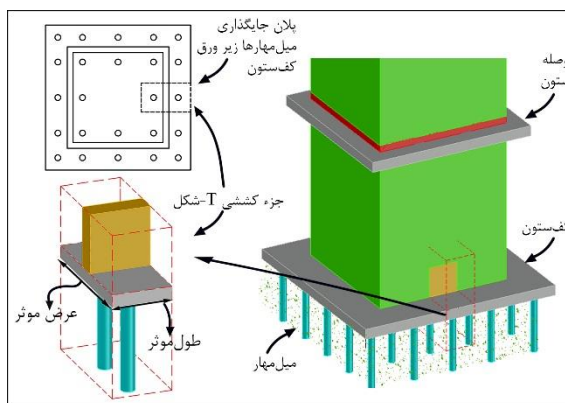
اما در اتصال جوشی تحت نیروی کششی، ممکن است خرابی یا کاهش مقاومت در اتصال یا میل‌مهاریا رخ دهد و میل‌مهاریا کششی به‌دلیل اثر پواسون از بدنه بتن جدا شود. بنابراین جهت بررسی رفتار ناشناخته و مقاومت اتصالات جوشی تحت کشش، از اتصال T شکل که متشکل از میل‌مهاریا، اتصال جوشی، ورق کفستون و بال ستون است، استفاده شده است. مطابق شکل (۲) رفتار جزء اتصال T شکل کششی جداشده از اتصال کفستون پیشنهادی مطابق با ضوابط آیین‌نامه Eurocode 3 [۱۳]، مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با جزء کششی نشان داده‌شده در شکل (۲)، منظور از اتصال T شکل، اتصال عمودی میل‌مهاریا بر ورق فولادی توسط اتصالات جوشی به همراه بال ستون است. برای ستون‌های تحت

بنابراین با حذف عامل پینچینگ، مقاومت و سختی اتصال در حین باربرداری کاهش نمی‌یابد. در اتصالات کفستون پیشنهادی، مقدار خروج از مرکزیت ایجادشده بین میل‌مهاریا و محور بال ستون و ابعاد طول و عرض ورق کفستون کاهش می‌یابند. همچنین با کاهش خروج از مرکزیت، اثر عملکرد خارج از صفحه ورق کفستون کاهش پیدا می‌کند. در اتصالات کفستون پیشنهادی، قطر و تعداد میل‌مهاریا هر جزء ستون (بال یا جان) بر اساس ظرفیت نهایی همان جزء طراحی و تعیین می‌شوند. البته در اتصالات پیشنهادی، اندازه قطر و تعداد میل‌مهاریا نسبت به اتصالات متداول افزایش می‌یابد. از مقدار لنگر خمشی ایجادشده در ورق کفستون پیشنهادی، میل‌مهاریا و اتصالات جوشی نسبت به اتصال متداول کفستون نیز کاسته می‌شود. همچنین در این حالت، عمدتاً میل‌مهاریا در تحمل نیروی فشاری سهم بیش‌تری نسبت به گروت دارند. بنابراین در یک طرف اتصال کفستون پیشنهادی، میل‌مهاریا فشاری به همراه گروت و در طرف دیگر، میل‌مهاریا کششی وظیفه انتقال بار به فونداسیون را دارند.

در اتصالات کفستون پیشنهادی به‌دلیل عدم تعویض یا ترمیم‌پذیری اجرای اتصال، طبق آیین‌نامه AISI 360-16 [۱۲] باید تمام اجزای اتصال از جمله ورق کفستون، اتصالات جوشی، میل‌مهاریا و بتن، الاستیک باقی بمانند و منبع شکل‌پذیری، داخل مفصل پلاستیک در ناحیه انتهایی مقطع ستون باشد. در این حالت، میزان استهلاک انرژی به‌دلیل ایجاد مفصل پلاستیک در ستون نسبت به اتصال متداول افزایش می‌یابد. جهت الاستیک‌ماندن اتصال کفستون، مقاومت و سختی اجزای اتصال کفستون

بارگذاری، دو جزء کششی و فشاری از هر دو طرف اتصال کف ستون استخراج می شوند [۱۳].

بنابراین اتصالات T شکل را می توان به عنوان نماینده کل اتصال پیشنهادی در محدوده دو میل مهار با خروج از مرکزیت نسبت به محور بال ستون بر اساس آیین نامه Eurocode 3 در نظر گرفت. از لحاظ تئوری رفتار میل مهارها و اتصالات جوشی تحت کشش و فشار و خمش همانند رفتار میل مهارها در اتصال کف ستون واقعی است.

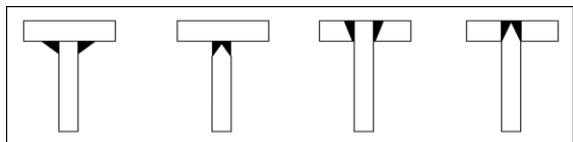


شکل ۲- نما و پلان اتصال کف ستون و قسمت جزء کششی T شکل

مطابق با شکل (۲) نحوه اجرای این نوع اتصالات به طوری است که در ابتدا میل مهارها به زیر ورق کف ستون در کارخانه با دقت بالا در نقاط مشخص شده جوش می شوند. سپس قسمتی از ستون به اندازه تقریباً یک متر به روی ورق کف ستون جوش داده می شود و اتصال کف ستون آماده شده به محل ساخت منتقل می شود. بعد از نصب دقیق اتصال از پیش ساخته شده در محل فونداسیون و بتن ریزی، ستون های اصلی در یک سوم میانی طبقه به ستون متصل به ورق کف ستون، وصله می شوند. همچنین برای ستون های جعبه ای، امکان قراردادن میل مهارها داخل ناحیه ستون، زیر ورق کف ستون مهیا می شود. بنابراین برای جایگذاری تعداد زیاد میل مهار زیر ورق کف ستون، فضای کافی برای ایجاد اتصال جوشی میل مهارها با خروج از مرکزیت به ورق کف ستون وجود دارد. همچنین اتصالات کف ستون پیشنهادی به دلیل نداشتن هزینه ورق های تقویت کننده، سوارخ کاری، جوشکاری ورق ها و بولت ها، از لحاظ اقتصادی بهینه تر هستند.

در یک ارزیابی عددی انجام شده توسط وکیلی صادقی و همکاران (۲۰۲۲)، میل مهارها به زیر ورق های کف دیوار مختلط به صورت قائم توسط اتصالات جوشی متصل شدند و مکانیزم انتقال نیروها در این اتصالات مورد بررسی قرار گرفت. در این

پژوهش تعداد چهار نوع اتصال جوشی میل مهار به ورق مطابق با شکل (۳) بدون در نظر گرفتن جزئیات هندسی و معیارهای طراحی جهت ایجاد اتصال، پیشنهاد شد [۱۴]. مطابق شکل (۳)، چهار اتصال جوش گوشه، جوش شیاری با نفوذ کامل، جوش شیاری مخروطی و جوش شیاری استوانه ای به عنوان اتصالات پیشنهادی جهت بررسی رفتار اتصالات در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۳- اتصالات جوشی میل مهار به ورق کف ستون (وکیلی صادقی و همکاران [۱۴])

رفتار میل مهارها و ورق کف ستون به عنوان عضو باربر تحت کشش و فشار، مشخص و معین هستند. تنها عدم اطمینان موجود در زنجیره انتقال نیرو در اتصالات کف ستون پیشنهادی، رفتار اتصالات جوشی تحت کشش است که برای اطمینان از این مورد، در این پژوهش به بررسی رفتار و تعیین مقاومت اتصالات جوشی میل مهار به ورق فولادی در اتصال T شکل پرداخته شده است. بنابراین برای شناسایی نوع رفتار اتصالات جوشی و تعیین مقاومت آن ها، این نوع اتصالات بر اساس ظرفیت نهایی کششی میل مهارها طراحی شدند و انتظار می رود که اتصالات جوشی در هر لحظه از بارگذاری کششی به صورت الاستیک باقی بمانند. در اتصال T شکل، میل مهارها به عنوان حلقه شکل پذیر طراحی می شوند تا مقاومت و رفتار اتصالات جوشی نسبت به میل مهارها سنجیده شود. به همین دلیل برای اطمینان از مقاومت و سختی کافی اتصالات جوشی، میل مهارها در اتصال T شکل تا حد گسیختگی کشیده می شوند. از لحاظ تئوری مجموع رفتار اتصالات T شکل جدا شده از موقعیت های مختلف اتصال کف ستون پیشنهادی را می توان به رفتار کل اتصال تعمیم داد. نتایج این پژوهش، محدود به رفتار تست های اتصالات جوشی میل مهارها تحت نیروی کشش مستقیم است. اگرچه برای اطمینان بیش تر از رفتار کلی اتصالات کف ستون پیشنهادی و بهبود عملکرد لرزه ای، به مطالعات عددی و آزمایشگاهی در مقیاس کامل نیاز است. همچنین بررسی رفتار اتصالات جوشی تحت نیروی برشی خارج از بحث این پژوهش است و نیروی برشی ستون از طریق کلید برشی به فونداسیون منتقل می شود. به دلیل الاستیک ماندن

اجزای اتصال و کم بودن تعداد سیکل‌های بارگذاری حین زلزله، از بررسی خستگی کم‌چرخه و پرچرخه در این پژوهش برای اتصالات جوشی و اتصال کفستون پیشنهادی صرف‌نظر شده است.

طبق پژوهش **بیورک**^۱ و **همکاران** (۲۰۱۸)، 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 سردشدن ورق فولادی، تنش‌های پسماند بیش‌تری حین سردشدن محل جوشکاری شده در ورق کفستون باقی می‌مانند. بنابراین برای کنترل نرخ سردشوندگی، حداقل ضخامت ورق کفستون برابر با اندازه قطر میل مهار مصرفی توصیه شده است [۱۵]. طبق پژوهش **چن**^۲ و **همکاران** (۲۰۱۷)، به دلیل ایجاد حرارت ناشی از جوشکاری در فلزات و تأثیر آن در ظرفیت مقاومتی ناحیه تحت تأثیر حرارت، احتمال وقوع شکست زود هنگام، کاهش ظرفیت مقاومتی، کاهش شکل‌پذیری و شکست تردگونه یا محتمل در محل جوشکاری شده وجود دارد [۱۶]. طبق پژوهش‌های **کامتکار**^۳ (۱۹۸۲)، **نی** و **دانگ**^۴ (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 [۱۷ و ۱۸].

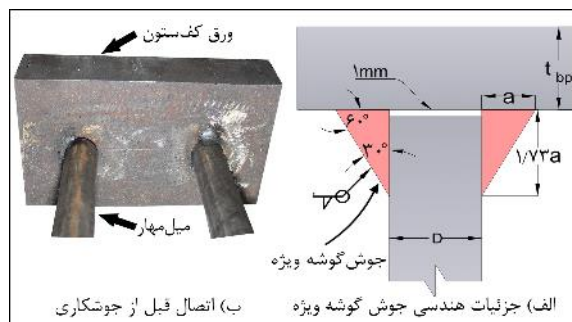
در پژوهش فعلی بر اساس معیارهای طراحی و ضوابط آیین‌نامه‌ای، جزئیات هندسی دقیق‌تری برای هر یک از اتصالات جوشی مشخص شدند. سپس به بررسی مقاومت انواع اتصالات جوشی بین میل مهار و ورق کفستون در شرایط مختلف، پرداخته شد. اتصالات T شکل در نمونه‌های آزمایشگاهی، تحت تست‌های کشش مستقیم قرار گرفتند و در انتها نمودار نیرو-جابجایی و میدان کرنش هر یک از اتصالات جوشی و میل مهارها توسط روش همبستگی تصاویر دیجیتال^۵ حاصل شدند. همچنین در هر یک از نمونه‌ها به بررسی شکست‌های محتمل تردگونه در نواحی جوشکاری شده نیز پرداخته شده است.

۲- معرفی اتصالات جوشی میل مهارها

۲-۱- جوش گوشه ویژه

جوش گوشه به عنوان جوشی که سهولت در اجرا و هزینه ساخت معقولی دارد، به فراوانی در ساخت و ساز به کار می‌رود. جوش‌های استاندارد از لحاظ تئوری، هندسه دو ساق مساوی دارند. در اکثر مواقع به دلیل جوشکاری نادرست جوش گوشه و دقیق نبودن ابعاد جوشکاری شده، تغییر در مقدار ظرفیت مقاومتی جوش گوشه رخ می‌دهد. 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 به جای هندسه مقطع جوش گوشه استاندارد با زاویه ۴۵ درجه، استفاده شده است. به دلیل کاهش فاصله بین مرکز سطح مقطع جوش گوشه ویژه و سطح میل مهار در این حالت، شرایط انتقال نیرو از سطح جانبی میل مهار به ورق کفستون به صورت تدریجی‌تر نسبت به حالت جوش گوشه استاندارد مهیا می‌شود.

جزئیات هندسی مقطع جوش گوشه ویژه و اجزای اتصال قبل از جوشکاری به ترتیب در شکل (۴-الف) و (۴-ب) نشان داده شده‌اند. مطابق با شکل (۴-الف) راستای میل مهارها بر سطح ورق کفستون عمود است و جوش گوشه ویژه به صورت دورانی دور سطح میل مهار جوشکاری می‌شود. مطابق با شکل (۴-الف)، جهت نفوذ بهتر فلز جوش در ریشه جوش گوشه ویژه، طبق ضوابط آیین‌نامه AWS-D1.1-20 [۱۹]، به اندازه یک میلی‌متر فاصله بین میل مهار و ورق کفستون در نظر گرفته شد. فاصله یک میلی‌متری منجر به کاهش بُعد گلوگاه مؤثر جوش می‌شود و باید ابعاد جوش گوشه ویژه به اندازه کافی افزایش یابد.



شکل ۴- اتصال جوش گوشه ویژه

¹ Björk

² Chen

³ Kamtekar

⁴ Nie & Dong

⁵ Digital Image Correlation (DIC)

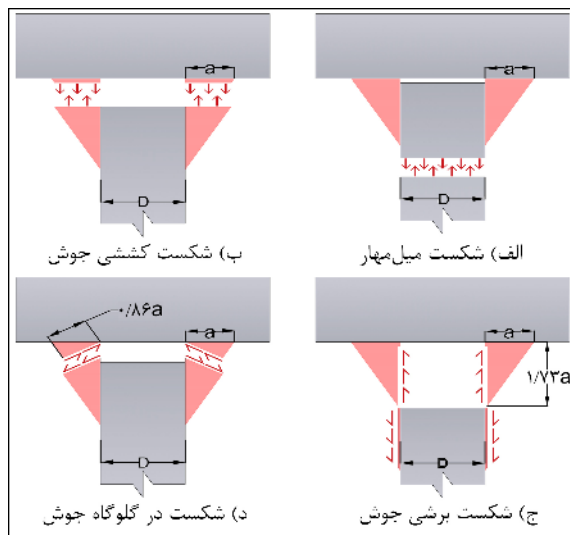
مد گسیختگی چهارم مرتبط با شکست گلوی مؤثر جوش گوشه، در شکل (۵-د) نشان داده شده است.

در آیین‌نامه AISC 360-16 [۱۲] و AWS-D1.1-20 [۲۱] نیروی اعمالی به جوش گوشه استاندارد، به صورت برش خالص بر سطح گلوی مؤثر جوش جهت طراحی، در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل (۶-الف) و بر اساس آیین‌نامه Eurocode 3 [۱۳]، نیروی اعمالی به جوش گوشه با استفاده از روش جهتی^۱، به صورت تنش‌های عمودی و عرضی نسبت به صفحه گلوگاه مؤثر جوش و تنش‌های موازی و عرضی نسبت به محور طولی جوش تجزیه می‌شود. مطابق با آیین‌نامه Eurocode 3 [۱۳]، طراحی ابعاد جوش گوشه بر اساس رابطه (۴) و (۵) انجام می‌شود.

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0.5} \leq f_u / (\beta_w \times \gamma_{M2}) \quad (4)$$

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

پارامتر ($\sigma_{\perp}$) تنش نرمال عمود بر سطح گلوی مؤثر جوش و ($\tau_{\perp}$) تنش برشی مماس بر سطح گلوی مؤثر جوش و عمود بر محور طولی جوش هستند. ($\sigma_{\parallel}$) معرف تنش نرمال عمود بر مقطع جوش و موازی با محور طولی جوش و ($\tau_{\parallel}$) معرف تنش برشی مماس بر گلوی مؤثر جوش و موازی با محور طولی جوش هستند. (f_u) بیانگر ماکزیمم مقاومت کششی عضو ضعیف‌تر اتصال، (β_w) ضریب همبستگی برابر با یک و (γ_{M2}) ضریب ایمنی برابر با ۱/۲۵ هستند.



شکل ۵- مدهای گسیختگی جوش گوشه ویژه تحت بارگذاری

از معیارهای طراحی بر اساس مدهای گسیختگی نشان داده شده در شکل (۵) برای ارزیابی مقاومت کششی اتصال T شکل جوش گوشه ویژه استفاده شده است. طراحی ابعاد جوش گوشه ویژه بر اساس ماکزیمم نیروی گسیختگی کششی میل‌مهارها انجام شده و بقیه اجزای اتصال از قبیل ورق بال ستون و ورق کف ستون به صورت الاستیک طراحی شدند تا میل‌مهارها به حد گسیختگی برسند. به عبارت دیگر در شرایط تست آزمایشگاهی، طراحی کل اتصال جزء کششی توسط شکست میل‌مهار کنترل می‌شود.

بر اساس آیین‌نامه ACI 318-19 [۲۰] و مطابق با شکل (۵-الف)، پارامتر (T_u)، ظرفیت نهایی کششی میل‌مهار حاصل از مد گسیختگی اول (شکست میل‌مهار) در نظر گرفته شده و در رابطه (۱) بیان شده است. در این رابطه پارامتر (A_s) بیانگر سطح مقطع میل‌مهار و پارامتر (F_{ur}) ماکزیمم مقاومت کششی میل‌مهار است. 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 جوش بین فلز جوش و ورق کف ستون، در شکل (۵-ب) نشان داده شده و مقاومت کششی مرتبط با این مد گسیختگی در رابطه (۲) محاسبه شده است. ضریب کاهش مقاومت در این رابطه برابر با ۰/۷۵ است.

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

پارامتر (σ_w) بیانگر ماکزیمم ظرفیت کششی جوش در مد گسیختگی دوم، پارامتر (D) قطر میل‌مهار، (F_{uw}) ماکزیمم ظرفیت کششی فلز جوش و (a) بعد افقی جوش گوشه ویژه مطابق با شکل (۵-ب) است.

مد گسیختگی سوم مرتبط با شکست برشی جوش بین بدنه بیرونی میل‌مهار و فلز جوش، در شکل (۵-ج) نشان داده شده است. ظرفیت برشی مرتبط به این مد گسیختگی بر اساس رابطه (۳) تعیین شده است و ضریب کاهش مقاومت در این رابطه برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است. پارامتر (τ_w) بیانگر ماکزیمم ظرفیت برشی جوش در مد گسیختگی سوم است.

$$T_u \leq f \tau_w = f(\sqrt{3} a \pi D) (0.6 F_{uw}) \quad (3)$$

¹ Directional Method

بنابراین آیین‌نامه‌ها، جوش‌های شیاری با نفوذ کامل را به دلیل انتقال نیرو بدون خروج از مرکزیت پیشنهاد می‌دهند که در قسمت بعدی توضیحات مربوط به این اتصال جوشی ارائه شده است.

۲-۲- جوش شیاری با نفوذ کامل

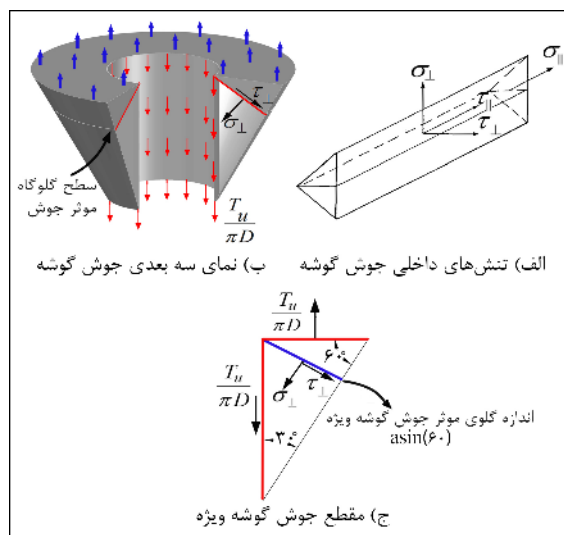
جوش‌های شیاری یکی دیگر از انواع جوش‌ها هستند که در ساخت اتصالات مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود. جوش شیاری با نفوذ کامل، نیروی کششی میل‌مهار را بدون خروج از مرکزیت به ورق کفستون انتقال می‌دهد و باید آماده‌سازی‌هایی از قبیل کونیک‌دار کردن میل‌مهاری با زاویه‌ای مشخص انجام شود.

مطابق با شکل (۷-الف) و با توجه به ضوابط آیین‌نامه جوشکاری AWS-D1.4-18 [۱۹] و AWS-D1.1-20 [۲۱]، جهت ایجاد نفوذ کامل در جوش شیاری، دو طرف نوک میل‌مهاری با زاویه ۵۵ درجه کونیک‌دار شدند. جزئیات هندسی اتصال و پیکربندی کلی اتصال قبل از جوشکاری به ترتیب در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) نشان داده شده‌اند. مطابق با شکل (۷-ب)، باید از عمود بودن میل‌مهار بر ورق کفستون اطمینان حاصل کرد. مقادیر دهانه ریشه جوش (R) و پیشانی ریشه جوش (f) بر اساس آیین‌نامه AWS-D1.1-20، به ترتیب برابر با چهار و سه میلی‌متر در نظر گرفته شدند.

در آیین‌نامه AISC 360-16، جهت کاهش تمرکز تنش در محل اتصال جوش شیاری به ورق و جلوگیری از ایجاد پدیده خستگی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای، استفاده از جوش گوشه تقویتی به اندازه یک چهارم قطر میل‌مهار توصیه شده است. مد گسیختگی مرتبط به شکست کششی جوش شیاری از سطح ورق کفستون، در شکل (۷-ج) نشان داده شده است و طراحی بعد افقی جوش شیاری با نفوذ کامل (a) بر اساس ظرفیت کششی جوش طبق رابطه (۱۰) انجام شده است. در این رابطه، ضریب کاهش مقاومت ۰/۷۵ است. طبق این رابطه مقدار ظرفیت نهایی کششی جوش شیاری با نفوذ کامل باید از مقدار ظرفیت نهایی میل‌مهار بیش‌تر باشد تا شکست میل‌مهار، حاکم بر طراحی شود.

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

پارامتر (σ_{wg}) بیانگر ماکزیمم ظرفیت کششی جوش شیاری با نفوذ کامل مربوط به مد گسیختگی شکل (۷-ج) است. همچنین الکترو مصرفی برای ایجاد اتصال جوش شیاری، باید با فلز پایه سازگار باشد.



شکل ۶- جزئیات هندسی و تنش‌های داخلی جوش گوشه ویژه

برای طراحی محافظه‌کارانه ابعاد جوش گوشه ویژه، از روابط آیین‌نامه Eurocode 3 در این پژوهش استفاده شده است. مطابق با شکل (۶-ب)، به دلیل این که جوش گوشه ویژه به صورت دورانی به دور میل‌مهار جوشکاری می‌شود و نیروی کششی از میل‌مهار به جوش گوشه به صورت نیروی محیطی سطحی متقارن $T_u/\pi D$ منتقل می‌شود، از مقادیر $(\sigma_{\parallel})$ و $(\tau_{\parallel})$ صرف‌نظر شده است. مطابق با شکل (۶-ج) و با استفاده از معادلات تعادل استاتیکی، مقادیر $(\sigma_{\perp})$ و $(\tau_{\perp})$ به صورت روابط (۶) و (۷) تعیین می‌شوند.

$$\sigma_{\perp} = \frac{\left(\frac{T_u}{\pi D}\right) \sin(60)}{a \times \sin(60)} = \frac{T_u}{a \times \pi \times D} \quad (6)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{\left(\frac{T_u}{\pi D}\right) \cos(60)}{a \times \sin(60)} = \frac{T_u}{a \times \pi \times D \times \sqrt{3}} \quad (7)$$

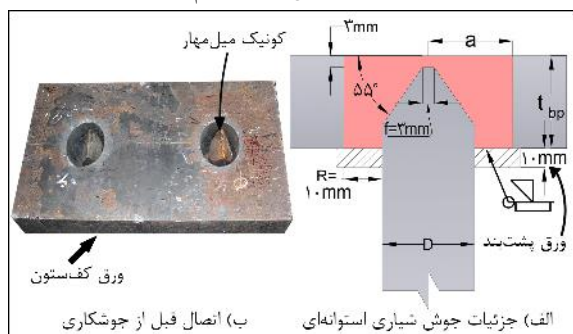
با جایگذاری روابط (۶) و (۷) در روابط (۴) و (۵)، ظرفیت مقاومتی جوش گوشه ویژه مرتبط با مد گسیختگی چهارم با توجه به آیین‌نامه Eurocode 3 جهت طراحی بعد افقی (a) بر اساس روابط (۸) و (۹) تعیین می‌شود.

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

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

مقدار ظرفیت نیرویی مرتبط با هر مد گسیختگی باید از مقدار ظرفیت نهایی میل‌مهار بیش‌تر باشد تا شکست میل‌مهار، حاکم بر طراحی باشد. به دلیل وجود فاصله بین مرکز سطح مقطع جوش گوشه ویژه تا بدنه میل‌مهار، انتقال نیروی کششی از میل‌مهار به ورق کفستون، به همراه خروج از مرکزیت انجام می‌شود.

میل مهار دوران داشته است. بنابراین طراحی این اتصال بر اساس ضوابط هندسی آیین نامه ای مخصوص جوش های شیاری انجام شد و انتظار می رود شکست میل مهار، حاکم بر طراحی باشد.

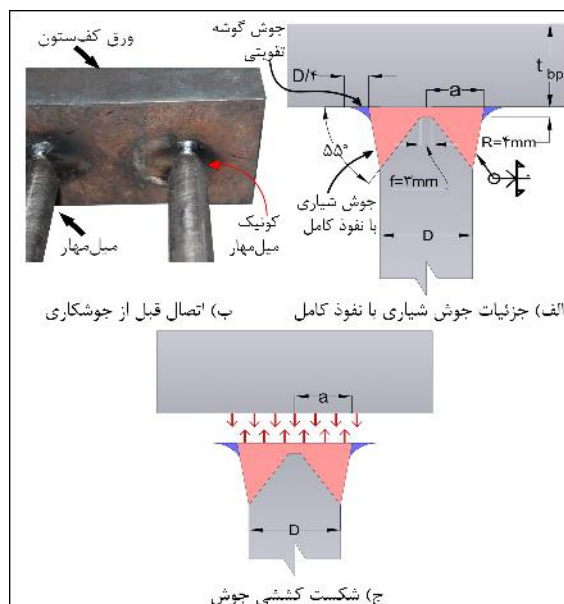


شکل ۸- اتصال جوش شیاری استوانه ای

۲-۴- جوش شیاری مخروطی

در این اتصال جوشی، نیاز به سوراخ کردن ورق های کفستون به صورت نیم مخروطی است. سپس میل مهار مطابق با شکل (۹-الف) و (۹-ب) از ناحیه زیرین ورق کفستون در داخل سوراخ قرار داده شده و از ناحیه بالای ورق کفستون، جوشکاری فضای خالی به صورت دورانی انجام می شود. در اتصال جوش شیار استوانه ای برای دسترسی بهتر جوش، میل مهارها با زاویه مشخص شده کونیک شدند اما در اتصال شیار مخروطی، ورق های کفستون مطابق با ضوابط آیین نامه AWS-D1.1-20، با زاویه حداقل ۴۰ درجه به وسیله دستگاه برش با متی مخصوص نیم مخروطی شکل، سوراخ می شوند. با توجه به شکل (۹-الف)، مقطع جوش شیار مخروطی شبیه به جوش شیار نیم جناغی است که حول محور مرکزی میل مهار دوران داشته است.

مطابق با آیین نامه AWS-D1.1-20، مقدار دهانه ریشه جوش (R) و جزئیات هندسی اتصال در شکل (۹-الف) نشان داده شده است. مقدار بعد (a) برای جوش شیار مخروطی به ضخامت ورق کفستون و اندازه دهانه ریشه جوش شیار بستگی دارد. در این اتصال نیز همانند اتصال قبلی، برای جلوگیری از ریزش فلز مذاب جوش از ورق های پشت بند با ضخامت ۱۰ میلی متر استفاده شده است. مطابق با شکل (۹-الف) با افزایش ضخامت ورق کفستون، اندازه بعد افقی (a)، حجم فلز جوش مورد استفاده و هزینه ساخت افزایش می یابد و مقرون به صرفه نیست. طراحی اتصال جوش شیار مخروطی بر اساس ضوابط هندسی آیین نامه AWS-D1.1-20 انجام شد و انتظار می رود شکست میل مهار، حاکم بر طراحی باشد. همچنین در مورد این نوع اتصالات در آیین نامه های طراحی، جزئیات دقیقی ارائه نشده است و هدف از



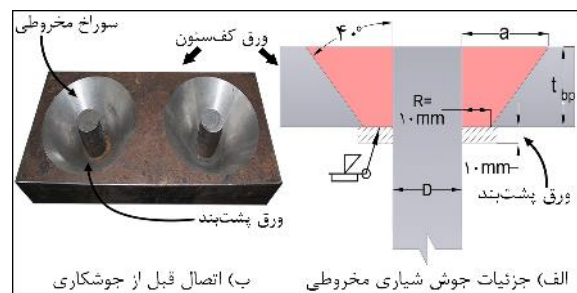
شکل ۷- اتصال جوش شیار با نفوذ کامل

۲-۳- جوش شیار استوانه ای

در اجرای اتصال جوش شیار استوانه ای، بعد از انجام عملیات سوراخ کاری در ورق، جوشکاری میل مهار به ورق آغاز می شود. مطابق با شکل (۸-الف) و شکل (۸-ب)، سوراخی استوانه ای بزرگتر از قطر میل مهار در ورق کفستون ایجاد و سپس در انتهای میل مهارها، کونیک دوطرفه ۵۵ درجه با دستگاه برش زده می شود. با قراردادن قسمت کونیک شده میل مهار در داخل سوراخ از ناحیه زیرین ورق کفستون، جوشکاری فضای خالی بین میل مهار و ورق کفستون از ناحیه بالایی ورق کفستون انجام می شود. علت کونیک دار کردن میل مهارها، دسترسی بهتر جوشکار برای جوشکاری کل فضای خالی و نفوذ بهتر فلز جوش است. مطابق با آیین نامه AWS-D1.1-20 و دستورالعمل جوش های شیار با نفوذ کامل، مقدار دهانه ریشه جوش (R) برابر با ۱۰ میلی متر 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 ورق های پشت بند هم جنس با ورق کفستون به ضخامت ۱۰ میلی متر در زیر ورق کفستون استفاده شده است. جهت ایجاد دسترسی کافی برای جوشکاری فضای خالی و نفوذ کامل جوش، توصیه می شود از جوش شیار استوانه ای برای ورق های با ضخامت کم با در نظر گرفتن حداکثر زاویه ۵۵ درجه برای کونیک کردن میل مهارها استفاده شود.

مطابق با شکل (۸-الف)، مقطع جوش شیار استوانه ای مشابه با جوش شیار نیم جناغی است که حول محور مرکزی

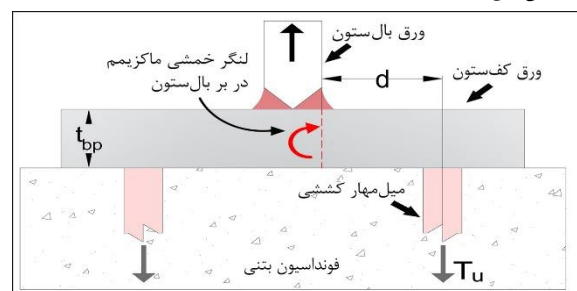
این پژوهش، طراحی اتصالات بر اساس ضوابط آیین نامه و مدهای گسیختگی است.



شکل ۹- اتصال جوش شیاری مخروطی

طبق پژوهش بیورک (۲۰۱۸)، بر اساس نرخ سردشوندگی ورق فولادی، حداقل ضخامت ورق کفستون برابر با اندازه قطر میل مهار مصرفی توصیه شده است [۱۵]. اما به دلیل وجود خروج از مرکزیت بین میل مهار و محور ورق بال ستون، برای طراحی ضخامت ورق کفستون باید مدهای گسیختگی محتمل از قبیل تسلیم خمشی ورق، گسیختگی برش پانچ و گسیختگی برشی فلز جوش مورد بررسی قرار گیرند. طراحی ورق کفستون در شرایط تست آزمایشگاهی در اجزای T شکل کششی باید به طوری باشد که ورق کفستون در حین بارگذاری الاستیک باقی بماند تا میل مهارها به حد گسیختگی برسند.

برای کنترل تسلیم خمشی ورق کفستون، ماکزیمم لنگر خمشی ایجاد شده ناشی از نیروی گسیختگی میل مهار برای هر اتصال جوشی باید کمتر از ظرفیت لنگر خمشی پلاستیک ورق کفستون باشد. با توجه به شکل (۱۰)، ماکزیمم لنگر خمشی در براتصال بال ستون رخ می دهد و مقدار ضخامت مورد نیاز برای ورق کفستون جهت جلوگیری از تسلیم خمشی از رابطه (۱۱) حاصل می شود.



شکل ۱۰- تسلیم خمشی ورق کفستون

در رابطه (۱۱) پارامتر t_{bp} بیان کننده مقدار ضخامت ورق کفستون، f_{y-bp} تنش تسلیم ورق کفستون و d فاصله بین محور مرکزی میل مهار تا برستون است.

$$M_{u-bp} = T_u \times d \times \frac{L_{eff} \times t_{bp}^2}{4} \times f_{y-bp} = M_{p-bp} \quad (11)$$

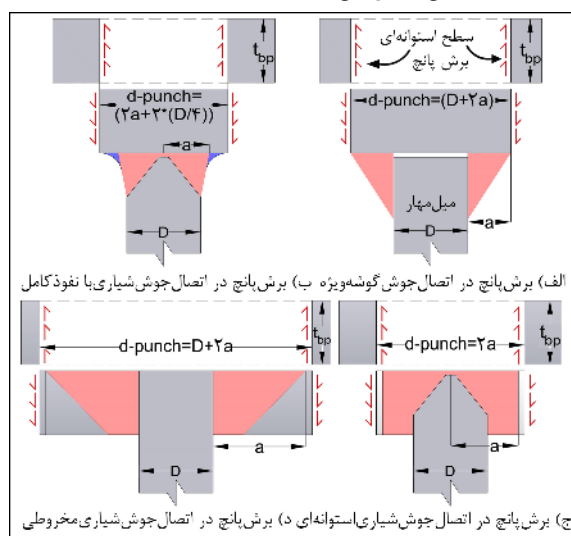
گسیختگی برش پانچ یکی از مهم ترین معیارهای مورد نظر برای طراحی ضخامت ورق کفستون است. مدهای گسیختگی مرتبط با برش پانچ و اندازه قطر پانچ شده برای هر اتصال جوشی در شکل (۱۱) نشان داده شده اند. بر اساس رابطه (۱۲)، مقدار ضخامت ورق کفستون با توجه به معیار گسیختگی برش پانچ برای هر اتصال جوشی حاصل می شود. در این رابطه پارامتر $(d-punch)$ بیان کننده قطر پانچ شده سوراخ ورق کفستون است و تنش برشی در مساحت جانبی استوانه سوراخ شده در نظر گرفته شده است.

$$T_u \times E(0.6f_{y-bp})(\pi(d-punch)t_{bp}) \quad (12)$$

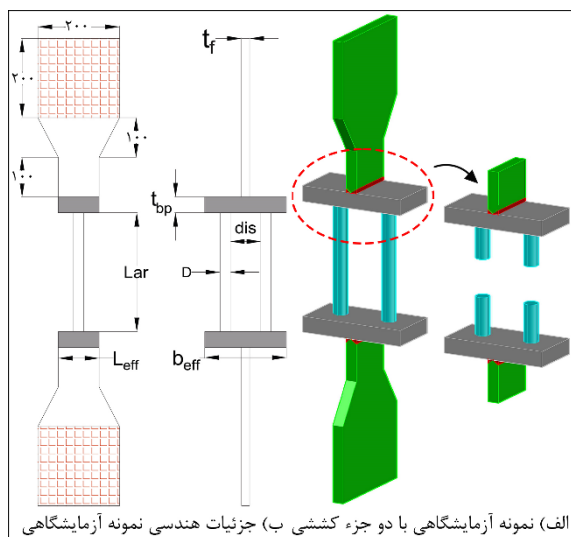
معیار بعدی برای طراحی ضخامت ورق کفستون، گسیختگی برشی فلز جوش در اتصالات جوش شیاری استوانه ای و جوش شیاری مخروطی است که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در معیار گسیختگی برش پانچ، گسیختگی در فلز ورق کفستون رخ می دهد. اما در معیار گسیختگی برشی فلز جوش، گسیختگی در فلز جوش ایجاد می شود. بنابراین بر اساس رابطه (۱۳)، مقدار ضخامت ورق کفستون با توجه به معیار گسیختگی برشی فلز جوش محاسبه می شود. در این رابطه پارامتر (d_w) بیان کننده قطر سوراخ شده از فلز جوش است.

$$T_u \times E(0.6f_{y-bp})(\pi t_{bp} d_w) \quad (13)$$

بیشترین مقدار ضخامت ورق کفستون حاصل شده از سه معیار طراحی ذکر شده، به عنوان ضخامت اصلی ورق کفستون در هر اتصال جوشی تعیین می شود.



شکل ۱۱- گسیختگی برش پانچ برای هر اتصال جوشی

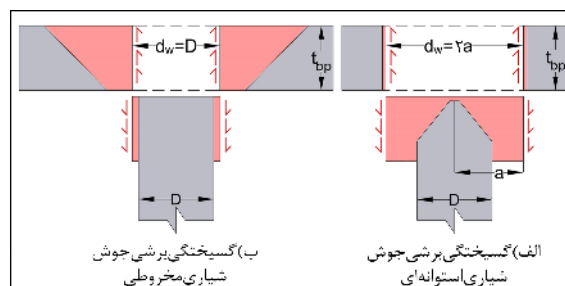


شکل ۱۳- نمای روبه رو و جانبی نمونه آزمایشگاهی

بر اساس آیین‌نامه ACI 318-19 [۲۰]، مقدار عرض و طول مؤثر برای ورق کفستون جزء کششی به حداقل فاصله مجاز آیین‌نامه‌ای بین میل مهارها در فونداسیون بتنی و ابعاد اتصالات جوشی، بستگی دارد. همچنین حداقل فاصله مجاز آیین‌نامه بین میل مهارها نیز سه برابر قطر میل مهار در نظر گرفته شده است. ابعاد طراحی شده برای نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (۱۳-ب) بر اساس ضوابط تعیین شده برای هر اتصال جوشی در جدول (۲) مشخص شده است.

در فرایند طراحی جزء کششی، ورق بال ستون و ورق کفستون تحت نیروی گسیختگی میل مهارها باید الاستیک باقی بمانند. بنابراین مقدار ضخامت ورق کفستون و بال ستون طبق معیارهای مشخص شده، در هر نمونه آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین قسمتی از عرض ورق بال ستون در محل قرارگیری فک‌های دستگاه کشش، افزایش یافت تا لغزشی بین فک و سطح ورق بال ستون ایجاد نشود.

در نمونه E۲۵-۱ و E۴۰-۱ اتصال T شکل اول با جوش گوشه ویژه و اتصال T شکل دوم با جوش شیاری با نفوذ کامل است. در نمونه E۲۵-۲ و E۴۰-۲ اتصال T شکل جوش شیاری مخروطی و جوش شیاری استوانه‌ای ساخته شد. در همه نمونه‌ها از میل مهارهای شکل‌پذیر CK45 استفاده شده است.



شکل ۱۲- اتصال جوش شیاری استوانه‌ای

۳- توضیحات فرآیند آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده

نتایج تست‌های تعیین مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده در این پژوهش از قبیل میلگرد CK45 با قطر ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر و ورق فولادی ST52 نورد شده با ضخامت ۲۰ میلی‌متر برای بال ستون در جدول (۱) نشان داده شده است. برای جوشکاری اتصالات میل مهارها، از الکتروود E8018 با مقاومت کششی نهایی ۵۵۲ مگاپاسکال متناسب با فلز ورق کفستون استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح

واحد	mm	Mpa	Mpa	-
میل مهار	D	Fy	Fu	ϵ_u
CK45	۲۵	۴۰۶	۶۵۷	۲۵.۵٪
CK45	۴۰	۳۷۶	۶۵۴	۲۱.۵٪
بال ستون	t	Fy	Fu	ϵ_u
ST52	۲۰	۳۶۷	۵۶۴	۲۶٪

۳-۲- طراحی و مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی

در هر نمونه آزمایشگاهی، دو جزء کششی متشکل از دو میل مهار با خروج از مرکزیت نسبت به محور بال ستون به همراه اتصالات جوشی متفاوت مطابق با شکل (۱۳-الف) ساخته شدند. تعداد چهار نمونه آزمایشگاهی جهت ارزیابی مقاومت، مقایسه انواع اتصالات جوشی و تعیین نوع شکست میل مهارها، تحت آزمایش‌های کشش مستقیم قرار گرفتند. در هر نمونه، از میل مهارهای با طول ۴۰ سانتی‌متر جهت تعیین میدان کرنش سطح میل مهار و مشخص شدن باریک‌شدگی در انتهای آزمایش استفاده شدند.

جدول ۲- ابعاد هندسی نمونه‌ها (برحسب میلی‌متر)

نمونه	میلگرد	D	dis	L _{ar}	t _{bp}	B _{eff}	L _{eff}	t _f
E۲۵-۱	CK45	۲۵	۷۵	۴۰۰	۴۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰
E۲۵-۲	CK45	۲۵	۱۳۰	۴۰۰	۴۰	۳۱۰	۱۵۰	۲۰
E۴۰-۱	CK45	۴۰	۱۲۰	۴۰۰	۷۰	۳۲۰	۱۶۰	۳۰
E۴۰-۲	CK45	۴۰	۱۸۰	۴۰۰	۷۰	۴۳۰	۲۰۰	۳۰

برای طراحی ابعاد جوش گوشه ویژه، در ابتدا مقدار نیروی گسیختگی میل‌مهارهای CK45 به‌عنوان بیش‌ترین نیروی کششی اعمالی به اتصالات جوشی، طبق رابطه (۱) محاسبه شد و با استفاده از روابط (۲)، (۳)، (۸) و (۹)، بیش‌ترین مقدار بعد افقی (a) برای جوش گوشه ویژه تعیین شد. مقدار بعد افقی (a) برای جوش شیار با نفوذ کامل نیز با استفاده از رابطه (۱۰) تعیین می‌شود. در جدول (۳) مقادیر طراحی‌شده بعد (a) برای هر اتصال جوشی مشخص شده است.

جدول ۳- ابعاد هندسی اتصالات جوشی (برحسب میلی‌متر)

اتصال جوشی	معیار حاکم	بعد طراحی‌شده	
		D25-CK45 t _{bp} =۴۰mm	D40-CK45 t _{bp} =۷۰mm
جوش گوشه ویژه	رابطه ۸	۲۲	۱۴
جوش شیار با نفوذ کامل	رابطه ۱۰	۲۶	۱۶
جوش شیار استوانه‌ای	R, D	۳۰	۲۲/۵
جوش شیار مخروطی	R, t _{bp}	۶۹	۴۳

برای ابعاد جوش شیار استوانه‌ای و مخروطی، مقدار دهانه ریشه جوش (R) برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و بقیه ابعاد بر اساس ضوابط آیین‌نامه AWS-D1.1-20 تعیین شدند. اندازه بعد افقی (a) برای جوش شیار مخروطی بستگی به مقدار ضخامت ورق کف‌ستون و اندازه دهانه ریشه جوش دارد.

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

جهت انجام تست کشش برای هر نمونه آزمایشگاهی، از دستگاه کشش مستقیم Schenck با ظرفیت نیرویی ۲۰۰۰ کیلونیوتون استفاده شد. تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف تست شدند. بعد از ساخت

اتصالات بر اساس ابعاد طراحی‌شده، نمونه‌های آزمایشگاهی داخل فک‌های نگهدارنده دستگاه کشش مستقیم مطابق با شکل (۱۴) قرار گرفتند. دستگاه کشش مجهز به سیستم اندازه‌گیری تغییر مکان سنج خطی^۱ بود که به وسیله آن نمودار نیرو-جابجایی هر نمونه قابل رسم بود. نمونه‌ها با کم‌ترین سرعت بارگذاری تحت نیروی کششی قرار گرفتند و در حین انجام آزمایش، از روش همبستگی تصاویر دیجیتال دو بعدی [۲۲ و ۲۳] برای تعیین مقادیر کرنش در نواحی مورد نظر استفاده شد. بنابراین از یک دوربین عکس‌برداری مدل CANON1200D با کیفیت ۱۸ مگاپیکسلی دارای لنز با فاصله کانونی ۵۵-۱۸ میلی‌متر مطابق با شکل (۱۴) استفاده شد.

همبستگی تصاویر دیجیتال یک روش اندازه‌گیری غیرتماسی است که جایگزین روش‌های تماسی از قبیل کرنش‌سنج‌ها است. این روش مبتنی بر پردازش تصاویر دیجیتال و محاسبات عددی است که از نظر مونتاژ، صرفه‌جویی در هزینه و دقت در مقایسه با روش‌های معمولی مقرون‌به‌صرفه‌تر است [۲۳]. داده‌های مهمی مانند مقدار کرنش موضعی در جوش‌ها، کرنش تسلیم و کرنش نهایی از این روش حاصل می‌شوند. برای استفاده از این روش در ابتدا باید الگوی رنگی سیاه و سفید روی سطح میل‌مهار ایجاد شود تا با استفاده از آن، مقادیر کرنش هر نقطه از سطح مشخص شود. در ابتدا سطح میل‌مهار باید تمیز و شفاف باشد. سپس روی سطح میل‌مهار با اسپری رنگ مشکی لایه نازکی از رنگ به‌صورت کامل پاشیده شده و بعد از خشک شدن رنگ، رنگ سفید جهت ایجاد نقاط سفید با مقدار خیلی کم روی سطح مشکی پاشیده می‌شود. سپس کیفیت الگوی رنگی آماده‌شده، توسط نرم‌افزار GOM-Correlate [۲۴] بررسی می‌شود. در هنگام رنگ‌آمیزی باید دقت شود که تراکم نقاط سفید به اندازه‌ای باشد تا کیفیت الگوی رنگی جهت تشخیص بهتر حرکت نقاط نسبت به هم، افزایش یابد. برای تنظیم نور محیط و افزایش کیفیت عکس‌برداری از سطح میل‌مهار، از پروژکتور نور مدل AVLK576LED استفاده شده است.

^۱ Linear Variable Differential Transformer (LVDT)



شکل‌پذیری اتصالات و نمودار نیرو-جاب‌جایی در هر نمونه مشخص شد. مقدار ظرفیت نیرویی هر یک از اتصالات جوشی به همراه خروج از مرکزیت با قطرهای مختلف میل‌مهارها تعیین شدند. در هر نمونه تأثیر حرارت ناشی از جوشکاری در نوع شکست و محل شکست میل‌مهارها مورد بررسی قرار گرفتند. در همه نمونه‌ها، ورق‌های کفستون متصل به میل‌مهار تا لحظه شکست میل‌مهار، الاستیک باقی ماندند و تغییرشکل خمشی در ورق‌ها رخ نداد. در انتهای هر آزمایش انجام‌شده، نمودار نیرو-جاب‌جایی و میدان کرنش سطح مورد بررسی حاصل از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و نمودارهای خروجی دستگاه کشش تهیه شدند.

۴-۱- نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی E۲۵-۱ و E۴۰-۱

اتصالات جوشی ساخته‌شده در نمونه E۲۵-۱ و E۴۰-۱، جوش گوشه ویژه و جوش شیار با نفوذ کامل به همراه دو میل‌مهار CK45 هستند. میدان کرنش سطح نمونه E۲۵-۱ قبل از شکست میل‌مهار و محل شکست میل‌مهار به ترتیب در شکل (۱۵-الف) و (۱۵-ب) نشان داده شده‌اند. در این نمونه، مقدار کرنش ۵۳/۷۵ درصد در محل قبل از شکست میل‌مهار که بیش‌تر از مقدار کرنش گسیختگی میل‌مهار CK45 با قطر ۲۵ میلی‌متر است، مشاهده شده است. بنابراین شکست میل‌مهار به‌صورت کاملاً شکل‌پذیر در ناحیه میانی در نیرویی برابر با نیروی گسیختگی میل‌مهار رخ داده است. همچنین مطابق با شکل (۱۵-الف) به‌دلیل مقادیر کرنش بسیار کم در ناحیه اتصالات، جوش‌ها تا آخرین لحظه از بارگذاری، الاستیک باقی ماندند. ماکزیمم جاب‌جایی دو سر اتصال و کرنش متوسط به‌ترتیب برابر با ۶۰ میلی‌متر و ۱۷ درصد اندازه‌گیری شده‌اند.

میدان کرنش سطح نمونه E۴۰-۱ قبل از شکست میل‌مهار و محل شکست میل‌مهار به‌ترتیب در شکل (۱۶-الف) و (۱۶-ب) نشان داده شده‌اند. در این نمونه، مقدار کرنش ۲۶/۰۹ درصد در محل قبل از شکست میل‌مهار که بیش‌تر از مقدار کرنش گسیختگی میل‌مهار CK45 با قطر ۴۰ میلی‌متر است، مشاهده شده است. بنابراین شکست میل‌مهار به‌صورت کاملاً شکل‌پذیر در ناحیه نزدیک به اتصال جوش شیار با نفوذ کامل در نیرویی برابر با نیروی گسیختگی میل‌مهار رخ داده است. همچنین مطابق با شکل (۱۶-الف) به‌دلیل مقادیر کرنش بسیار کم در ناحیه اتصالات، جوش‌ها تا آخرین لحظه از بارگذاری در ناحیه الاستیک



شکل ۱۴- محیط آزمایشگاه- (۱) دستگاه کشش- (۲) فک ثابت (۳) فک متحرک- (۴) تغییر مکان سنج خطی- (۵) نمونه آزمایشگاهی (۶) دوربین عکس‌برداری- (۷) سه‌پایه- (۸) لپ‌تاپ- (۹) نورپردازی (۱۰) سطح مورد بررسی- (۱۱) الگوی رنگی سیاه و سفید

مطابق با شکل (۱۴) جهت حفظ ارتفاع و جلوگیری از ایجاد اعوجاج در عکس‌برداری، سه‌پایه مخصوص به همراه دوربین در فاصله یک متری از نمونه آزمایشگاهی قرار گرفت و در حین بارگذاری، در هر ۱۵ ثانیه یک عکس از سطح الگوی رنگی مورد نظر گرفته شد و داده‌های مربوط به عکس توسط کابل رابط به لپ‌تاپ منتقل شد.

در انتها با استفاده از مقدار نیروی مشخص‌شده در دستگاه کشش در هر لحظه از آزمایش و مقدار جاب‌جایی به‌دست‌آمده از طریق نرم‌افزار GOM-Correlate [۲۴]، نمودار نیرو-جاب‌جایی و میدان کرنش سطح میل‌مهار از این روش نوین تهیه شد. در فرایند تحلیل نرم‌افزار GOM-Correlate، اندازه و جهی و فاصله نقاط از هم به‌ترتیب ۲۱ و ۱۶ پیکسل در نظر گرفته شدند. در انتها از کانتورهای رنگی میدان کرنش حاصل از این روش در جهت تشخیص نوع شکست نرم یا تردگونه میل‌مهارها، محل باریک‌شدگی میل‌مهار قبل از شکست و وضعیت الاستیک باقی‌ماندن اتصالات جوشی استفاده شده است.

۴-۲ نتایج آزمایشات

نمونه‌های آزمایشگاهی، تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند و رفتار کششی اتصالات جوشی، نوع شکست میل‌مهارها،

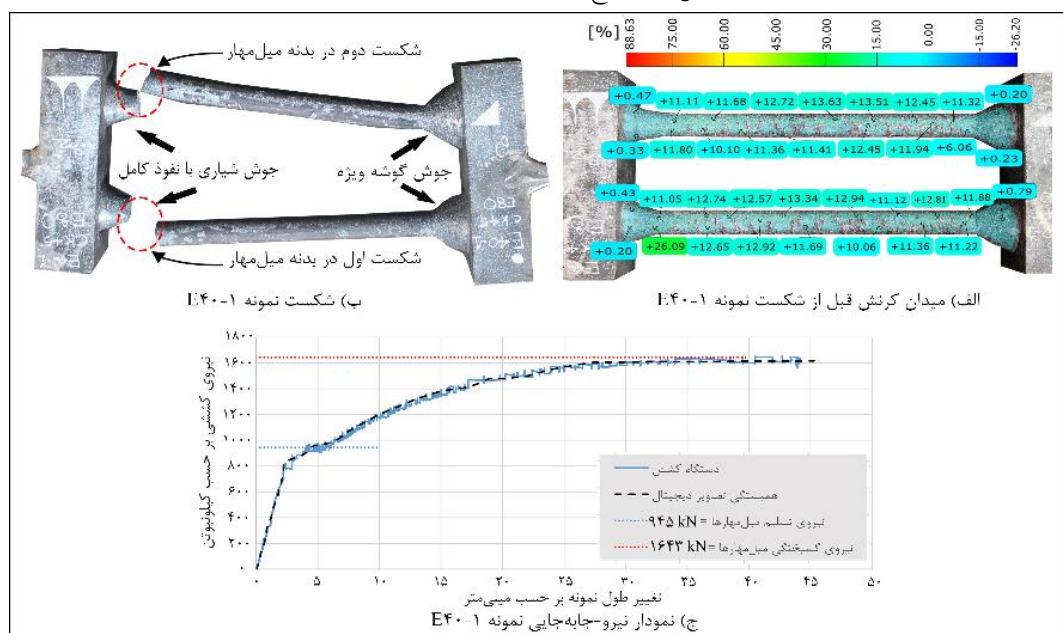
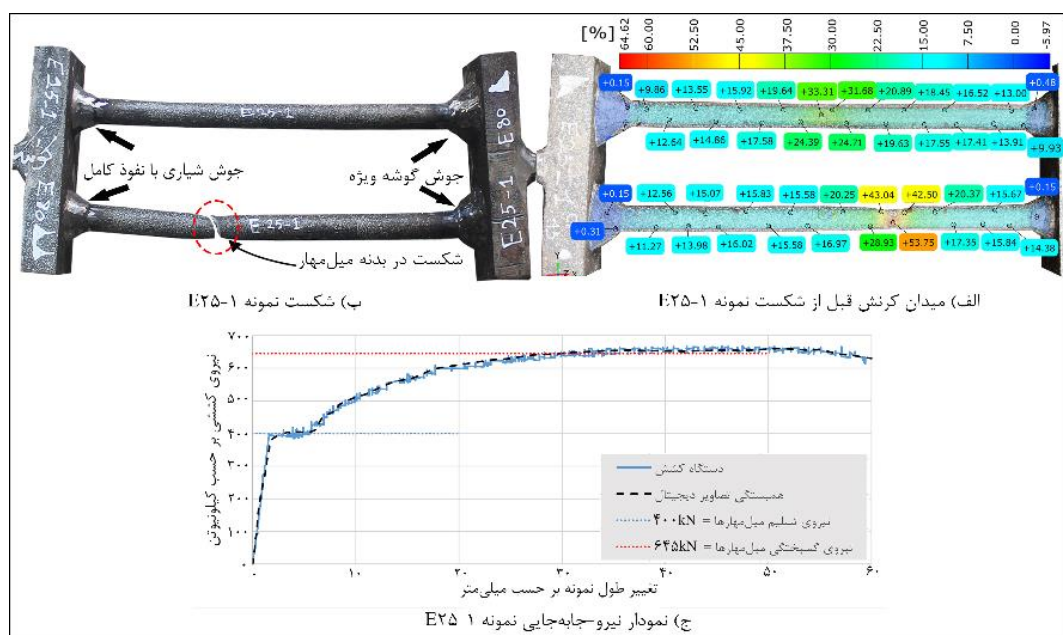
باقی ماندند. ماکزیمم جابه‌جایی دو سر اتصال و کرنش متوسط به ترتیب برابر با ۴۵ میلی‌متر و ۱۲ درصد اندازه‌گیری شده‌اند.

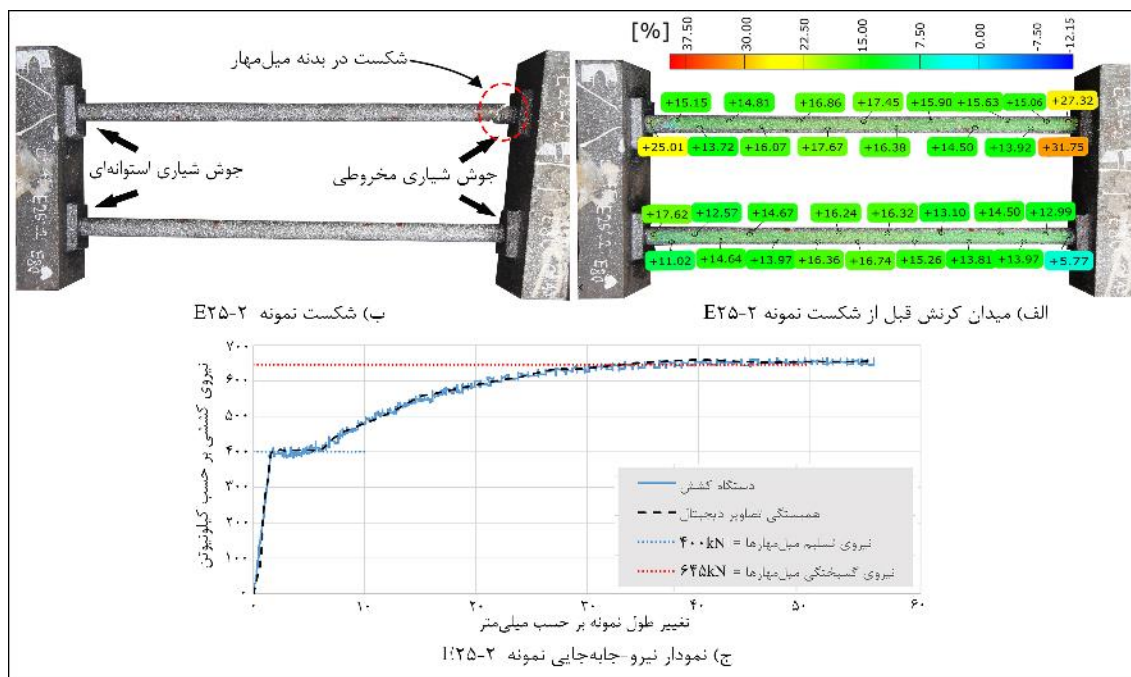
بر اساس شکل‌های (۱۵-ج) و (۱۶-ج) مطابقت زیادی بین نمودار نیرو-جابه‌جایی حاصل از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و اطلاعات خروجی حاصل از دستگاه کشش آزمایشگاه وجود دارد. با توجه به نتایج حاصل از نمونه‌ها، هر دو اتصال جوش گوشه ویژه و جوش شیار با نفوذ کامل، توانایی تحمل نیروی گسیختگی میل‌مه‌ارهای CK45 را دارند. همچنین در هیچ یک از نمونه‌ها، شکست به همراه کاهش مقاومت و شکل‌پذیری در ناحیه HAZ نزدیک به اتصالات جوشی رخ نداد و شکست میل‌مه‌ارها همگی از نوع شکل‌پذیر بودند.

۴-۲- نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی E۲۵-۲ و E۴۰-۲

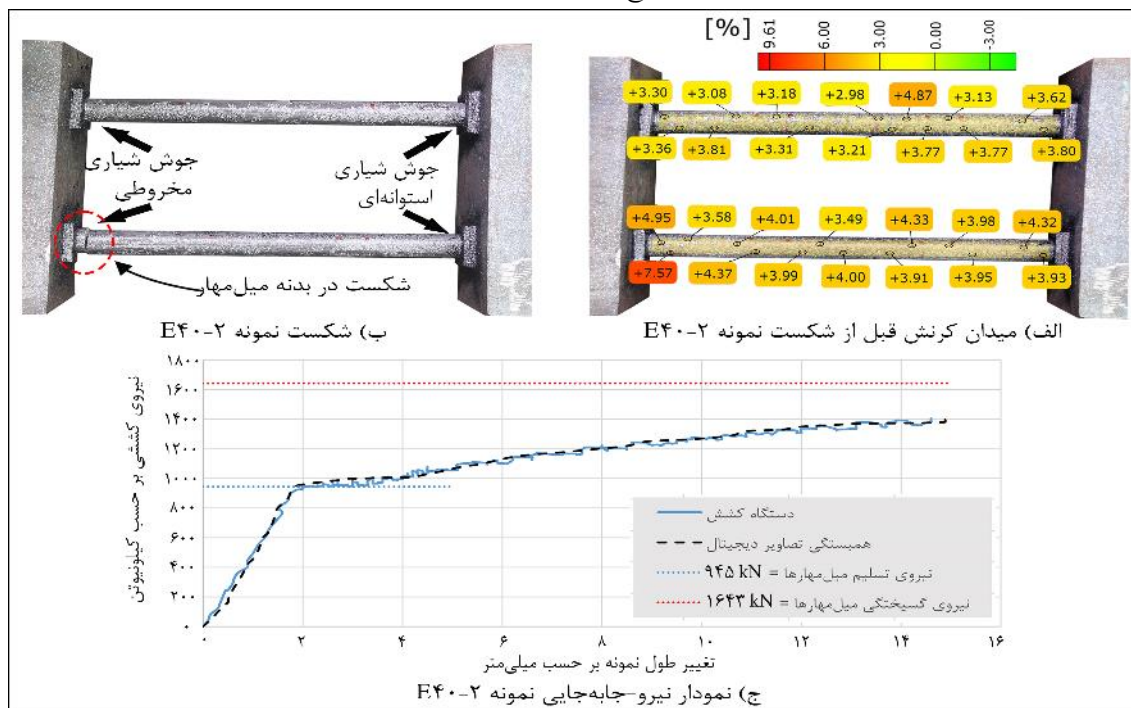
اتصالات جوشی ساخته‌شده در نمونه E۲۵-۲ و E۴۰-۲، جوش شیار استوانه‌ای و جوش شیار مخروطی به همراه دو میل‌مه‌ار CK45 هستند. اتصالات جوشی مورد نظر در داخل ورق قرار داشتند و قابل‌رؤیت نبودند. میدان کرنش سطح نمونه E۲۵-۲ قبل از شکست میل‌مه‌ار و محل شکست میل‌مه‌ار به ترتیب در شکل (۱۷-الف) و (۱۷-ب) نشان داده شده‌اند. مقدار کرنش ۳۱/۷۵ درصد در محل قبل از شکست میل‌مه‌ار که بیش‌تر از مقدار کرنش گسیختگی میل‌مه‌ار CK45 با قطر ۲۵ میلی‌متر است، مشاهده شده است. بنابراین شکست میل‌مه‌ار به صورت کاملاً شکل‌پذیر در ناحیه نزدیک به جوش شیار مخروطی در نیرویی برابر با نیروی گسیختگی میل‌مه‌ارها رخ داده است. ماکزیمم جابه‌جایی دو سر اتصال و کرنش متوسط به ترتیب برابر با ۵۶ میلی‌متر و ۱۶ درصد اندازه‌گیری شده‌اند.

میدان کرنش سطح نمونه E۴۰-۲ قبل از شکست میل‌مه‌ار و محل شکست میل‌مه‌ار به ترتیب در شکل (۱۸-الف) و (۱۸-ب) نشان داده شده‌اند. مقدار کرنش ۷/۵۷ درصد در محل قبل از شکست میل‌مه‌ار که کم‌تر از مقدار کرنش گسیختگی میل‌مه‌ار CK45 با قطر ۴۰ میلی‌متر است، مشاهده شده است. بنابراین شکست میل‌مه‌ار به صورت کاملاً ترد در ناحیه نزدیک به اتصال جوش شیار مخروطی در نیرویی کم‌تر از نیروی گسیختگی میل‌مه‌ارها رخ داده است. ماکزیمم جابه‌جایی دو سر اتصال و کرنش متوسط به ترتیب برابر با ۱۵ میلی‌متر و ۴ درصد اندازه‌گیری شده‌اند. بنابراین در این نمونه، حرارت ناشی از جوشکاری باعث کاهش مقاومت و شکل‌پذیری میل‌مه‌ارها شده است. همچنین بر اساس شکل‌های (۱۷-ج) و (۱۸-ج)، نمودار نیرو-جابه‌جایی حاصل از روش همبستگی تصاویر دیجیتال در هر دو نمونه با نمودار حاصل از دستگاه کشش مطابقت دارد. با توجه به نتایج حاصل از نمونه‌ها، هر دو اتصال جوش شیار استوانه‌ای و جوش شیار مخروطی، توانایی تحمل نیروی تسلیم میل‌مه‌ارهای CK45 را دارند. اما اثرات حرارت ناشی از جوشکاری با حجم بالا، باعث کاهش مقاومت و شکست تردگونه میل‌مه‌ارهای CK45 با قطر ۴۰ میلی‌متر در نزدیکی اتصال جوش شیار مخروطی شده است. همچنین در نمونه‌های مورد بررسی، شکست میل‌مه‌ارها در نزدیکی جوش شیار مخروطی به دلیل حجم جوشکاری بسیار زیاد در این اتصال، رخ داده است. جهت جلوگیری از شکست میل‌مه‌ار ناشی از حرارت جوشکاری در ناحیه HAZ توصیه می‌شود که عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش برای جوشکاری اتصالات جوشی انجام شود.





شکل ۱۷- نتایج و نمودارهای نمونه E25-2



شکل ۱۸- نتایج و نمودارهای نمونه E40-2

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با قراردادن میل‌مهارها زیر ورق کف‌ستون در حالت کلی به‌صورت با خروج از مرکزیت نسبت به محور بال ستون با استفاده از اتصالات جوشی میل‌مهار، می‌توان انتظار داشت که عامل ایجاد پینچینگ در نمودار هیستریزس حذف گردد.

بنابراین مقاومت و سختی اتصال در حین باربرداری به‌دلیل عدم وجود پینچینگ کاهش نمی‌یابد. علاوه بر آن میل‌مهارهای فشاری و کششی عمدتاً ظرفیت نهایی ستون را به فونداسیون منتقل می‌کنند. تمام اجزای اتصال از جمله ورق‌کف‌ستون، اتصالات جوشی، میل‌مهارها و بتن، به‌دلیل عدم تعویض یا ترمیم‌پذیری باید الاستیک باقی بمانند و منبع شکل‌پذیری، داخل مفصل پلاستیک

در ناحیه انتهایی مقطع ستون باشد. در این صورت اتصال کف-ستون پیشنهادی در حین بارگذاری کاملاً الاستیک باقی می‌ماند. از لحاظ تئوری با الاستیک‌ماندن میل‌مهارها و اصل هم‌سازی کرنش بین میل‌مهار و بتن، کرنش‌های خیلی کمی در بتن ایجاد شده و از خردشدگی بتن جلوگیری می‌شود. همچنین به دلیل الاستیک‌بودن و تعداد سیکل‌های بارگذاری کم در حین زلزله، از اثر خستگی کم‌چرخه و پرچرخه صرف‌نظر شد. بنابراین سختی و مقاومت اتصال کف-ستون باید بیش‌تر از سختی و مقاومت مقطع ستون باشد. به دلیل محصورشدن اتصال جوشی و میل‌مهار در بتن و عدم کمانش میل‌مهار، اتصال جوشی تحت فشار وضعیت ایمن‌تری نسبت به اتصال جوشی تحت کشش دارد. جهت ارزیابی مقاومت و رفتار اتصالات جوشی تحت کشش، از اجزای کششی T شکل با استفاده از اتصالات جوش گوشه ویژه، جوش شیار با نفوذ کامل، جوش شیار استوانه‌ای و جوش شیار مخروطی جهت اتصال میل‌مهار به زیر ورق کف-ستون استفاده شد. رفتار میل‌مهارها و اتصالات جوشی در اتصال T شکل تحت کشش یا فشار همانند رفتار میل‌مهارها در اتصالات پیشنهادی کف-ستون‌ها بود. فاصله بین میل‌مهارها از هم، به حداقل فاصله مجاز آیین‌نامه‌ای و جزئیات هندسی اتصالات جوشی بستگی دارد. اتصالات جوشی مورد بررسی، بر اساس مدهای گسیختگی در اجزای اتصال جوشی و ضوابط هندسی آیین‌نامه‌ای جوش‌های شیار طراحی شدند. بر اساس قطرهای مختلف میل‌مهارهای شکل‌پذیر CK45، دو اتصال T شکل به همراه اتصالات جوشی مختلف، در هر چهار نمونه آزمایشگاهی ساخته شدند و تحت بار کششی قرار گرفتند. از بررسی اثر برش بر اتصالات جوشی صرف‌نظر شد.

در نمونه‌های ۱-۲۵۰، ۲-۲۵۰ و ۱-۴۰، اتصالات جوشی توانایی تحمل نیروی گسیختگی میل‌مهارها را دارا بودند و بر اساس میدان‌های کرنش حاصل از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، شکست میل‌مهارها در کرنشی بیش‌تر از مقدار کرنش گسیختگی رخ داده است. همچنین کاهش در ظرفیت مقاومتی و شکل‌پذیری میل‌مهارها در ناحیه HAZ رخ نداد و اتصالات جوشی تا آخرین لحظه از بارگذاری الاستیک باقی ماندند. اگرچه در نمونه ۲-۴۰، شکست میل‌مهارها به دلیل کاهش جزئی ظرفیت مقاومتی و شکل‌پذیری ناشی از جوشکاری زیاد در نزدیکی اتصال جوش شیار مخروطی، در نیرویی کم‌تر از نیروی گسیختگی میل‌مهارها رخ داده است. همچنین با توجه به مقادیر کرنش نشان داده‌شده

قبل از شکست در ناحیه نزدیک به اتصال جوش شیار مخروطی، شکست میل‌مهار به صورت کاملاً ترد رخ داده است. بر اساس نتایج، اتصالات جوشی مورد بررسی از لحاظ مقاومتی توانایی تحمل نیروی گسیختگی میل‌مهارها را دارند و می‌توان اتصالات جوشی را در زنجیره انتقال نیرو در اتصالات کف-ستون پیشنهادی به صورت الاستیک طراحی کرد و این اتصالات در حین بارگذاری الاستیک باقی می‌مانند. اتصالات جوشی بر اساس ماکزیمم نیروی کششی میل‌مهارها طراحی شدند و در برابر این ظرفیت نهایی میل‌مهار، مقاومت کردند. بنابراین سختی و مقاومت بیش‌تری نسبت به میل‌مهار دارند. به همین دلیل در اتصالات کف-ستون پیشنهادی نیز اتصالات جوشی زیر ورق کف-ستون، مقاومت بیش‌تری نسبت به میل‌مهارها خواهند داشت.

بر اساس نتایج، هیچ شکستی در نیرویی کم‌تر از نیروی تسلیم میل‌مهارها رخ نداد و همه اتصالات جوشی الاستیک و نیرو-کنترل باقی ماندند. جهت جلوگیری از شکست میل‌مهار ناشی از حرارت جوشکاری در ناحیه HAZ توصیه می‌شود که عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش برای جوشکاری اتصالات جوشی انجام شود. نتایج نمودارهای نیرو-جابجایی به دست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال با نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل شده از دستگاه کشش، مطابقت زیادی داشتند. بنابراین از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای تعیین مقادیر کرنش اتصالات جوشی در حین بارگذاری و نوع شکست میل‌مهارها استفاده شد.

با توجه به ابعاد طراحی شده برای اتصالات جوشی، جوش شیار مخروطی و جوش شیار استوانه‌ای به دلیل مصرف زیاد فلز جوش، صرفه اقتصادی ندارند و فقط در موارد خاص توصیه به استفاده از این نوع اتصالات می‌شود. همچنین اتصالات جوش گوشه ویژه و مصرف کم‌تر فلز جوش، گزینه‌های مناسبی برای ایجاد اتصالات جوشی زیر ورق کف-ستون نسبت به بقیه جوش‌ها هستند. در اتصالات پیشنهادی، قطر و تعداد میل‌مهارهای مصرفی نسبت به اتصالات متداول افزایش می‌یابند. اما الزاماً ضخامت ورق کف-ستون به دلیل استفاده از میل‌مهارهای قطور افزایش نیافته و بر اساس معیار بحرانی خمش در ورق کف-ستون طراحی می‌شود. البته با کاهش خروج از مرکزیت بین میل‌مهار و محور بال ستون، مقدار لنگر خمشی ایجادشده در ورق کف-ستون کاهش می‌یابد. اتصالات کف-ستون پیشنهادی به دلیل نداشتن هزینه استفاده از

ورق‌های سخت‌کننده، عدم جوشکاری ورق‌ها، عدم نیاز به سوارخ‌کاری در اتصالات جوش گوشه ویژه و جوش شیار با نفوذ کامل و عدم استفاده از بولت‌ها، از لحاظ اقتصادی نسبت به اتصالات متداول توجیه‌پذیر هستند.

۶- 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. همچنین از آقای مهندس محمود علی دانشجوی دکتری دانشگاه تهران که در به ثمر رساندن ارزیابی‌های عددی این پژوهش یاری رساندند تشکر ویژه‌ای می‌گردد.

- [16] Chen, C., Zhang, X., Zhao, M., Lee, CK., Fung, TC., and Chiew, SP. (2017), "Effects of welding on the tensile performance of high strength steel T-stub joints", *Journal of Structures* Feb 1 (Vol. 9, pp. 70-78). Elsevier.
- [17] Kamtekar, AG. (1982), "A new analysis of the strength of some simple fillet welded connections", *Journal of Constructional Steel Research*. Jan 1;2(2):33-45.
- [18] Nie, C., and Dong, P. (2012), "A traction stress based shear strength definition for fillet welds", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Nov;47(8):562-75.
- [19] AWS-D1.4/D1.4M., (2018), *Structural Welding Code Steel Reinforcing Bars*. American Welding Society.
- [20] ACI 318., (2019), *Building code requirements for structural concrete and commentary*. American Concrete Institute.
- [21] AWS-D1.1/D1.1M., (2020) *Structural Welding Code-Steel*. American Welding Society
- [22] Ekstrom, MP. (2012), "Digital image processing techniques", Academic Press; Dec 2.
- [23] 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*. May 12;16(10):7037-48.
- [24] GOM Correlate. GOM—Precise Industrial 3D Metrology .Braunschweig, Germany. Available online: <https://www.gom.com/index.html>.
- [1] Romeo, R., Puntel, E., Pierobon, S., and Baldassino, N. (2023), "Component method applied to base plate connections of steel racks", *Journal of Constructional Steel Research*. Sep 1;208:107999.
- [2] Latour, M., and Rizzano, G. (2013), "Full strength design of column base connections accounting for random material variability", *Engineering Structures*. Mar 1;48:458-71.
- [3] Lim, WY., Lee, D., and You, YC. (2017), "Exposed column-base plate strong-axis connections for small-size steel construction", *Journal of Constructional Steel Research*. Oct 1;137:286-96.
- [4] Tremblay, R., Filiatrault, A., Timler, P., and Bruneau, M. (1995), "Performance of steel structures during the 1994 Northridge earthquake", *Canadian Journal of Civil Engineering*. Apr 1;22(2):338-60.
- [5] DeWolf J.T. (1982), "Column base plates", *Structural Engineering Practice*, 1(1), p. 39-51.
- [6] Lee, D., Goel, SC., and Stojadinovic, B. (2002), "Relative Strength Effects on Seismic Behavior of Column-Base Plate Connections under Weak Axis Bending", In *Proceedings of the Seventh US National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Boston, Massachusetts.
- [7] Gomez, I., Kanvinde, A., and Deierlein, GG. (2010), "Exposed column base connections subjected to axial compression and flexure", *AISC*, Chicago. Aug;257, p. 56-86.
- [8] Astaneh, A., Bergsma, G., and Shen, JH. (1992), "Behavior and design of base plates for gravity, wind and seismic loads", In *Proceedings of the national steel construction conference* Jun (pp. 209-214). Chicago, IL: AISC.
- [9] Fahmy, M. (2000), "Seismic behavior of moment-resisting steel column bases", *University of Michigan*.
- [10] Rodas, PT., Zareian, F., and Kanvinde, A. (2016), "Hysteretic model for exposed column-base connections", *Journal of Structural Engineering*. Dec 1;142(12):04016137.
- [11] Astaneh-Asl, A. (2008), "Seismic behavior and design of base plates in braced frames", *Steel TIPS*, Technical Information and Product Service, Structural Steel Educational Council.
- [12] AISC-360, (2016), *Specification for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction.
- [13] Eurocode 3, (2005), *Design of steel structures*, part 1-8: Design of joints.
- [14] Vakili, S.H., Mirghaderi, SR., Epackachi, S., Asgarpour, 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*. Aug 10;31(11): p.e1937.
- [15] Björk, T., Ahola, A., and Tuominen, N. (2018), "On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel", *Welding in the World*. Sep;62:985-95.

