

Investigation of Tensile Strength of Welded Splices of Steel Bars

Pouyan Ashrafpour¹, Mohsen Adabi², Ehsan Darvishan^{*3}, Siyavash Moeini⁴

1- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Roudehen branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

2- Assistant Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Roudehen branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

4- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Roudehen branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

ABSTRACT

Due to the increasing need to use rebar in construction, many efforts have been made to optimize its use. One way to reduce rebar usage is to use welded splice instead of overlap splice. However, the Iranian Concrete Code only refers to the welded splice generalities and there are no rules on how to splice. Therefore, the purpose of this study is to investigate the tensile strength of welded splice bars with different configurations. For this purpose, rebars with diameters of 10, 14, 18, 22 and 25 were connected to each other by a variety of discontinuous and continuous overlap patterns by welding with the E6013 electrode. Then the tensile strength of the connected rebars was obtained by tensile test. Then, with Abaqus software and the birth and death method, a variety of splice patterns were modeled and the results were compared with laboratory results. The results show that the optimum welded splice is the model with discontinuous weld with a weld length of 5d.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 August 2019

Revise Date: 09 December 2019

Accept Date: 04 February 2020

Keywords:

Overlap joint;

Welded joint;

Discontinuous welding;

Modeling;

Abaqus

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.198377.1930

*Corresponding author: Ehsan Darvishan

Email address: darvishan@riau.ac.ir

بررسی استحکام کششی وصله های جوشی میلگرد های فولادی

پویان اشرف پور^۱، محسن آدابی^۲، احسان درویشان^{۳*}، سیاوش معینی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۴- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

چکیده

با توجه به نیاز روز افزون به استفاده از میلگرد در ساختمان سازی، تلاش های زیادی برای بهینه کردن مصرف آن انجام شده است. یکی از روش های کاهش مصرف میلگرد استفاده از وصله جوشی به جای وصله پوششی است. با وجود این، در آیین نامه بتن ایران تنها به کلیات وصله جوشی اشاره شده و هیچ ضابطه ای برای نحوه انجام وصله ارائه نشده است. از این رو، هدف از این تحقیق بررسی مقاومت کششی میلگردهای دارای وصله جوشی با پیکربندی های مختلف است. برای این منظور میلگردهای با قطر ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۲ و ۲۵ با انواع الگوهای هم پوشانی منقطع و پیوسته توسط جوش کاری با الکتروود E6013 به یکدیگر متصل شدند. سپس مقاومت کششی میلگردهای متصل شده توسط آزمایش کشش به دست آمد. در ادامه به کمک نرم افزار آباکوس و با روش تولد و مرگ المان، انواع الگوهای وصله، مدل شده و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج حاکی از آن است که وصله جوشی بهینه، جوش منقطع با طول جوش d_s می باشد.

کلمات کلیدی: وصله پوششی، وصله جوشی، جوش منقطع، مدل سازی، آباکوس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2020.198377.1930	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.198377.1930	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۸/۱۱/۱۵	۱۳۹۸/۱۱/۱۵	۱۳۹۸/۰۹/۱۸	۱۳۹۸/۰۶/۰۱
احسان درویشان darvishan@riau.ac.ir					*نویسنده مسئول: بست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

با توجه به کاربرد گسترده میلگرد در ساخت ساختمان، پل و دیگر سازه‌ها، استفاده از روشی بهینه در اتصال میلگردها به یکدیگر، یک امر ضروری است. عملکرد اتصالات، هنگام وقوع زمین لرزه باید مناسب باشد و در عین حال سرعت اجرای بالا و هزینه‌های منطقی داشته باشد.

متداول‌ترین نوع اتصال، اتصال پوششی (اورلپ^۱) است که از کنار هم قرار گرفتن دو میلگرد به موازات یکدیگر و بستن آن‌ها با مفتول ایجاد می‌شود. در این روش، انتقال نیرو از طریق گیرایی بین میلگردها و بتن اطراف آن‌ها از یک میلگرد به میلگرد دیگر انجام می‌شود. در کشورهای توسعه یافته، با توجه به معایب روش اتصال پوششی، استفاده از اتصالات مکانیکی (کوپلینگ^۲) و جوشی مورد توجه قرار گرفته است که این امر در کشور ایران نیاز به توجه بیشتری دارد [۱].

روش اتصال هم‌پوشانی دارای مزایا و معایب مختلفی است. این روش تنها در مورد میلگردهای با قطر کمتر از ۳۶ میلیمتر مجاز می‌باشد و طبق بند ۲، ۵، ۶، ۱، ۲۰ آیین‌نامه بتن ایران، استفاده از آن در اتصالات تیرها به ستون‌ها، در طولی معادل دو برابر ارتفاع مقطع از برتکیه‌گاه و در محل‌هایی که امکان تشکیل مفصل پلاستیک در آن‌ها در اثر تغییر مکان‌های غیرالاستیک قاب باشد، مجاز نیست [۲].

در اتصال پوششی، طول وصله، طولی است که دو میلگرد در کنار هم قرار می‌گیرند. حداقل طول وصله برابر با طول مهار می‌گردد در بتن می‌باشد [۳].

از دیگر روش‌های کاربردی وصله کردن میلگردها در قطعات بتنی، می‌توان به وصله‌های جوشی اشاره کرد. جوش کاری دو قطعه میلگرد به یکدیگر انواع مختلفی دارد که کاربردی‌ترین آن‌ها، اتصال جوشی ذوبی با الکتروود و اتصال جوشی سر به سر خمیری می‌باشد. در اتصال جوشی ذوبی با الکتروود، جوش‌پذیری بر اساس کربن معادل میلگردها تعیین می‌شود. برای میلگردهای کم کربن، بسته به میزان تنش تسلیم و قطر میلگرد، استفاده از الکتروود روکش دار مناسب توسط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (۹-۴-۱-۶) ضروری است [۴].

از مزایای اتصال جوشی میلگردها نسبت به اتصالات پوششی می‌توان به صرفه‌جویی ۱۵ تا ۳۰ درصدی در مصرف میلگرد، کاهش خطاهای انسانی در چیدن میلگردها، کاهش وزن سازه و افزایش مقاومت در برابر بارهای خارجی و اختلاط بهتر بتن اشاره کرد [۵].

اتصال پوششی در مقایسه با اتصال جوشی، نه تنها اتصال چندان مطمئنی نیست، بلکه باعث ایجاد ضایعات بالای میلگرد می‌شود. روش اتصال جوشی، به علت کاهش مصرف میلگرد، از نظر اقتصادی نیز در پروژه تاثیر مثبت دارد [۱، ۶].

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که اتصال جوشی-پوششی قابلیت اطمینان، کارایی و سازگاری را فراهم می‌کند که با اتصال پوششی فراهم نمی‌شود. همچنین برای میلگرد با قطر بیشتر از ۱۴ میلیمتر، اتصال جوشی نسبت به اتصال پوششی صرفه اقتصادی دارد [۷]. مطالعات نشان می‌دهد که در قطرهای بالاتر میلگرد، اتصالات جوشی بسیار بهتر از اتصالات پوششی عمل می‌کنند [۸، ۹، ۱۰]. انواع مختلفی برای این وصله‌ها می‌توان در نظر گرفت. به عنوان مثال، وصله می‌تواند یک خط جوش در وسط قسمت هم‌پوشانی شده و یا دو خط جوش در دو طرف قسمت هم‌پوشانی شده داشته باشد. طبق تحقیقات، وصله با دو خط جوش در دو طرف عملکرد بهتری دارد [۱۱]. همچنین برای جلوگیری از کماتش و تخریب موضعی بتن، جوش منقطع پیشنهاد شده است [۱۲، ۱۳].

یکی از مهم‌ترین علل بروز ترک در سازه‌های جوش کاری شده، وجود تنش‌های پسماند ناشی از فرایند جوش کاری است. کاهش تنش‌های پسماند، برای جلوگیری از ترک خوردگی تنش، لازم و تخمین مقدار و توزیع این تنش‌ها، امری ضروری است. توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوش کاری به عوامل متعددی مانند: ابعاد قطعه، مشخصات ماده، شرایط تکیه‌گاهی، حرارت ورودی، تعداد پاس‌های جوش و ترتیب پاس‌ها بستگی دارد. در نتیجه، تخمین توزیع این تنش‌ها در جوش کاری چند پاسه بسیار پیچیده است و امکان حل تحلیلی معادلات حاکم به دلیل رفتار غیرخطی شدید وجود ندارد. از طرفی استفاده از روش‌های اندازه‌گیری تجربی نیز اغلب پرهزینه و زمان‌براست. از این رو

^۱Overlap^۲Coupling

دردهه‌های اخیر استفاده از روش‌های عددی به خصوص روش اجزای محدود، برای تحلیل فرایند جوش کاری مورد توجه محققین قرار گرفته است.

مطالعه روی تنش‌های حرارتی فرایند جوش کاری از سال ۱۹۳۰ آغاز گردید و اولین نتایج آن در سال ۱۹۳۶ ارائه شد. در این سال برای اولین بار از کامپیوتر برای تحلیل تنش‌های حرارتی استفاده شد. پس از آن، تحقیقات گسترش بیشتری یافت و در اوایل دهه ۱۹۷۰، محققان توانستند با استفاده از روش اجزای محدود و با انجام تحلیل‌های ترموالاستوپلاستیک، به محاسبه میدان‌های دمایی و تنش‌های پسماند جوشی بپردازند [۱۴]. در سال ۱۹۷۸، با استفاده از روش اجزای محدود دو بعدی، توزیع تنش پسماند در سطوح بالا و پایین یک صفحه پایه در نزدیکی خط جوش، طی فرایند جوش کاری زیرپودری، مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که استحاله‌های فازی طی سیکل سرد شدن، اثر مهمی روی تنش‌های پسماند دارد [۱۵]. در سال ۱۹۹۶ تحقیقات نشان داد که فرایند هیدرو تست، تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری محیطی لوله‌ها را ۵۰ الی ۷۵ درصد کاهش می‌دهد [۱۶]. همچنین با افزایش فشار در فرایند هیدروتست، تنش‌های پسماند جوشی کاهش بیشتری یافتند؛ از طرف دیگر افزایش بیش از حد فشار باعث خرابی لوله گردید. از این رو فشار مناسب پیشنهادی برای این فرایند، فشاری است که بتواند تنش محیطی تا ۹۰ درصد حداقل تنش تسلیم را در لوله ایجاد کند [۱۷]. نتایج تحقیقات نشان داد که با استفاده از یک مدل دو بعدی تقارن محوری و آنالیز غیر وابسته، می‌توان تنش‌های پسماند جوشی را در اتصال چندپاسه لوله‌های جدار ضخیم محاسبه کرد [۱۸]. توزیع تنش‌های پسماند در اتصال جوشی صفحات فولادی با استحکام بالا نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه حاصل شد که تنش عمود بر امتداد جوش کاری، اثر بیشتری روی ایجاد ترک نسبت به تنش در دو امتداد دیگر دارد [۱۹]. پس از آن تاثیر روش‌های مختلف اعمال حرارت ورودی به داخل ناحیه مذاب با در نظر گرفتن ترکیب‌های متفاوتی از بارگذاری‌های سطحی و حجمی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که برای یک ورق با ضخامت کم، تاریخچه دمایی حاصل از بارگذاری تمام حجمی، بهترین تطابق را با اندازه گیری‌های تجربی خواهد داشت [۲۰].

اگرچه تحقیق در مورد وصله‌های جوشی موضوع جدیدی نیست و این وصله‌ها در آیین‌نامه‌های مختلف معرفی شده‌اند، ولی تحقیقات بسیار کمی در این زمینه انجام شده و عدم قطعیت درباره این نوع وصله‌ها زیاد است؛ به همین دلیل هنوز هیچ ضابطه‌ای در مورد آن در آیین‌نامه‌ها ارائه نشده است. از طرفی تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بیشتر آزمایشگاهی هستند و تا کنون این اتصال به طور دقیق مدل سازی نشده است. از این رو، هدف از این تحقیق بررسی استحکام کششی وصله‌های جوشی میلگرد های فولادی به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی به کمک نرم افزار آباکوس است. در این تحقیق، ابتدا استحکام کششی وصله با جوش های منقطع و پیوسته کناری بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس این وصله‌ها در نرم‌افزار آباکوس و با روش تولد و مرگ المان که از دقت بسیار بالایی برخوردار است، شبیه‌سازی شدند تا مقایسه‌ای دقیق بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از نرم‌افزار صورت گیرد. هدف از این مقایسه، دستیابی به الگوی بهینه از نظر طول جوش و فاصله بین جوش‌ها بود. در پایان روابطی برای طراحی بر اساس طول جوش مناسب ارائه گردید.

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- مواد مورد استفاده

ترکیب شیمیایی میلگرد مورد استفاده در این تحقیق به کمک روش طیف سنجی نشر جرقه به دست آمده و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. طبق استاندارد GOST 5781 این میلگرد ها از نوع A۳ بودند. الکتروود مورد استفاده در این تحقیق E6013 ساخت شرکت آما بود.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی (بر حسب درصد وزنی) میلگرد A۳ به دست آمده از روش طیف سنجی نشر جرقه

نوع عنصر	Fe	C	Si	Mn	P	S
درصد وزنی	۹۹	۰,۲۲	۰,۲۳	۰,۵	۰,۰۲	۰,۰۳

۲-۲- دستگاه جوشکاری

برای انجام فرایند جوشکاری از رکتی فایر ساخت شرکت میلر استفاده شد. شدت جریان مورد استفاده برای جوشکاری روی ۱۱۰ آمپر تنظیم شد.

۲-۳- وصله جوشی

در این تحقیق وصله جوشی پوششی به دو صورت منقطع و پیوسته مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۳-۱- نمونه وصله پوششی با جوش منقطع کناری

وصله پوششی با جوش منقطع کناری برای میلگردهایی با قطر ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۲ و ۲۵ میلیمتر مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۱- الف نمونه وصله پوششی با جوش منقطع کناری را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود برای ساخت نمونه ها، دو قطعه میلگرد ۵۰ سانتیمتری در کنار هم قرار گرفته و طول هم پوشانی و فاصله بین جوش ها نسبت به متغیر a که مقادیر آن برابر با ۱d، ۲d، ۳d و ۴d و ۵d بود، در نظر گرفته شد که منظور از d قطر میلگرد است.

۲-۳-۲- نمونه وصله پوششی با جوش پیوسته کناری

وصله پوششی با جوش پیوسته کناری برای میلگردهایی با قطر ۱۰، ۱۴، ۲۲ و ۲۵ میلیمتر مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۱- ب نمونه وصله پوششی با جوش منقطع پیوسته را نشان می دهد. این نوع وصله، با استفاده از نتایج به دست آمده برای وصله پوششی با جوش منقطع کناری، فقط در نرم افزار آباکوس مدل سازی شد. برای مدل سازی نمونه ها دو قطعه میلگرد ۵۰ سانتیمتری در کنار هم قرار گرفته و طول هم پوشانی و فاصله بین جوش ها نسبت به متغیر a و مقادیر آن برابر ۹d، ۱۲d و ۱۵d در نظر گرفته شد.



شکل ۱: وصله پوششی با (الف) جوش منقطع و (ب) پیوسته کناری

۲-۴- آزمایش کشش

برای انجام آزمایش کشش، از دستگاه امسلر با نرخ کشش ۱۰ mm/min استفاده شد. شکل ۲ یک نمونه وصله با جوش کناری در حالت $a=5d$ را در حال انجام آزمایش کشش نمایش می دهد.



شکل ۲: نمونه با وصله پوششی با جوش منقطع کناری در حالت $a=5d$ در حال انجام آزمایش کشش

۲-۵- بررسی میکروسکوپی الکترونی روبشی

به منظور بررسی مورفولوژی سطح شکست، از میکروسکوپ الکترونی روبشی با نام تجاری Mira3 Tescan استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی به کمک الکترون‌های ثانویه تهیه شدند.

۲-۶- خصوصیات مکانیکی فولاد در درجه حرارت‌های بالا

به منظور شبیه‌سازی اتصال جوشی دو میلگرد در نرم‌افزار آباکوس از خصوصیات مطرح شده برای فولاد St-۳۷ در یوروکد ۳ بخش ۱-۲ استفاده شد. موارد مختلف برای تعریف فولاد مثل مدول یانگ، ضریب پواسون، جرم واحد حجم، گرمای ویژه و رسانایی گرمایی با دقت بالا به صورت وابسته به دما در نرم‌افزار اعمال گردید.

۲-۷- مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

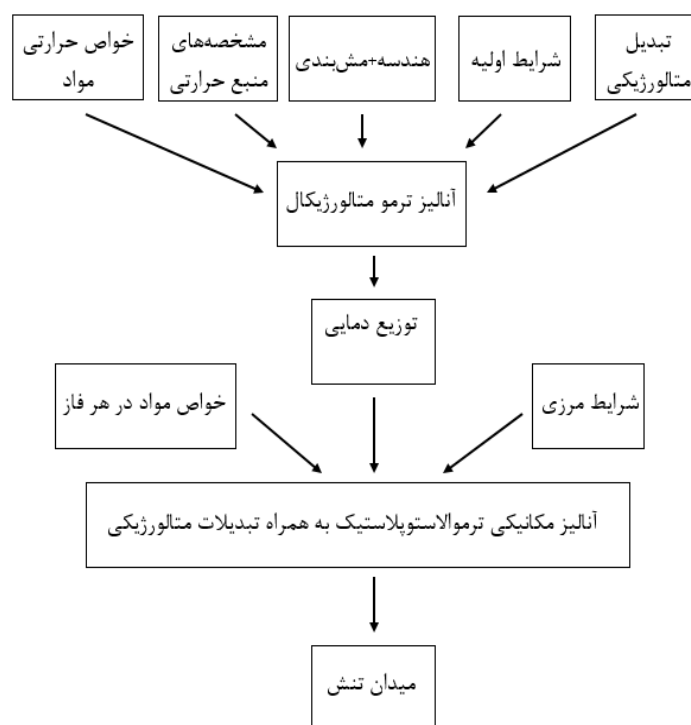
سه حوزه حرارت، متالورژی و مکانیک در مدل‌سازی فرایند جوش کاری، در تقابل با یکدیگر هستند. با انتخاب روش تحلیل برای آنالیز جوش کاری، چگونگی ارتباط این سه حوزه تعیین می‌شود. تقابل این سه حوزه بیانگر آن است که در شبیه‌سازی فرایند، لازم است دو دسته معادله دیفرانسیل حرارتی و مکانیکی به صورت همبسته تحلیل گردند. از این رو در روش اجزای محدود از دو روش کلی و مجزا برای تحلیل این فرایند استفاده می‌شود. روش اول، شامل تحلیل فرایند با در نظر گرفتن همزمان این دو حوزه است که آنالیز وابسته شناخته می‌شود. روش دوم، تحلیل فرایند با در نظر گرفتن این دو حوزه به صورت مجزاست که آنالیز غیر وابسته نام دارد. در فرایند جوش کاری، حرارت باعث تغییرات متالورژیکی در ماده می‌شود که آن هم به نوبه خود بر روی حوزه‌های حرارتی و مکانیکی تاثیر می‌گذارد. همچنین حوزه‌های حرارتی و مکانیکی نیز روی یکدیگر تاثیرگذار هستند که این امر وابستگی معادلات مکانیکی و حرارتی در جسم را به دنبال دارد. از آنجا که در جوش کاری، گرمای حاصل از کرنش پلاستیک ناچیز بوده و می‌توان از اثر کرنش‌های سطحی بر ضریب انتقال حرارت سطوح صرف نظر کرد، معادلات مکانیکی و حرارتی را می‌توان به صورت مستقل حل نمود و از حل غیر وابسته استفاده کرد. روش غیر وابسته که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، از دو مرحله اساسی تشکیل شده است؛ در مرحله اول که تحلیل حرارتی مدل است، یک تحلیل گذرای حرارتی انجام شد. نتایج این تحلیل، در تحلیل مکانیکی به عنوان ورودی مسأله مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت یک تحلیل الاستیک-پلاستیک انجام شد. در شکل ۳ مراحل روش غیر وابسته نشان داده شده است [۲۱].

در این تحقیق از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس [۲۲] برای مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های مکانیکی و حرارتی استفاده گردید. مدل در نرم افزار، مطابق شکل ۴ به صورت سه بعدی ساخته شد.

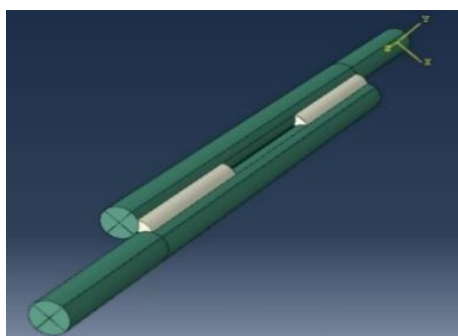
در تحلیل حرارتی، در فرایند جوش کاری یک میدان گرمایی موضعی تا نقطه ذوب ماده و سپس سرمایش در ناحیه جوش ایجاد شد. در این حالت، توزیع دما در جسم غیر یکنواخت بوده و تابعی از مختصات مکانی و زمان است. این حرارت دهی غیر یکنواخت یکی از عوامل اصلی در ایجاد تغییر شکل‌های جوشی می‌باشد. مسأله انتقال حرارت در جوش کاری، یک مسأله وابسته به زمان^۳ است، از این رو معادلات انتقال حرارت در حالت وابسته به زمان برای تحلیل این فرایند مورد استفاده قرار گرفت.

در تحلیل مکانیکی، تاریخچه دمایی به دست آمده از تحلیل حرارتی، به عنوان بارگذاری حرارتی به معادلات تحلیل مکانیکی اعمال شد. تنش و کرنش حرارتی در هر مرحله زمانی محاسبه شده و حالت نهایی تنش، با انباشته شدن تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی در پایان مرحله سرمایش به دست آمد.

^۳Transient



شکل ۳: مراحل روش غیروابسته برای مدل سازی [۲۱]



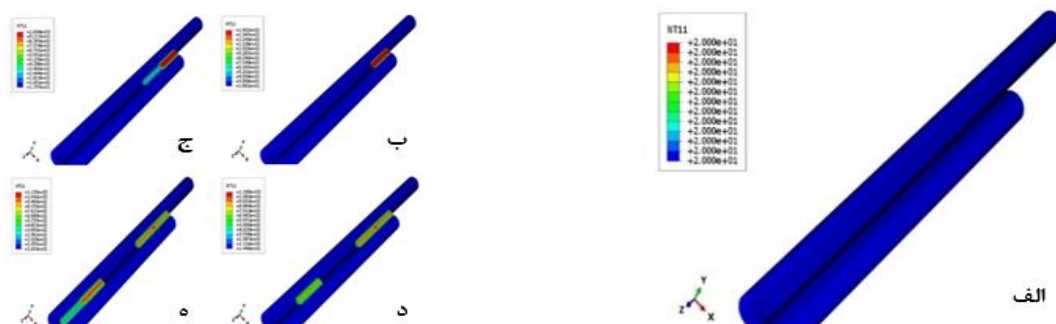
شکل ۴: مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس

با توجه به این که در نرم افزار اجزای محدود آباکوس، حین حل امکان تولید یا حذف المان‌ها وجود ندارد، برای مدل کردن جوش کاری چند پاسه، از قابلیت تولد و مرگ المان‌ها^۴ استفاده شد. در این روش تمامی المان‌ها از ابتدا ایجاد می‌شوند. به جای حذف المان‌هایی که هنوز الکتروود از روی آن‌ها عبور نکرده، از تکنیک مرگ المان‌ها استفاده گردید. برای مرگ المان‌ها، ضریبی کاهنده در سختی المان‌ها منظور شد. همچنین جرم، گرمای ویژه و سایر اثرات المان‌های مرده نیز صفر در نظر گرفته شد و جرم و انرژی المان‌های مرده در مجموع جرم و انرژی کل مدل محاسبه نگردید. به طور مشابه به جای اضافه کردن المان‌هایی که الکتروود از روی آن‌ها عبور می‌کند از قابلیت تولد المان‌ها استفاده شد. در هنگام تولد المان‌ها، ضرایب سختی، جرم، نیروی المان به مقدار اولیه خود باز گشت. بنابراین حل مساله به چند مرحله تقسیم شده و در هر مرحله گروه جدیدی از المان‌ها فعال شدند. بازه زمانی هر مرحله برابر $t_i = x_i / v$ است که x_i طول گروهی از المان‌ها است که باید در آن مرحله فعال شوند و v سرعت جوش کاری است [۲۱]. روند ایجاد شدن المان‌های جوش در شکل ۵ نمایش داده شده است. در تحلیل حرارتی از ۷۵۷۷۰ عدد المان DC3D8 و در تحلیل استاتیکی از ۷۵۷۷۰ عدد المان C3D8R استفاده شد.

^۴Element Birth and Death

در این تحلیل، ابتدا مدل هندسی که متشکل از فلز پایه و جوش است تهیه شده و سپس یک شار حرارتی متحرک که نشان دهنده حرکت قوس الکتریکی بر روی مدل است به مدل اعمال گردید. شار حرارتی می‌تواند به صورت سطحی، حجمی و یا سطحی-حجمی به مدل اعمال شود. شرایط مرزی نیز متناسب با شرایط جوش کاری، به صورت ترکیبی از اتلافات حرارتی تشعشعی و جابجایی تعیین شد. حرارت ناشی از قوس جوش کاری متحرک به صورت یک منبع حرارتی حجمی متحرک با توزیع دو بیضی، مدل گلداک به مدل اجزای محدود اعمال شد. برای این منظور دو ماتریس انتقال و دوران، همزمان روی مدل گلداک اعمال گردید تا این که شار حرارتی در یک مسیر حلقوی حرکت کند [۲۳].

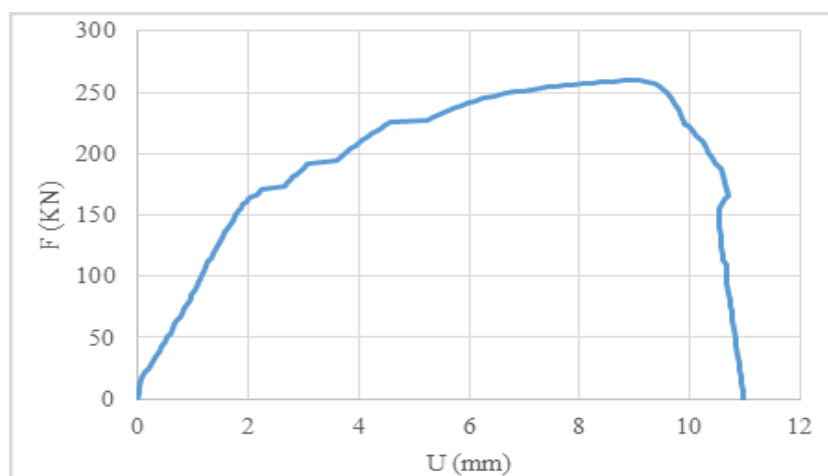
در تحلیل مکانیکی تاریخچه حرارتی به دست آمده از آنالیز حرارتی به عنوان یک بار حرارتی به مدل اعمال گردید، سپس تنش‌ها و کرنش‌های حاصله در هر بازه زمانی با استفاده از یک آنالیز الاستیک-پلاستیک برای جسم محاسبه شد. این عملیات تا سرد شدن قطعه تا دمای محیط ادامه یافت. مقادیر محاسبه شده در مرحله نهایی، نشان دهنده تنش‌ها و کرنش‌های پسماند جوشی هستند.



شکل ۵: مدل تحلیل حرارتی المان‌های جوش در حالت مرگ و سپس متولد شدن المان‌ها (الف) حالت مرگ المان‌ها (ب) تولد یک المان جوش (ج) تولد المان جوش دوم (د) تولد المان جوش سوم (ه) تولد المان جوش چهارم

۳- صحت سنجی مدل

جهت تعریف خصوصیات مصالح در نرم افزار در دمای محیط، ابتدا آزمایش کشش بر روی میلگرد خام (بدون وصله جوشی) با قطر ۲۲ میلی‌متر انجام شد تا خصوصیات تنش کرنش مصالح بدست آید. شکل ۶ منحنی نیرو-جابجایی میلگرد مذکور را نشان می‌دهد. نیروی تسلیم، نیروی نهایی و درصد تغییر طول نسبی از منحنی استخراج و در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۶: منحنی نیرو-جابجایی میلگرد قطر ۲۲ میلی‌متر آزمایشگاهی.

جدول ۲: نتایج آزمایش کشش میلگرد

قطر (mm)	نیروی تسلیم (KN)	نیروی نهایی (KN)	درصد تغییر طول نسبی
۲۲	۱۷۰/۰۵	۲۵۹/۴۹	۱۸

در مرحله بعد جهت صحت سنجی نتایج مدل سازی تحلیلی، آزمایش کشش بر روی میلگردهای جوش شده انجام شده و رفتار این میلگردها با مدل عددی مقایسه شده است. با توجه به تعدد نمونه هایی که می بایست تحت آزمایش کشش قرار بگیرند (۴۰ نمونه)، تنها میلگرد های با وصله پوششی با جوش منقطع کناری تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. برای این منظور، ابتدا میلگرد با قطر ۱۰ میلی متر در حالت $a=1d$ (شکل ۷) و سپس میلگرد با قطر ۱۴ میلی متر و در حالت $a=2d$ (شکل ۸) مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. همانطور که مشاهده می شود در میلگرد با قطر ۱۰ میلی متر گسیختگی از ناحیه جوشکاری شده رخ داده است در حالیکه در میلگرد با قطر ۱۴ میلی متر گسیختگی در میلگرد مشاهده می شود. در ادامه، آزمایش کشش روی تمام میلگرد ها تنها در حالت $a=5d$ انجام شده و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش قطر میلگرد نیروی تسلیم و نهایی افزایش یافتند که این امر به دلیل افزایش قطر میلگرد است. در شکل ۱۲ منحنی های نیرو-جابجایی آزمایشگاهی و تحلیل میلگردهای فوق نشان داده شده است. مطابق شکل انطباق قابل قبولی بین مقادیر تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد.

شکل ۷: نمونه میلگرد ۱۰ با وصله پوششی با جوش منقطع کناری در حالت $a=1d$ بعد از انجام آزمایش کشششکل ۸: نمونه میلگرد ۱۴ با وصله پوششی با جوش منقطع کناری در حالت $a=2d$ بعد از انجام آزمایش کشش

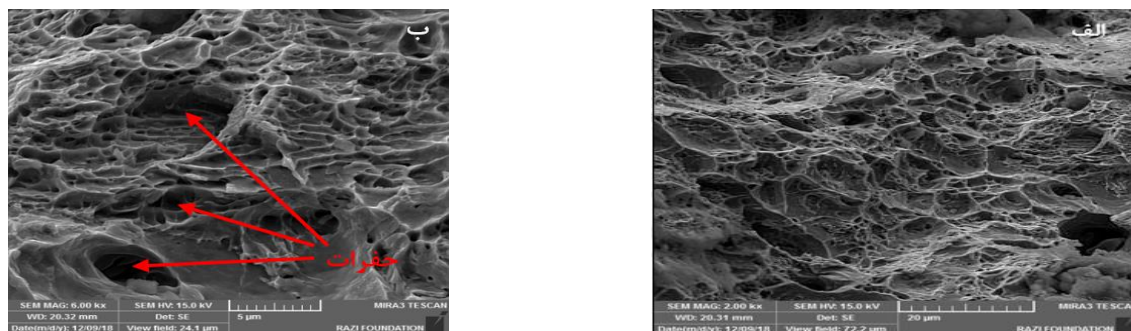
جدول ۳: نتایج آزمایش کشش نمونه ها با وصله جوشی منقطع

محل شکست	نیروی نهایی (KN)	نیروی تسلیم (KN)	قطر (mm)
میلگرد پایه	۴۰	۲۷	۱۰
میلگرد پایه	۹۵	۷۶	۱۴
میلگرد پایه	۱۴۵	۱۱۴	۱۸
میلگرد پایه	۲۵۹	۱۷۰	۲۲
میلگرد پایه	۳۱۲	۲۳۸	۲۵

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی های میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM)

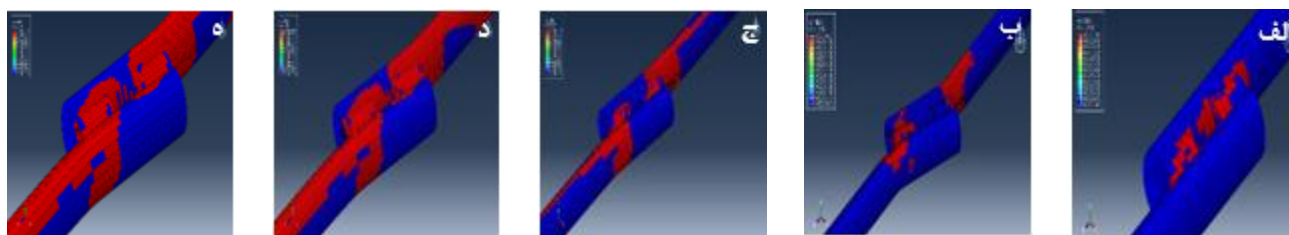
از آنجائیکه در حین جوشکاری امکان ترد شدن نمونه در اثر تشکیل فازهای ناخواسته از قبیل مارتنزیت وجود دارد سطح شکست نمونه ها به منظور تعیین نوع شکست (ترد یا نرم) توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ تصویر سطح مقطع شکست نمونه وصله پوششی با جوش منقطع کناری در بزرگنمایی های مختلف است. همان طور که در تصاویر مشاهده می شود، در سطح شکست نمونه فرورفتگی هایی وجود دارد که بیان گر ریزحفره هایی هستند که با پیوستن به یکدیگر ترک های ماکروسکوپی را در قطعه به وجود آورده اند. این تصاویر بیانگر این است که در قطعه شکست نرم رخ داده است. از این رو می توان نتیجه گرفت که جوشکاری منجر به تشکیل فازهای ناخواسته نشده است.



شکل ۹: تصاویر میکروسکوپی مربوط به سطح مقطع شکست نمونه وصله پوششی با جوش منقطع کناری (الف) با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر (ب) با بزرگ‌نمایی ۶۰۰۰ برابر

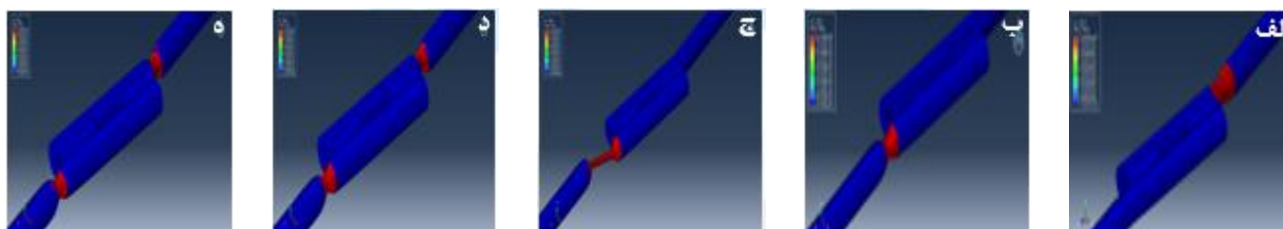
۴-۲- نتایج حاصل از مدل‌سازی در آباکوس

در تمامی مدل‌ها پارامتر $AC\ YIELD^5$ مورد بررسی قرار گرفت. این پارامتر بیان‌گر کرنش فعال تسلیم در هر گام زمانی بارگذاری است و به صورت نسبت کرنش لحظه‌ای به کرنش تسلیم تعریف می‌شود. مقدار این پارامتر بین ۰ و ۱ تغییر کرده و عدد ۱ بیان‌گر تسلیم شدن المان است. تمامی مدل‌ها به جز مدل با متغیر $a=1d$ در آزمایش کشش از روی میلگرد پایه گسیخته شدند. در مدل 1d اتصال جوشی دچار آسیب شد که این امر برای همه قطرهای میلگرد صادق است. در شکل ۱۰، نمونه‌ها با قطرهای مختلف میلگرد در حالت $a=1d$ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۰: نمونه‌های ساخته شده در حالت طول خط جوش 1d منقطع با قطر (الف) ۱۰، (ب) ۱۴، (ج) ۱۸، (د) ۲۲، (ه) ۲۵

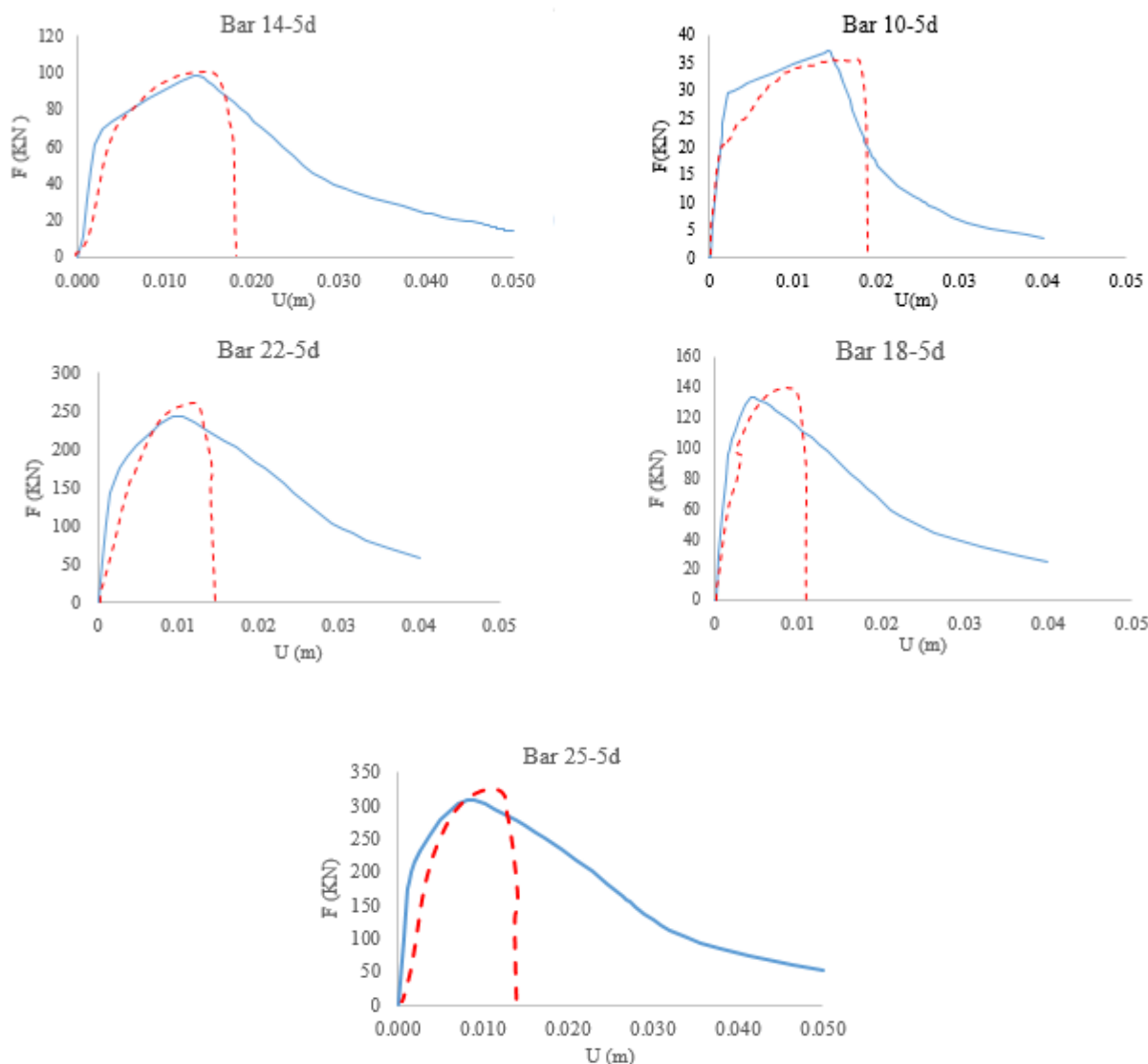
شکل ۱۱ نمونه‌هایی با جوش منقطع و با قطرهای مختلف میلگرد در حالت $a=2d$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، نمونه‌ها از روی میلگردهای پایه دچار گسیختگی شدند و ناحیه جوش‌کاری شده آسیب ندیده است. روند گسیختگی نمونه‌ها از قسمت میلگرد پایه برای سایر نمونه‌ها با جوش منقطع و با قطرهای مختلف میلگرد در حالت‌های $a=3d$ ، $a=4d$ و $a=5d$ و همچنین نمونه‌ها با جوش پیوسته و با قطرهای مختلف میلگرد در حالت‌های $a=9d$ ، $a=12d$ و $a=15d$ مشاهده شد که به جهت اختصار از ارائه آن‌ها صرف نظر گردید.



شکل ۱۱: نمونه‌های ساخته شده در حالت طول خط جوش 2d منقطع با قطر (الف) ۱۰، (ب) ۱۴، (ج) ۱۸، (د) ۲۲، (ه) ۲۵

⁵Actively Yield

۳-۴- نتایج حاصل از مدل سازی در آباکوس و مقایسه آن با نمونه های آزمایشگاهی



شکل ۱۲: نمودار نیرو-جابجایی در حالت طول خط جوش ۵d منقطع برای نمونه با قطر (الف) ۱۰ (ب) ۱۴ (ج) ۱۸ (د) ۲۲ (ه) ۲۵ (خط چین نمودار آزمایشگاهی و خط پیوسته نمودار آزمایشگاهی)

شکل ۱۲ نمودارهای نیرو-جابجایی آزمایشگاهی و عددی (که با استفاده از مدل سازی آزمایش کشش در نرم افزار آباکوس بدست آمده است) را برای میلگرد با قطرهای مختلف و در حالت $a=5d$ نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود نمودارهای آزمایشگاهی و عددی برای تمامی قطر میلگرد ها روند مشابهی را نشان می دهند. به عبارت دیگر ابتدا نیرو اعمالی افزایش یافته تا به نقطه تسلیم برسد در این نقطه شیب منحنی کاهش یافته اما روند افزایش نیرو ادامه می یابد تا بعد از رسیدن به میزان حداکثری، نیروی اعمالی شروع به کاهش یافتن می نماید. دلیل کاهش نیرو به گلوبی شدن^۶ در نقطه حداکثر نیرو نسبت داده می شود. در حقیقت در هنگام گلوبی شدن سطح مقطع کاهش یافته و بنابراین به میزان نیروی کمتری برای تغییر شکل نیاز است. لازم به ذکر است در مدل آزمایشگاهی شکست بصورت آنی می باشد ولی در مدل نرم افزاری شکست بصورت پیش رونده است. این تفاوت به علت مدل سازی سختی سازه در نرم افزار می باشد بدین صورت که اگر در نرم افزار سختی سازه به صفر برسد مدل دچار خطا شده و نتیجه ای حاصل نمی شود؛ از این رو برای رفع این

⁶ Necking

مشکل در لحظه شکست سختی بسیار ناچیز در نرم افزار لحاظ می شود که این مسئله منجر به ایجاد اختلاف در نمودارهای عددی و آزمایشگاهی می گردد.

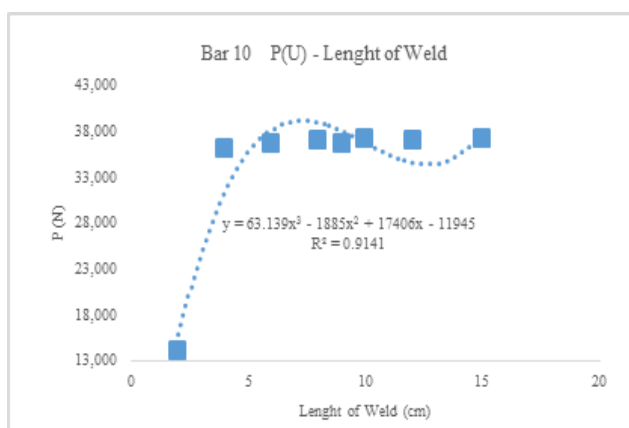
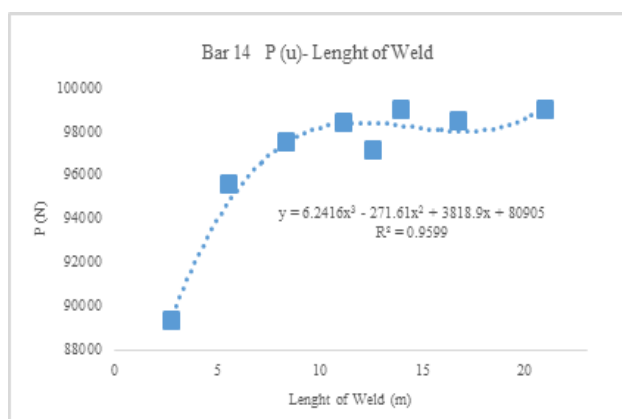
مقادیر کرنش نیروی تسلیم، کرنش نیروی نهایی، نیروی تسلیم و نیروی نهایی بدست آمده از شکل ۱۲ (که حاصل نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی است) در جدول ۴ ارائه شده است.

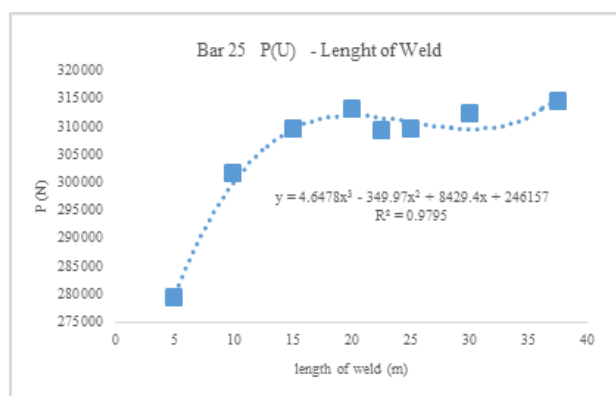
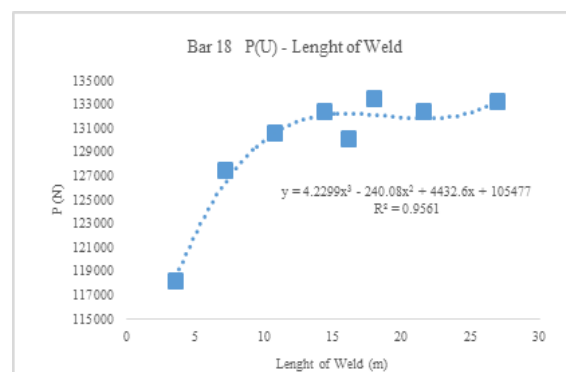
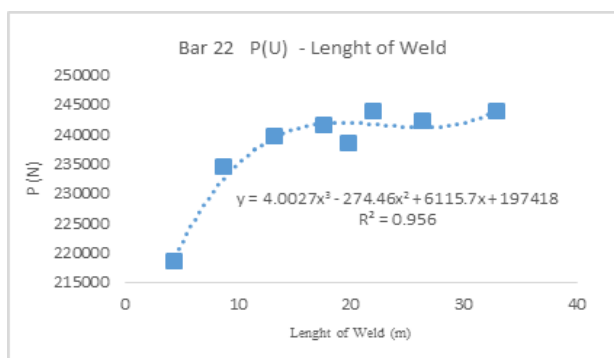
جدول ۴: مقایسه مقادیر به دست آمده از مدل سازی در نرم افزار آباکوس و آزمون کشش در آزمایشگاه

نیروی تسلیم (N)	جابجایی نظیر نیروی تسلیم	نیروی نهایی (N)	جابجایی نظیر نیروی نهایی	پارامترهای مورد بررسی
۲۹۶۴۱	۰/۰۰۲۸۰۶	۳۷۲۷۱	۰/۰۱۴۳	نتایج نرم افزار
				نتایج آزمایش
				درصد خطا
۶۹۱۶۹	۰/۰۰۲۸۰۹	۹۵۳۴۹	۰/۰۱۳۴	نتایج نرم افزار
				نتایج آزمایش
				درصد خطا
۱۰۵۷۸۲	۰/۰۰۲۰۵۸	۱۳۳۴۲۲	۰/۰۰۴۶	نتایج نرم افزار
				نتایج آزمایش
				درصد خطا
۱۶۳۴۳۵	۰/۰۰۲۱۰۳۶	۲۴۳۹۳۷	۰/۰۰۹۹	نتایج نرم افزار
				نتایج آزمایش
				درصد خطا
۲۱۵۵۲۰	۰/۰۰۱۱	۳۰۹۴۲۵	۰/۰۰۸۲	نتایج نرم افزار
				نتایج آزمایش
				درصد خطا

۴-۴- روابط حاصل از مدل سازی در آباکوس

شکل ۱۳ نیروی نهایی بر حسب طول جوش متناظر با این نیرو برای نمونه وصله با جوش منقطع کناری و در حالت $a=\delta d$ را برای قطرهای مختلف میلگرد نشان می دهد. با رگرسیون گیری از پارامترهای موجود روابط مختلفی برای نیروی طراحی حاصل شد که در جداول ۵، ۶ و ۷ برای قطرهای مختلف میلگرد به صورت مجزا ارائه شده است. در این معادله ها، y بیانگر نیرو بر حسب نیوتن و x بیانگر طول جوش بر حسب سانتیمتری باشد.





شکل ۱۳: نمودار نیرو بر حسب طول جوش نمونه‌ها با قطرهای مختلف میلگرد

جدول ۵: معادله نیروی نهایی بر حسب طول جوش

قطر میلگرد	ضریب همبستگی	معادله حاصل از تحلیل تمامی قطرهای مورد بررسی
۱۰	۰,۹۱۴۱	$y = 63.139x^3 - 1885x^2 + 17406x - 11945$
۱۴	۰,۹۵۹۹	$y = 6.2416x^3 - 271.61x^2 + 3818.9x + 80905$
۱۸	۰,۹۵۶۱	$y = 4.2299x^3 - 240.08x^2 + 4432.6x + 105477$
۲۲	۰,۹۵۶	$y = 4.0027x^3 - 274.46x^2 + 6115.7x + 197418$
۲۵	۰,۹۷۹۵	$y = 4.6478x^3 - 349.97x^2 + 8429.4x + 246157$

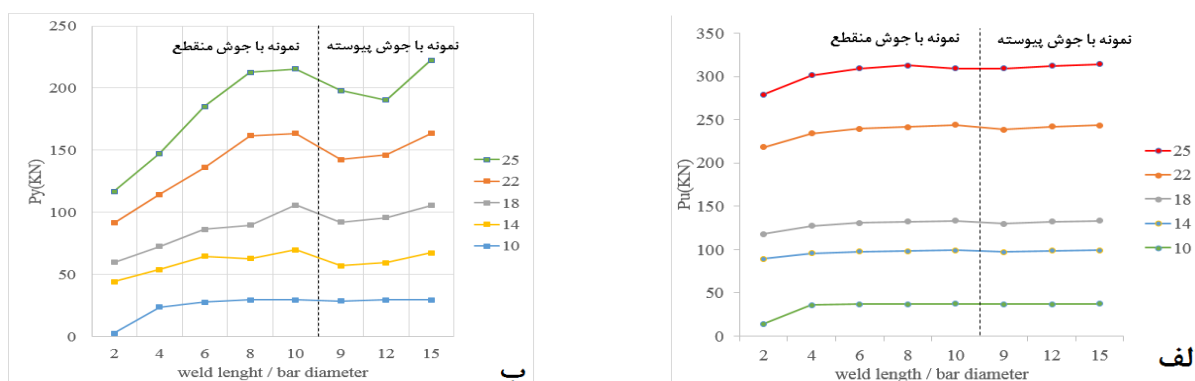
جدول ۶: معادله نیروی نهایی بر حسب جابجایی

قطر میلگرد	ضریب همبستگی	معادله حاصل از تحلیل تمامی قطرهای مورد بررسی
۱۰	۰,۹۹	$y = -5x^3(10^{12}) + 2x^2(10^{11}) - 3x(10^9) + 2(10^7)$
۱۴	۰,۹۹۶۴	$y = -1x^3(10^{11}) + 4x^2(10^9) - 7x(10^7) + 434158$
۱۸	۰,۹۹۹۳	$y = 8x^3(10^{10}) - 2x^2(10^9) + 1x(10^7) + 111661$
۲۲	۰,۹۹۳۸	$y = -2x^3(10^{10}) + 6x^2(10^8) - 8x(10^6) + 280366$
۲۵	۰,۹۸۸۲	$y = 5x^3(10^9) - 5x^2(10^8) + 8x(10^6) + 271927$

جدول ۷: معادله نیروی نهایی بر حسب طول جوش تقسیم بر طول آزاد میلگرد

قطر میلگرد	ضریب همبستگی	معادله حاصل از تحلیل تمامی قطرهای مورد بررسی
۱۰	۰,۸۷۳۱	$y = (3x^3 - 1x^2)(10^7) + 1x(10^6) - 4010.5$
۱۴	۰,۹۳۵	$y = (2x^3 - 1x^2)(10^6) + 243539x + 83874$
۱۸	۰,۹۲۶۱	$y = 1x^3(10^6) - 897402x^2 + 246428x + 111087$
۲۲	۰,۹۰۶۷	$y = 598098x^3 - 736389x^2 + 278692x + 209508$
۲۵	۰,۸۹۶۶	$y = 440766x^3 - 677840x^2 + 311360x + 268594$

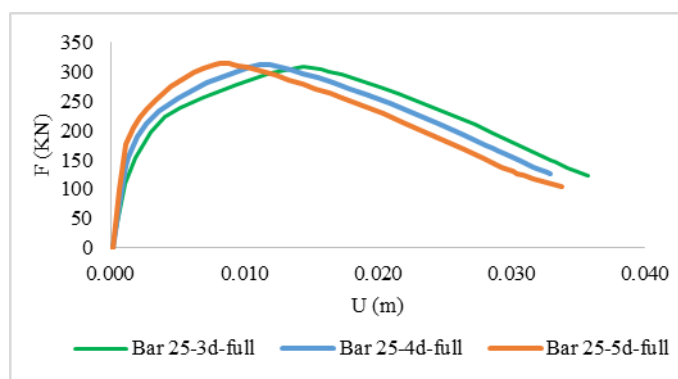
برای به دست آوردن ضابطه‌ای کلی، نمودارهای نیرو-جابجایی و سایر نمودارها بدون بعد شدند. شکل ۱۴ نیروی تسلیم و نیروی نهایی میلگرد با قطرهای مختلف در برابر طول جوش تقسیم بر قطر میلگرد برای هر دو حالت نمونه با جوش منقطع و نمونه با جوش پیوسته را نشان می‌دهد. نقاط موجود در قسمت چپ نمودار نمایانگر نمونه‌ها با جوش منقطع و با مقادیر مختلف متغیر a هستند که به ترتیب برابر با $1d$ ، $2d$ ، $3d$ ، $4d$ و $5d$ می‌باشد. نقاط موجود در قسمت راست نمودار نمایانگر نمونه‌ها با جوش پیوسته و با مقادیر مختلف متغیر a هستند که به ترتیب برابر با $9d$ ، $12d$ و $15d$ می‌باشد. برای میلگرد با قطر ۱۰ افزایش طول جوش تاثیری در افزایش نیروی تسلیم و نیروی نهایی ندارد. با توجه به نمودار با افزایش قطر میلگرد، نیروی تسلیم و نیروی نهایی نیز افزایش می‌یابد که امری طبیعی است.



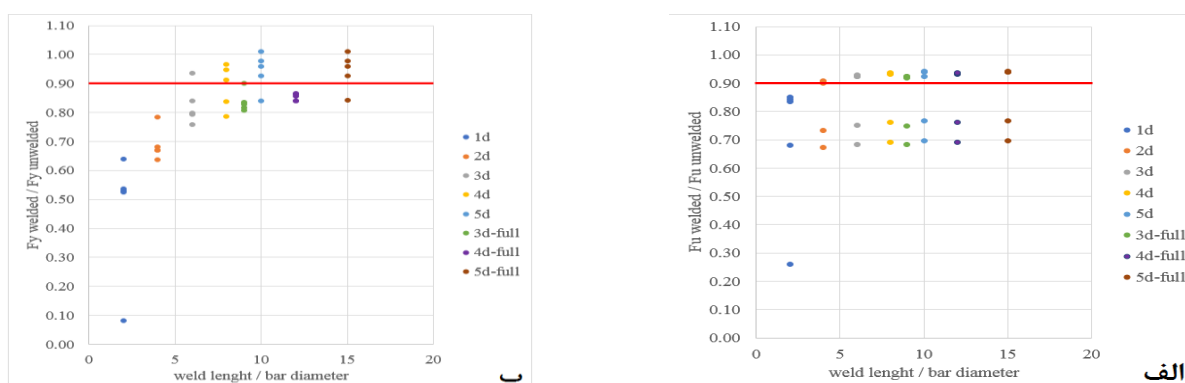
شکل ۱۴: نمودار (الف) نیروی نهایی و (ب) نیروی تسلیم میلگرد با قطرهای متفاوت در برابر طول جوش تقسیم بر قطر میلگرد

با مقایسه نیروی تسلیم و نهایی آزمایش کشش میلگرد با قطر ۲۲ میلی متر (جدول ۲) و وصله جوشی میلگرد با قطر ۲۲ و در حالت $a=5d$ (جدول ۳) می‌توان دریافت که در نمونه‌های آزمایشگاهی، با وجود اینکه میلگردها از محل جوش شده گسیخته نشدند ولی نیروی تسلیم و نیروی نهایی آن‌ها نسبت به حالت جوش نشده کمی کمتر شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل خروج از مرکزیتی باشد که در اثر جوش دادن میلگردها به وجود می‌آید و در آزمایش کشش، دو طرف نمونه در یک راستا نیستند. از این رو، در ادامه بررسی‌ها ظرفیت میلگردهای جوش شده، ۹۰ درصد ظرفیت میلگردهای جوش نشده (خط قرمز رنگ افقی در نمودار شکل ۱۵) در نظر گرفته شدند. شکل ۱۵ نیروی تسلیم و نهایی میلگرد جوش شده تقسیم بر نیروی تسلیم و نهایی میلگرد جوش نشده را برای قطرهای متفاوت میلگرد بر حسب طول جوش تقسیم بر قطر میلگرد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌ها در حالت $a=1d$ و $a=2d$ پایین‌تر از خط افقی قرار گرفتند. بنابراین می‌توان بیان نمود که با وجود این که نمونه در حالت $a=2d$ از محل جوش شده دچار گسیختگی نشده است ولی به علت استفاده نکردن از حداقل ۹۰٪ ظرفیت باربری میلگرد، طول جوش مناسبی نیست. با افزایش طول جوش به صورت $a=3d$ منقطع برای میلگردهای قطر بالاتر ظرفیت باربری نمونه‌ها افزایش یافت. با افزایش طول جوش به $a=4d$ و $a=5d$ میزان ظرفیت باربری بیشتر شده و گستره بیشتری از قطر میلگردها را در بر گرفته است. همچنین تغییر نحوه اتصال از جوش منقطع به جوش پیوسته تاثیری بر میزان ظرفیت باربری نداشته و فقط هزینه جوش‌کاری را افزایش می‌دهد.

با توجه به اینکه در نمودارهای نیرو-جابجایی میلگردها حد تسلیم مشخصی وجود ندارد جهت بدست آوردن نیروی تسلیم مطابق [۲۴] ابتدا مقاومت نهایی محاسبه شده و روی نمودار یک خط مستقیم که از بیشترین نقاط قسمت اول نمودار می‌گذرد رسم می‌شود سپس خط دومی به موازات خط اول رسم می‌گردد که به اندازه مقدار جابجایی ۰/۲٪ از خط اول فاصله دارد؛ محل تقاطع خط دوم و منحنی نشانگر نیروی تسلیم می‌باشد. از آنجا که جابجایی معادل مقاومت نهایی میلگردها مطابق شکل زیر با یکدیگر یکسان نیست، مقاومت تسلیم آنها نیز با یکدیگر متفاوت است. بدین ترتیب مقاومت تسلیم میلگردها با جوش $3d_{full}$ ، $4d_{full}$ و $5d_{full}$ بترتیب به مقدار ۱۹۸ و ۱۹۰ و ۲۲۳ کیلو نیوتن محاسبه شده است. با توجه به اینکه جابجایی نظیر حداکثر نیروی نهایی در مدل $3d_{full}$ بیشتر از مدل $4d_{full}$ می‌باشد مقدار نیروی تسلیم آن نیز بیشتر است.



شکل ۱۵: نمودار نیروی نهایی بر حسب جابجایی برای میلگرد شماره ۲۵ در حالت جوش شده کامل 3d,4d,5d



شکل ۱۶: نمودار (الف) نیروی نهایی میلگرد جوش شده تقسیم بر نیروی نهایی میلگرد جوش نشده و (ب) نیروی تسلیم میلگرد جوش شده تقسیم بر نیروی تسلیم میلگرد جوش نشده، با قطرهای متفاوت در برابر طول جوش تقسیم بر قطر میلگرد

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، وصله‌های جوشی میلگردها به کمک آزمایش کشش و مدل سازی با نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفتند. برای مدلسازی از تکنیک تولد و مرگ المان در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد که می‌تواند حرارت ناشی از جوش و همچنین خنک‌سازی مدل را با دقت زیادی مدل‌سازی کند. به طور کلی می‌توان نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی را به شرح زیر خلاصه کرد:

۱. با توجه به قطرهای موجود میلگرد می‌توان به عنوان یک قاعده کلی می‌توان گفتن که جوش منقطع با طول جوش و فاصله بین جوش‌های برابر با ۵ برابر قطر میلگرد دارای عملکرد مناسبی جهت وصله جوشی میلگردها می‌باشد.
۲. تبدیل جوش منقطع به جوش پیوسته با طول برابر تاثیری بر پارامترهای مورد بررسی نداشته و به ازای طول هم‌پوشانی یکسان، نتایج برای اتصال با جوش منقطع و پیوسته تقریباً مشابه است. در نتیجه نمونه با جوش پیوسته فقط باعث افزایش هزینه جوش-کاری می‌شود. بنابراین نمونه با جوش منقطع به عنوان وصله جوشی پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] Ghorbani, A. and Bakhtiari, V. and Sedighmofrad, S. and Goudarzi, M. (2015). AHP modeling to investigate three types of rebar connections: overlap, coupling and forging. Tehran: Iran Institute of Seismic Rehabilitation and Improvement
- [2] Iranian Concrete Regulations. (2004). Office of Technical Affairs and Standards Development.

- [3] Kheyroddin, A. and Famili, H. and Shirinsokhan, H. and Delnavaz, M. (2017). Introduction of new methods of reinforcing splices in reinforced concrete structures. Tehran: Journal of Iranian Concrete Association.
- [4] National Building Regulations No. 9. (2013) Design and Implementation of Reinforced Concrete Buildings. Tehran: National Building Regulations Office, Fourth Edition, Iran Development Publication.
- [5] Barzegarfahliani, B. (2015). The Advantages and Disadvantages of Forging Welding. Tehran: Iran Institute of Seismic Rehabilitation and Improvement.
- [6] Bodaghi, F. (2015). Investigation of the Replacement of Overlap Splices With Welding Splices. Tehran: Seismic Rehabilitation and Improvement Institute.
- [7] Issa, C.A. and Nasr, A. (2006). An Experimental Study of Welded Splices of Reinforcing Bars. Building and environment, 41(10), 1394-1405.
- [8] Moustafa, T. and Khalifa, W. and El-Koussy, M. and El-Reheem, N. A. (2016). Optimizing the Welding Parameters of Reinforcing Steel Bars. Arabian Journal for Science and Engineering, 41(5), 1699-1711.
- [9] Metal Arc Welding of Steel for Concrete Reinforcement. (1989). CEN247/BS 7123.
- [10] Welding of Reinforcing bars in reinforced concrete structures. (1989). W186-M 1990.
- [11] Tian, Y. and Feng, P. and Zhou, Z. H. and Ye, L.P. and Wan, B. L. (2012). Test on Hybrid Connection for Steel Bars in Concrete. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications. (Vol. 166, pp. 215-218).
- [12] Ahmed, Gh. (2016). Mechanical Properties for Splices of Welded Reinforcing Steel Bars. ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences, 27(6), 99-112.
- [13] Henin, E. and Morcou, G. (2015). Reinforcing bar splice sleeve for precast concrete constructions. Engineering Structures 83, 154-162.
- [14] Rybicki, E.F. and Schmuser, D.W. and Stonesifer, R.B. and Groom, J.J. and Mishler, H.W. (1978). A Finite Element Method for Residual Stress in Girth-Butt Welded Pipes. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 100, pp. 256-262.
- [15] Andersson, B. A. (1978). Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformations. Transactions of the ASME, Vol. 100, pp. 356-362.
- [16] Michaleris, P. (1996). Residual Stress Distributions for Multi-pass Welds in Pressure Vessel and Piping Components, In Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Montreal, Canada, Vol. 327, pp. 17-27.
- [17] Qingren, X. and Yaorong, F. and Chunyong, H. (2002). The Measurement and Control of Residual Stress in Spiral Submerged Arc Welded Pipe. Forth International pipeline conference, Alberta, Canada, pp. 615-622.
- [18] Brickstad, B. and Josefson, B.L. (1998). A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 11-25.
- [19] Yajiang, L. and Juan, W. and Maoai, C. and Xiaoqin, S. (2004). Finite Element Analysis of Residual Stress in the Welded Zone of a High Strength Steel. Bulletin of Materials Science, Vol. 27(2), pp. 127-132.
- [20] Kermanpur, A. and Shamanian, M. and Esfahani Yeganeh, V. (2008). Three-Dimensional Thermal Simulation and Experimental Investigation of GTAW Circumferentially Butt-Welded Incoloy 800 Pipes. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 99, pp. 295-303.
- [21] Mashayekhi, M. and Hedayati, H. (2011). Effect of Welding Sequence and Hydrotest Process on Welding Residual Stresses in Stainless Steel SUS304 Pipes. Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 17-34.
- [22] Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc. (2004). ABAQUS/standard user's manual, v. 6.8. Pawtucket, Rhode Island.
- [23] Goldak, J. and Chakravarti, A. and Bibby, M. (1984). A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. Metallurgical transactions B, 15(2), 299-305.
- [24] ROY R. CRAIG, JR. Mechanics of Materials, Third Edition, JOHN WILEY & SONS, 42.