علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال اول، شماره ۱، پاییز و زمستان ۹۴، صفحه ۴۹-۳۸

بررسی تجربی و شبیه سازی عددی تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و مود شکست جوش مقاومتی فولاد AISI 1075

مهدی صفری[۱] ، حسین مستعان[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲-دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

پست الکترونیکی: m.safari@arkut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۰۴ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۴/۰۸/۱۲)

چکیده

جوش پذیری فولادهای پرکربن با توجه به درصد بالای کربن در آنها و احتمال تشکیل ساختار مارتنزیت در منطقه جوش بسیار ضعیف می باشد. در این پژوهش، جوشکاری نقطه ای مقاومتی فولاد پر کربن یوتکتوئیدی ۱۰۷۵ از جنبه های مختلف به صورت تجربی و شبیه سازی عددی مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرد. اثر جریان جوشکاری به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای اثرگذار در فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی بر مود شکست و خواص مکانیکی و ابعاد دکمه جوش با آزمایش های تجربی و شبیه سازی های عددی تحلیل می شود. نتایج نشان می دهند که با افزایش جریان جوشکاری، اندازه دکمه جوش افزایش یافته و متناسب با آن مود شکست از حالت فصل مشترکی به محیطی تغییر پیدا می کند.

کلمات کلیدی: جوشکاری نقطه ای مقاومتی، فولادهای پر کربن، شبیه سازی عددی، مود شکست، خواص مکانیکی.

Experimental and Numerical Investigation of Microstructural Evolutions, Mechanical Properties and Fracture Mode of AISI 1075 Resistance Weld

M. Safari[1], H. Mostaan[2]

1-Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

2-Faculty of Engineering, Department of Materials and metallurgical Engineering, Arak University, Arak, Iran

(Received 26 September 2015 ; Accepted 3 November 2015)

Abstract

Weldability of high carbon steels due to the high percentage of carbon and consequently formation of martensitic structure is very poor. In this research, resistance spot welding of eutectoid high carbon steel 1075 is experimentally and numerically investigated from various points of view. The effect of welding current as one of the most effective parameters on failure mode, mechanical properties and nugget size

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

diameter in resistance spot welding is analyzed with experimental tests and numerical simulations. The results show that with increase of welding current, the diameter of nugget size is increased and consequently the failure mode changes from interfacial mode to pull out mode.

Keywords: Resistance spot welding, High carbon steels, Numerical simulation, Failure mode, Mechanical properties.

۱- مقدمه

فولادهای پرکربن دارای ویژگیهای جذابی از جمله استحکام بالا و مقاومت به سایش بالا بوده، ولی کاربردهای آن در ساختارهای مختلف به دلیل جوش پذیری پایین آنها محدود می باشد. جوش پذیری فولادها ارتباط مستقیم با ترکیب شیمیایی آنها دارد. مقادیر بالاتر کربن و سایر آلیاژها منجر به سختی پذیری بالاتر در آنها شده و در نتیجه جوش پذیری فولادهای پر کربن کمتر می شود. در جوشکاری فولادهای پرکربن، ناحیه متأثر از حرارت می تواند به سادگی تبدیل به مارتنزیت بسیار سخت و تردی شده و در نتیجه فلز جوش نمی تواند چکش خواری نرمالی داشته باشد. در سالهای اخیر، محققان بسیاری روشها، تکنیک ها و موادی جهت اتصال و جوشکاری فولادهای پرکربن توسعه دادند ولی کماکان مشکلات زیادی در زمینه جوشکاری فولادهای پرکربن وجود دارد. جوشکاری نقطه ای مقاومتی در صنایع ورقکاری فلزات خصوصاً صنایع اتومبیل سازی به عنوان یک فرآیند اتصال اصلی شناخته می شود. مقاومت یک وسیله نقلیه در برابر آسیب دیدگی ناشی از تصادفات که به عنوان ظرفیت یک اتومبیل برای محافظت کافی از مسافران در این شرایط ارائه می شود به مقدار بسیار زیادی به خواص مکانیکی و بدون عیب بودن جوش های نقطه ای آن وابسته است. بنابراین، جوشهای نقطه ای با ظرفیت تحمل نیروی بالا و همچنین ظرفیت جذب انرژی بالا به منظور ماکزیمم نمودن انتقال نیرو و اتلاف انرژی در هنگام تصادف اتومبیل مورد نیاز می باشند. از اینرو، کیفیت و کارآیی جوشهای نقطه ای مقاومتی بسیار مهم برای برآورد دوام و ایمنی طراحی وسیله نقلیه می باشند. به طور کلی سه معیار مهم برای کنترل کیفیت جوشهای نقطه ای مقاومتی وجود دارند.

- اندازه ناحیه ذوب[1] : اندازه ناحیه ذوب، که به صورت عرض نقطه جوش در ناحیه بین فلز با فلز در جهت طولی تعریف می شود، مهمترین فاکتور در برآورد کیفیت جوشهای نقطه ای می باشد.

- عملکرد مکانیکی جوش: عملکرد مکانیکی فلز جوش معمولاً در شرایط بارگذاری استاتیک/شبه استاتیک و خستگی مطرح می شود. آزمایش کشش- برش مهمترین تست در برآورد رفتار مکانیکی جوش نقطه ای در شرایط استاتیکی می باشد. ماکزیمم نیرو، که از نمودار نیرو جابجایی آزمایش کشش- برش به دست می آید اغلب برای توصیف رفتار مکانیکی جوشهای نقطه ای مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر ماکزیمم نیرو، انرژی شکست می تواند برای توصیف بهتر رفتار مکانیکی جوش نقطه ای مورد استفاده قرار بگیرد. انرژی شکست در واقع اندازه گیری ظرفیت جذب انرژی توسط جوش می باشد و مقدار بالاتر آن نشان دهنده افزایش در قابلیت اطمینان عملکرد جوش در مقابل نیروهای ضربه ای مانند تصادف می باشد.

-مود شکست[2] : مود شکست در واقع چگونگی شکست خوردن و خراب شدن جوش نقطه ای می باشد. به طور کلی، شکست جوش نقطه ای مقاومتی در دو حالت اتفاق می افتد: جدایش دو سطح جوش خورده (شکست فصل مشترکی[3]) و کنده شدن فلز جوش از یکی از سطوح (شکست محیطی[4]).در مود شکست فصل مشترکی، شکست از طریق رشد ترک از میان دکمه جوش صورت می گیرد در حالیکه در مود شکست محیطی، شکست با بیرون کشیدن دکمه جوش از یک ورق

1 Fusion Zone(FZ)
2 Failure mode
3 Interfacial mode
4 Pullout mode

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

صورت می گیرد. ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی در مود محیطی بیشتر از مود فصل مشترکی است. با توجه به این موضوع در طراحی یک جوش نقطه ای باید پارامترهای فرآیند طوری تنظیم شوند که مود شکست غالب، مود محیطی باشد.

در زمینه جوشکاری نقطه ای مقاومتی تحقیقات زیادی تا کنون انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می شود. فلوریا و همکارانش [۱] رفتار خستگی جوشکاری نقطه ای مقاومتی را در آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که پارامترهای فرآیند تأثیر بسیار زیادی در ریزساختار و عمر خستگی اتصالات جوشکاری شده نقطه ای مقاومتی ورقهای آلومینیمی ضخیم ۲ میلیمتری دارند. علیزاده و همکارانش [۲] ارتباط کارآیی و ریزساختار را در جوشکاری نقطه ای مقاومتی فولاد زنگ نزن ۴۳۰ بررسی کردند. آنها همچنین تغییرات فازی که در حین سیکل حرارتی اتفاق می افتد بر اساس متالورژی فیزیکی جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی آنالیز نمودند. نتایج آنها نشان داد که ریزساختار ناحیه ذوب و ناحیه متأثر از حرارت متأثر از پدیده های مختلفی چون رشد ترک، شکل گیری مارتنزیت و رسوب کاربابد می باشد. لی و همکارانش [۳] اثر میدان مغناطیسی خارجی را بر فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی آلیاژ آلومینیم با پارامترهای مختلف جوشکاری بررسی نمودند. آنها همچنین اثرات میدان مغناطیسی را بر اندازه جوش، استحکام کششی، ریز ساختار و ریز سختی بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که با حضور میدان مغناطیسی، قطر نقطه جوش، استحکام کششی و ریزسختی جوش بهبود می یابند. رزم پوش و همکارانش [۴] جوش پذیری نقطه ای مقاومتی فولاد TWIP از دسته فولادهای آستنیتی پر منگنز استحکام بالا را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که به خاطر پدیده پاشش و حفره های انقباضی، پارامترهای جوشکاری بهینه برای فولادهای TWIP مقادیر کمتری انتخاب می شوند. همچنین نتایج ریزساختاری حاصل از میکروسکوپ نوری نشان داد که ناحیه ذوب ساختار دندریتی خواهد داشت در حالی که ناحیه متأثر از حرارت دچار رشد دانه زیاد در یک ناحیه باریک می شود. یون و همکارانش [۵] پارامترهای بهینه در جوشکاری آلیاژهای آلومینیم ۷۰۷۵ را به وسیله آزمایش کشش ـ برش و روش تاگوچی به دست آوردند. آنها از یک آرایه تاگوچی با تعداد ۲۷ آزمایش استفاده کرده و بهینه ترین شرایط را برای جوشکاری نقطه ای مقاومتی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ به کمک آنالیز سیگنال به نویز به دست آوردند. اسمه [۶] تغییرات نیروی الکترود، جریان جوشکاری، قطر الکترود و زمان جوشکاری را با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی بررسی نمودند و پارامترهای بهینه جهت دستیابی به جوش نقطه ای با بیشترین استحکام کششی ـ برشی را برای فولاد زنگ نزن ۱۰۱۰ یافتند.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی با استفاده از یک دستگاه جوش نقطه ای با ظرفیت 150 KVAانجام می شود. در این دستگاه تنظیمات کلیه پارامترها به صورت دیجیتال بوده و همچنین به منظور اعمال نیروی الکترودها از یک مکانیزم پنوماتیک استفاده می شود. توجه به این نکته ضروری است که در یک جوش نقطه ای شرایط سایش برای الکترودها ایجاد می شود. با توجه به این موضوع، قطر الکترودها قبل از انجام هر آزمایش جوشکاری نقطه ای اندازه گیری می شوند. همچنین جنس الکترودها مس ـ کرم ـ زیرکونیوم بوده و برای خنک کاری، سیستم گردش آب در آنها تعبیه شده است.

در این پژوهش از فولاد پرکربن یوتکتوئیدی AISI 1075 استفاده می شود. ترکیب شیمیایی این فولاد به روش کوانتومتری بدست آمده و نتایج آن در جدول(۱) ارائه گردیده است.

در شکل(۱)، شماتیک نمونه های جوشکاری و همچنین فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی نشان داده شده است. همان طور که در شکل(۱-الف) مشاهده می شود ابعاد نمونه های مورد استفاده ۱۵۰ میلیمتر (طول)، ۲۵ میلیمتر (عرض) و ۱ میلیمتر (ضخامت) می باشد.

سطوح ورق ها قبل از انجام فرآیند جوشکاری توسط جت هوای خشک تمیز می شود. در این پژوهش اثر تغییرات جریان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی ورق فولادی یوتکتوئیدی ۱۰۷۵ مورد استفاده در این پژوهش

آلیاژ	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	کرم	مولیبدن	نیکل
درصد وزنی	0.74	0.18	0.75	≤ 0.012	≤ 0.005	0.40	0.05	0.3

جدول ۲ - مقادیر پارامترهای فرآیند در بررسی های تجربی و شبیه سازی عددی جوشکاری نقطه ای مقاومتی

پارامتر جوشکاری	مقدار
جریان جوشکاری (کیلو آمپر)	از ۶/۴ تا ۱۲ تغییر می‌کند
زمان جوشکاری (سیکل)	۳۰
زمان سرد شدن (سیکل)	۲۵
نیروی الکترود (نیوتن)	۱۴۰۰

جوشکاری بر روی استحکام کششی ـ برشی، قطر دکمه جوش و مود شکست جوش های نقطه ای مقاومتی بررسی می شود. در تمامی آزمایش ها و شبیه سازیهای عددی، سایر پارامترها شامل سیکل جوشکاری، سیکل سرد شدن و نیروی الکترودها ثابت می باشند. در جدول (۲) پارامترهای مورد استفاده در آزمایش های تجربی و شبیه سازی های عددی نشان داده شده اند. ورق ها همانند شکل(۱) به اندازه ۳۰ میلیمتر روی هم قرار گرفته و مرکز ناحیه همپوشانی آنها علامت زده شده و بین دو الکترود جهت جوشکاری قرار می گیرند.

در شکل(۲) نمونه ای از قطعات جوشکاری شده با پارامترهای فرآیندی مختلف نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می شود با تغییر پارامترهای فرآیندی، جوش های نقطه ای با اندازه دکمه جوش متفاوت ایجاد می شوند.

به منظور برآورد خواص مکانیکی اتصالات، آزمایش کشش ـ برش در دمای اتاق و با سرعت ۱ میلیمتر بر دقیقه توسط دستگاه تست کشش انیورسال کپراف انجام می شود. در شکل(۳)، جوش های نقطه ای مقاومتی پس از آزمایش کشش نشان داده شده است.

همچنین در شکل (۴)، دو نمونه از نمودارهای نیرو ـ جابجایی بدست آمده از تست کشش نشان داده شده است. این دو نمودار مربوط به جوش های نقطه ای با ماکزیمم و مینیمم استحکام کششی ـ برشی می باشند.

برای بررسی های ریزساختاری و شناسایی فازهای موجود در فلز پایه و فلز جوش نیز از میکروسکوپ نوری مدل Olympus استفاده شد. سطح نمونه ها پس از مانت گرم مطابق با روش های استاندارد متالوگرافی آماده سازی شده و برای آشکار ساختن ریزساختار از محلول اچ نایتال ۲ درصد استفاده گردید. برای ارزیابی سختی مناطق مختلف جوش نیز از ریزسختی سنجی بهره گرفته شد. برای ریزسختی سنجی نیز از بار ۱۰۰ گرم استفاده شد که مدت زمان اعمال بار نیز برابر با ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد. برای اطمینان از تکرارپذیری داده های حاصل از ریزسختی سنجی نیز از هر منطقه سه بار سختی گرفته شد و سپس میانگین آنها به عنوان سختی آن منطقه گزارش گردید.

۲-۱- مود شکست

در آزمایش های کشش ـ برش، دو مود شکست فصل مشترکی و محیطی برای جوش های نقطه ای مقاومتی مشاهده شدند. در شکل (۵) این دو مود شکست نشان داده شده است.

۳- شبیه سازی عددی

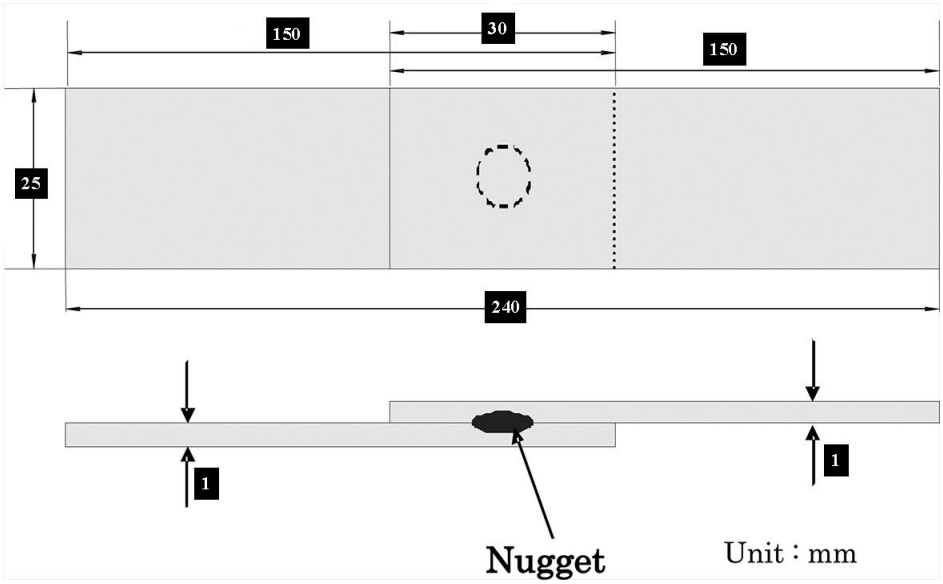
۳-۱- معادلات حاکم

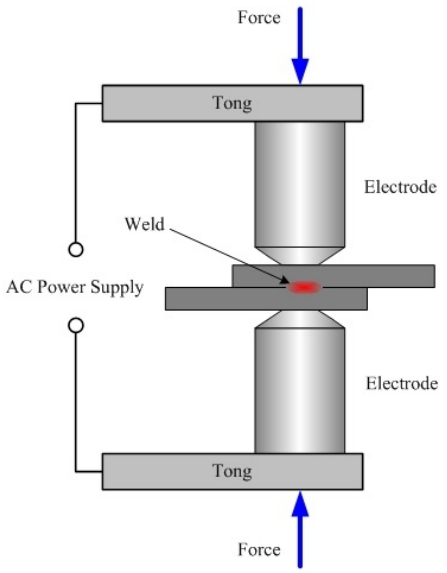
معادله دیفرانسیل حاکم برای توزیع میدان الکتریکی به صورت رابطه ۱ می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\mu\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)+\frac{\mu}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)=0 \quad (۱)$$

در رابطه ۱، پارامترهای r و z مختصات شعاعی و محوری، μ رسانایی الکتریکی مواد و φ پتانسیل الکتریکی هستند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]





شکل ۱- شماتیک نمونه های مورد استفاده و فرآیند؛ الف ـ نمونه های مورد استفاده در فرآیند، ب ـ شماتیک فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی.

همچنین حرارت تولید شده توسط جریان الکتریکی با استفاده از رابطه ۲ بیان می شود:

$$Q = RI^2t \qquad (۲)$$

در رابطه ۲، Qحرارت تولید شده، I جریان الکتریکی، R مقاومت الکتریکی ماده و t زمان اعمال جریان می باشد. معادله دیفرانسیل حاکم برای انتقال حرارت گذرا با در نظر گرفتن حرارت ناشی از مقاومت الکتریکی با رابطه ۳ بیان می شود:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r}\left(k\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{k}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} \qquad (۳)$$

در رابطه ۳، پارامترهای ρ، c، k، T و t به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت حرارتی ماده، دما و زمان هستند. همچنین $\dot{q}$ نرخ تولید حرارت داخلی بر واحد حجم در داخل مرز نواحی تحلیل می باشد.

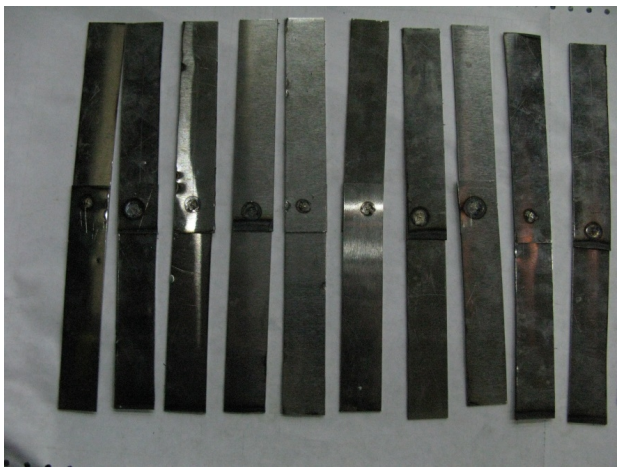
برای آنالیز تنش و کرنش، معادله حاکم بر اساس تئوری الاستیک ـ پلاستیک ـ حرارتی به صورت رابطه ۴ می باشد:

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}] \qquad (۴)$$

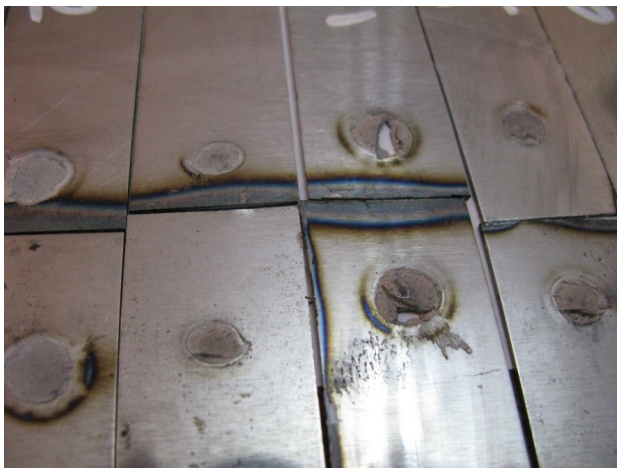
در رابطه فوق $[D^{ep}]$ با رابطه ۵ بیان می شود:

$$[D^{ep}] = [D^{e}] + [D^{p}] \qquad (۵)$$

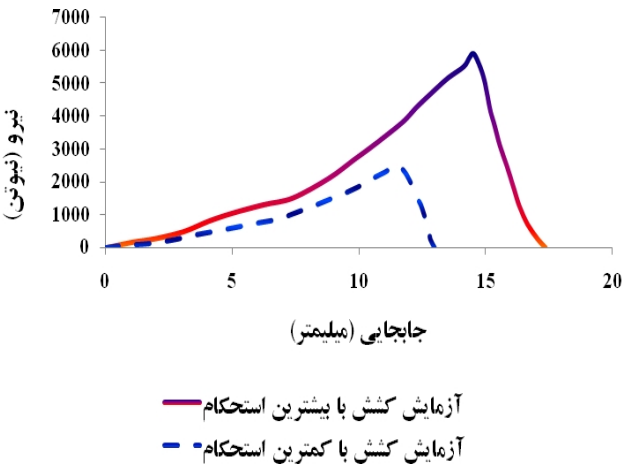
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



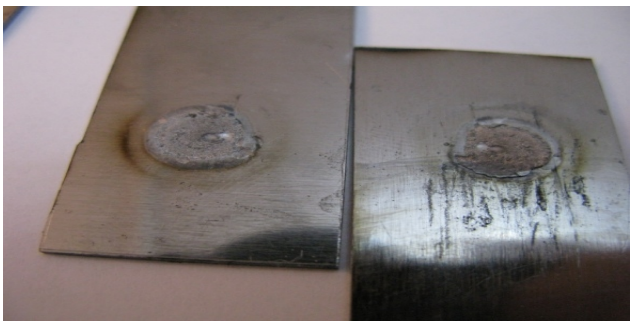
شکل۲- جوشهای نقطه ای با اندازه دکمه جوش مختلف متناسب با تغییر پارامترهای فرآیند



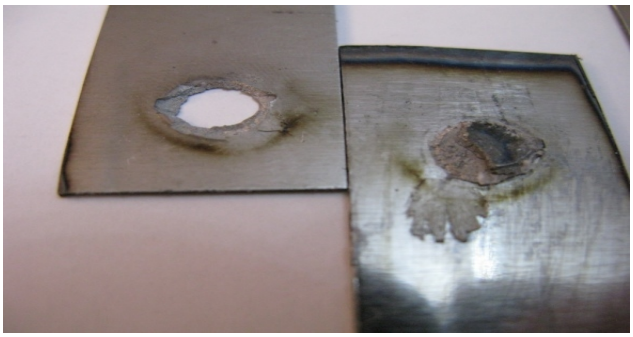
شکل۳- جوش های نقطه ای مقاومتی پس از آزمایش کشش



شکل۴- نمودارهای نیرو ـ جابجایی جوش های نقطه ای مقاومتی با بیشترین و کمترین استحکام کششی ـ برشی



الف



ب

شکل ۵- دو مود شکست مشاهده شده در آزمایش های کشش؛ الف ـ مود شکست فصل مشترکی، ب ـ مود شکست محیطی

در روابط ۴ و ۵، $[D^{ep}]$ ماتریس سفتی الاستیک ـ پلاستیک، $[D^{e}]$ ماتریس سفتی الاستیک، $[D^{p}]$ ماتریس سفتی پلاستیک، $[d\varepsilon]$ تانسور کرنش، $[d\sigma]$ تانسور تنش و $[C^{th}]$ ماتریس سفتی حرارتی می باشد.

۳-۲- شبیه سازی

به منظور انجام شبیه سازیهای عددی از نرم افزار تجاری آباکوس استفاده می شود. در شبیه سازی های انجام شده در این پژوهش دو ورق از جنس فولاد پر کربن CK75 به ضخامت ۱ میلیمتر توسط دو الکترود مسی به یکدیگر جوش داده می شوند. به منظور انجام شبیه سازی از تکنیک حل همزمان مسائل الکتریکی – حرارتی – مکانیکی استفاده می شود. مراحل مختلف فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی شامل اعمال نیرو از طرف الکترودها، اعمال جریان الکتریکی و مرحله سرد شدن جوش عیناً همانند آزمایش های تجربی در شبیه سازی عددی انجام می شوند. بدین منظور شبیه سازیهای مختلفی بر اساس

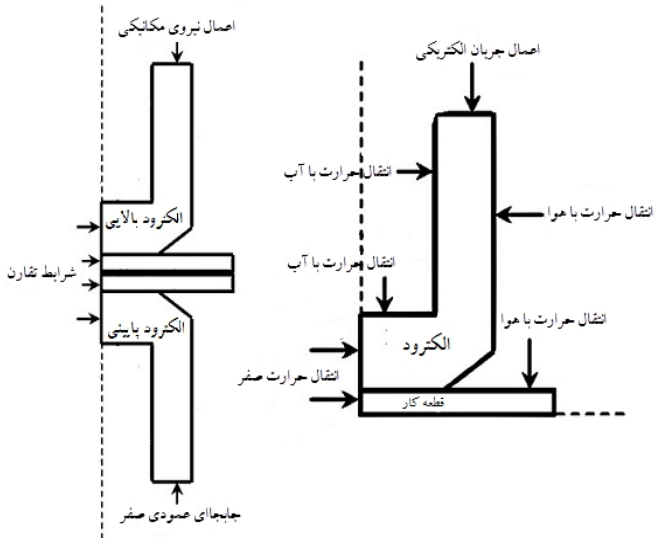
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

پارامترهای موجود در جدول (۲) انجام شده و نتایج آنها با نتایج تجربی مقایسه می شود. در شبیه سازیهای عددی علاوه بر شرایط تماسی مکانیکی، شرایط تماسی الکتریکی و حرارتی نیز بین سطح ورق ها با یکدیگر و همچنین ورق ها و الکترودها در نظر گرفته می شوند. همچنین کلیه شرایط مرزی حرارتی، الکتریکی و مکانیکی همانند آزمایش های تجربی در شبیه سازی ها اعمال می شوند. به منظور اعمال شرایط مرزی الکتریکی با توجه به اینکه برای جوشکاری نقطه ای مقاومتی معمولاً از جریان متناوب استفاده می شود، زمان جوشکاری نیز معمولاً بر حسب سیکل بیان می گردد که مدت زمان هر سیکل برابر با عکس فرکانس خواهد بود. در این حالت جریان نیز به صورت رابطه ۶ بیان می شود:

$$I = I_m \sin(2\pi f t) \qquad (۶)$$

در رابطه ۶ I_m مقدار بیشینه جریان جوشکاری و f فرکانس جریان متناوب می باشد که در این پژوهش ۵۰ هرتز می باشد. پتانسیل الکتریکی انتهای الکترود پایینی نیز صفر در نظر گرفته شده است. در شکل(۶) برخی از شرایط مرزی الکتریکی، حرارتی و مکانیکی مورد استفاده در شبیه سازی های اجزای محدود نشان داده شده است. به منظور اعمال شرایط مرزی حرارتی انتقال حرارت از طریق هدایت و همرفتی در شبیه سازی ها در نظر گرفته می شود. در این پژوهش به علت متقارن بودن هندسه و بارگذاری ورق ها و الکترودها، تنها یک چهارم ورق ها و الکترود ها مدلسازی و تحلیل می شوند که سبب کاهش زمان حل می شود. در شرایطی که نیروی الکترود ثابت می شود جریان الکتریکی اعمال می شود. به منظور جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد، جریان الکتریکی به صورت سیکلی وارد می شود. به منظور شبکه بندی نیز از المان هشت گره ای هگزاهدرال Q3D8 که مناسب برای حل همزمان الکتریکی – حرارتی – مکانیکی استفاده می شود. در شکل(۶) کلیه شرایط مرزی الکتریکی – حرارتی – مکانیکی به صورت شماتیک نشان داده شده اند.

به منظور شبکه بندی نیز از المان هشت گره ای هگزاهدرال Q3D8 که مناسب برای حل همزمان الکتریکی – حرارتی – مکانیکی استفاده می شود. در شکل (۷) مجموعه الکترودها و ورق ها که شبکه بندی گشته اند نشان داده شده است.



شکل۶–شرایط مرزی الکتریکی ـ حرارتی ـ مکانیکی مورد استفاده در شبیه سازی عددی فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی

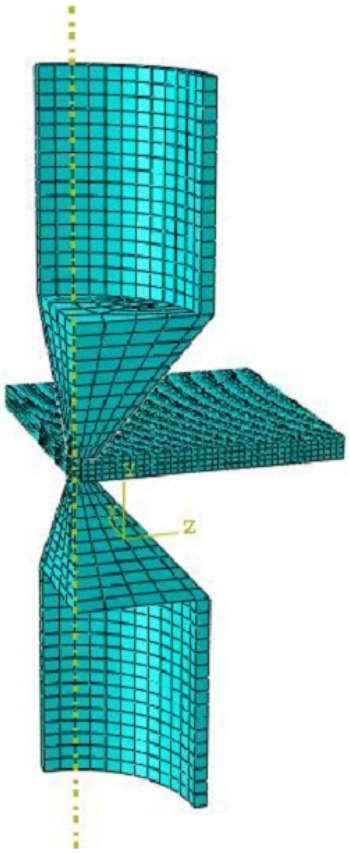
۴- نتایج و بحث

در ابتدای این بخش نتایج مربوط به شبیه سازی ارائه می گردد. در شکل(۸) نتایج مربوط به میدان حرارتی ایجاد شده در شبیه سازی فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی و در مراحل اعمال جریان و سرد شدن نشان داده شده است.

در شکل (۸ –الف) سه منطقه حرارت دهی شامل منطقه ذوب (نواحی با طیف رنگ زرد تا قرمز)، منطقه متأثر از حرارت (نواحی با طیف دمای آبی کم رنگ تا زرد) و فلز پایه (نواحی با طیف آبی پر رنگ)در حین جوش نقطه ای در ورق ها دیده می شود. نتایج شبیه سازی به خوبی وجود این سه ناحیه را در فرآیند جوش نقطه ای مقاومتی نشان می دهند. همچنین در مرحله سرد شدن، دمای نواحی مختلف با خاطر انتقال حرارت های هدایتی و همرفتی کاهش می یابد تا به دمای محیط برسند. در شکل(۸ ـ ب)کاهش دمای نواحی مختلف جوش نقطه ای مدتی پس از قطع جریان نشان داده است.همچنین در شکل(۹)، نوزیع تنشهای میزز در انتهای مرحله اعمال جریان الکتریکی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

نشان داده است. توزیع تنشهای میزز به این دلیل انتخاب شده است که در آن اثر تنشهای هیدروستاتیک وجود ندارد و تنش موثری که می تواند با تنش تسلیم مقایسه شود را نشان می دهد. در ادامه این بخش، نتایج تجربی ارائه شده و با نتایج عددی مقایسه می گردند.



شکل ۷- شبکه بندی مجموعه الکترودها و ورق ها با المان هشت گره ای هگزاهدرال Q3D8

در شکل (۱۰) ریزساختار فلز پایه و منطقه ذوب نمونه ای از آزمایش های انجام شده نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شودریزساختار فلز پایه به صورت مارتنزیت بازپخت شده می باشد. از آنجا که از فولادهای یوتکتوئیدی به عنوان فولادهای فنر استفاده می شود، مطلوب آن است که ریزساختار به صورت مارتنزیت بازپخت شده قرار داشته باشد. در این حالت مدول الاستیسیته بیشترین مقدار خود را دارد.

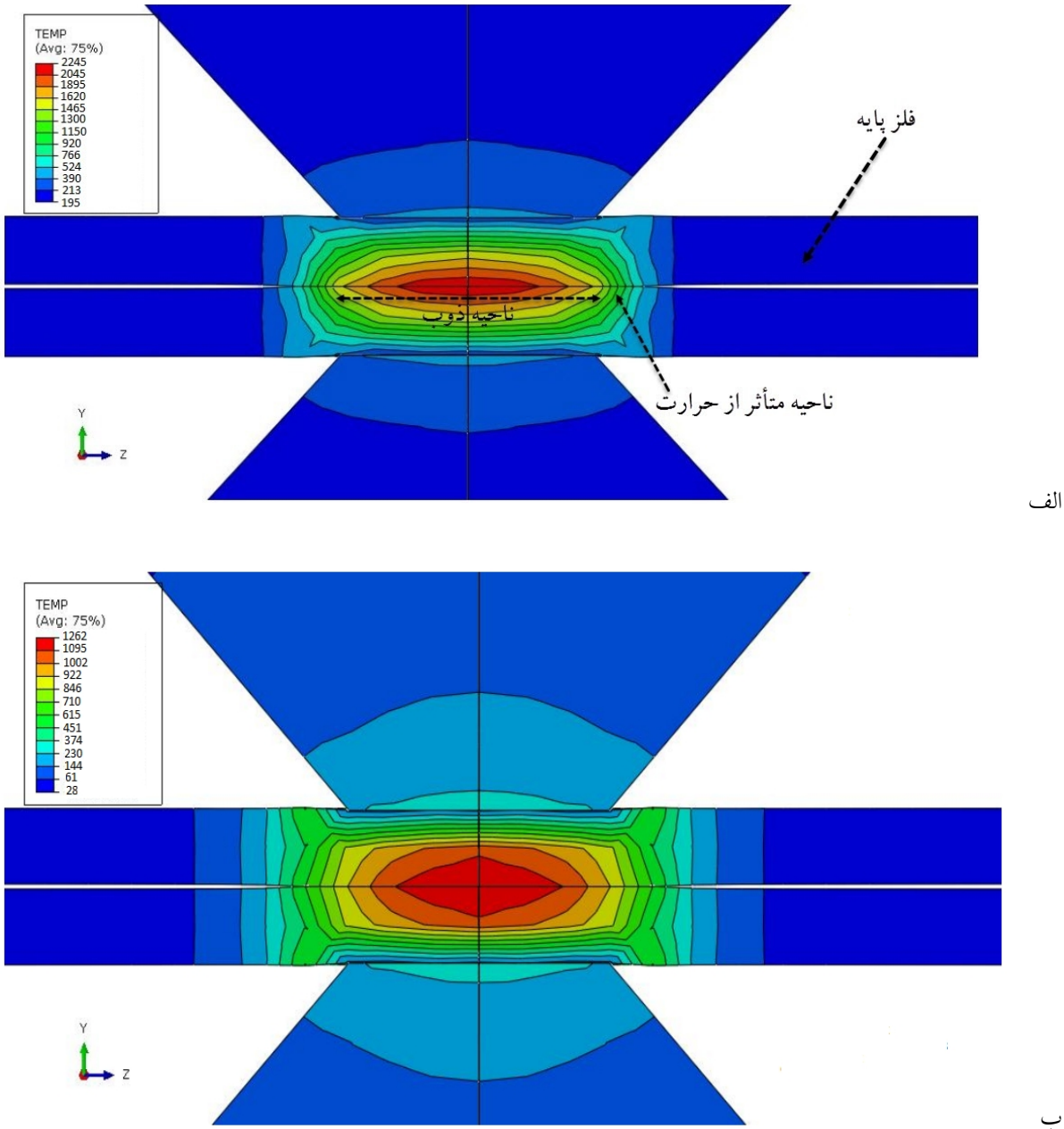
ریزساختار فلز جوش نیز که در سمت راست قرار دارد، بیان گر وجود تیغه های مارتنزیت بسیار ظریف می باشد. فولادهای یوتکتوئیدی با توجه به مقدار کربن زیاد سختی پذیری بسیار بالایی داشته و در سرعت های سرد شدن نسبتا پایین نیز ساختار مارتنزیتی حاصل می شود. در جوشکاری نقطه ای مقاومتی با توجه به حجم مذاب بسیار ناچیزی که تشکیل می شود، سرعت سرد شدن از دمای ذوب بسیار زیاد بوده و لذا انتظار می رود که ساختار فلز جوش فولاد یوتکتوئیدی به صورت مارتنزیت بسیار ظریف متبلور شود. همچنین در شکل (۱۱) نمونه ای از پروفایل ریزسختی اتصال نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۱۱) دیده می شود سختی فلز جوش تقریباً ۷۰۰ ویکرز می باشد که تأیید کننده ساختار مارتنزیتی موجود در این ناحیه است. در منطقه متأثر از حرارت نیز با توجه به پیشرفت میزان بازپخت (نسبت به فلز پایه که خود نیز در حالت بازپخت شده قرار دارد) سختی در مقایسه با فلز پایه با کاهش روبرو بوده است.

قبلاً اشاره شد که دو مود شکست فصل مشترکی و محیطی در آزمایش های کشش ـ برش انجام شده در این پژوهش مشاهده گردید. در شکل (۱۲) نتایج تأثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش و مود شکست به صورت تجربی و عددی نشان داده شده است.

همانطور که از این شکل دیده می شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد که تأیید کننده صحت نتایج شبیه سازی عددی می باشد. همچنین از شکل(۱۲) مشاهده می شود که قطر دکمه جوش با افزایش جریان جوشکاری افزایش می یابد که می تواند به دلیل افزایش انرژی تولید شده در سطوح تماس ورقها باشد. همچنین نتایج تجربی و عددی نشان می دهند که افزایش جریان جوشکاری منجر به تغییر مود شکست جوش نقطه ای از حالت فصل مشترکی به حالت محیطی می شود. نتایج نشان می دهند که حداقل ۸/۸ کیلو آمپر جریان الکتریکی لازم است تا حتماً در جوش های نقطه ای مود شکست محیطی حاصل شود. به علاوه،یک حداقل اندازه قطر دکمه جوش برای اینکه مود شکست محیطی حاصل شود وجود دارد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

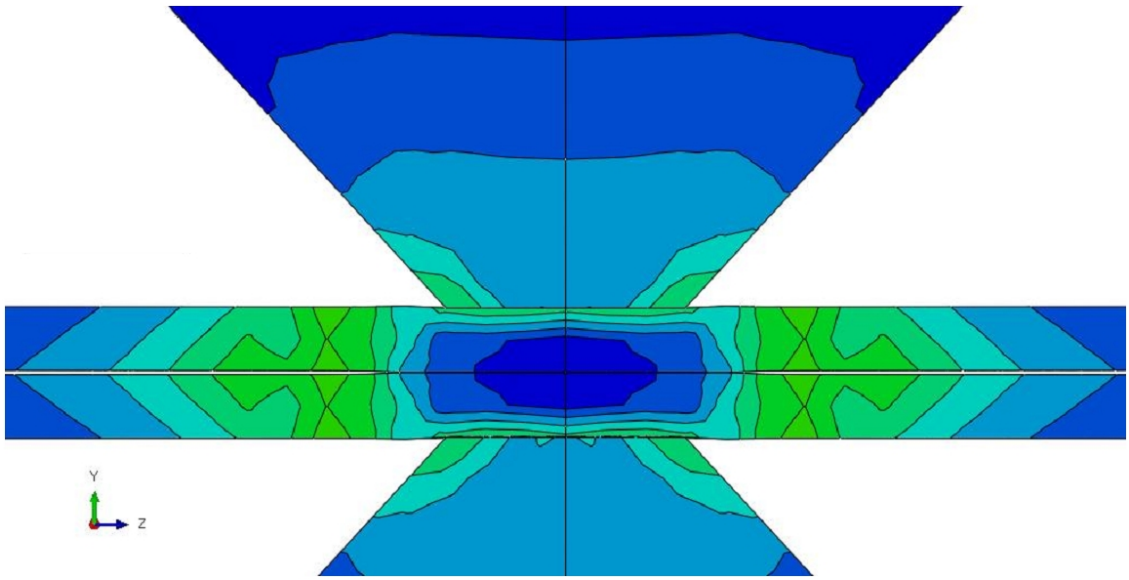


شکل۸- نتایج مربوط به میدان حرارتی ایجاد شده در ورق ها و الکترودها؛ الف- مرحله اعمال جریان و جوشکاری، ب- مرحله سرد شدن

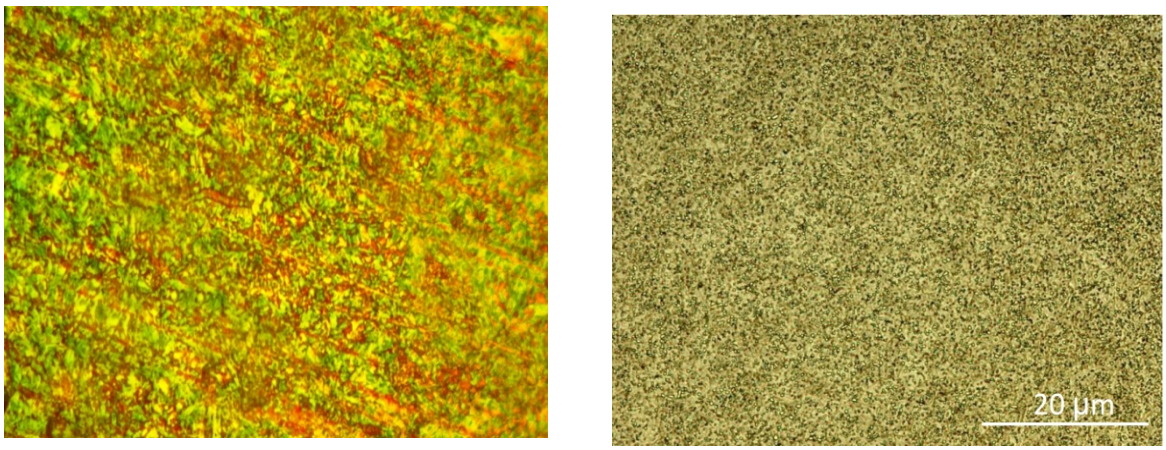
همانطور که نتایج تجربی و عددی در شکل(۱۲) نشان می دهند حداقل قطر دکمه جوش برای تشکیل مود شکست محیطی ۸/۵ میلیمتر می باشد.

به منظور بررسی ارتباط بین ماکزیمم نیروی کششی در آزمایش های کشش ـ برش و قطر دکمه جوش، نمودار ماکزیمم نیروی کششی در مقابل اندازه قطر دکمه جوش های متناظر از نتایج تجربی و شبیه سازی های عددی استخراج می شود. در شکل(۱۳) اثر قطر دکمه جوش بر ماکزیمم نیروی کششی جوشهای نقطه ای مقاومتی نشان داده شده است. همانطور که از شکل(۱۳) مشاهده می شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و شبیه سازی های عددی وجود دارد. همچنین نتایج تجربی و عددی نشان می دهند که رابطه خطی بین قطر دکمه جوش و ماکزیمم نیروی کششی وجود دارد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

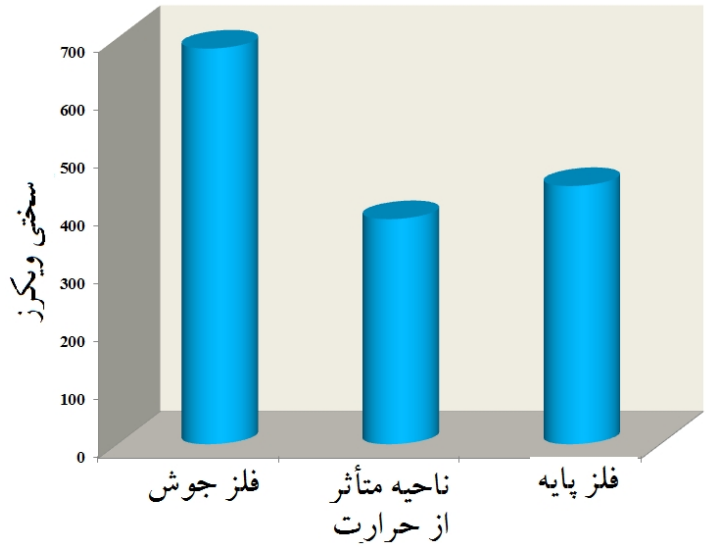


شکل ۹- توزیع تنشهای میزز در انتهای مرحله اعمال جریان الکتریکی



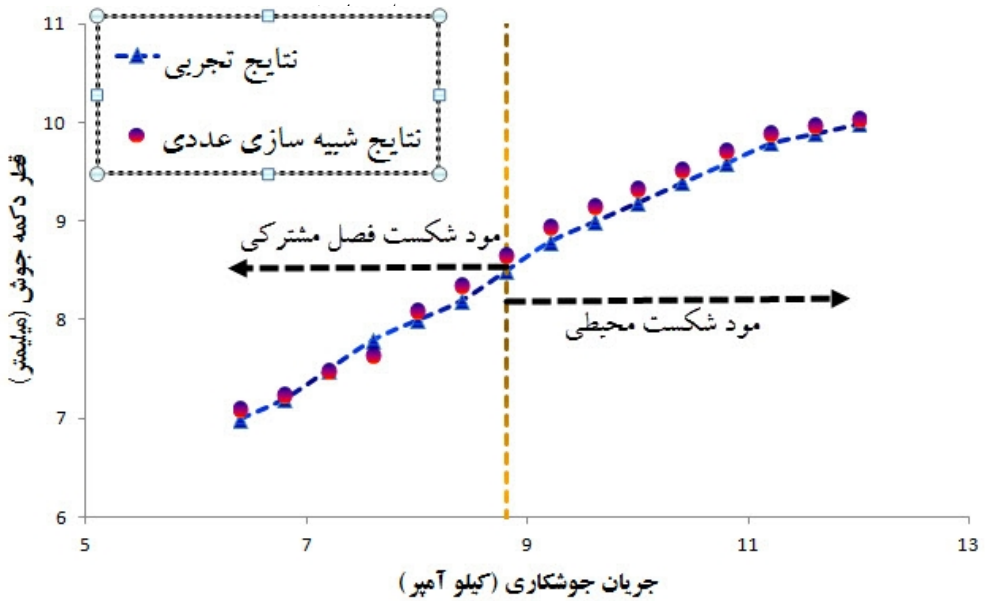
ب الف

شکل ۱۰- ریزساختار فلز پایه و منطقه ذوب نمونه ای از آزمایش های انجام شده؛ الف – فلز پایه، ب – منطقه ذوب

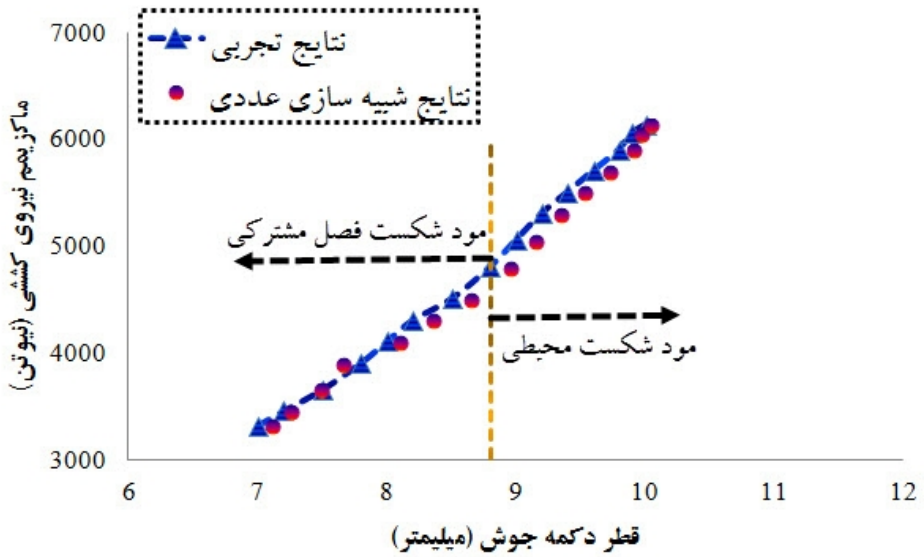


شکل ۱۱ – نمونه ای از پروفایل ریزسختی اتصال نقطه ای مقاومتی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل ۱۲ – نتایج تجربی و شبیه سازی عددی تأثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش و مود شکست



شکل۱۳– نتایج تجربی و شبیه سازی عددی تأثیر قطر دکمه جوش بر ماکزیمم نیروی کششی جوشهای نقطه ای مقاومتی

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، جوشکاری نقطه ای مقاومتی فولاد پرکربن یوتکتوئیدی ۱۰۷۵ به صورت تجربی و شبیه سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور انجام آزمایش های تجربی از یک دستگاه جوش نقطه ای با ظرفیت KVA 150 و با قابلیت تنظیم دیجیتال کلیه پارامترهای جوشکاری و همچنین مکانیزم اعمال نیروی الکترودها به صورت پنوماتیک استفاده شد. شبیه سازی های عددی نیز توسط نرم افزار تجاری آباکوس انجام شدند.نتایج زیر از این پژوهش بدست آمدند:

شبیه سازی عددی فرآیند جوشکاری نقطه ای مقاومتی به خوبی توسط نرم افزار تجاری آباکوس انجام شده و نتایج نشان دادند که تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و شبیه سازیهای عددی وجود داشت.

میدانهای دمایی بدست آمده از شبیه سازیهای عددی به خوبی نشان دهنده وجود نواحی ذوب و متأثر از حرارت در جوشکاری نقطه ای مقاومتی بودند و مشخص شد که

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

سه ناحیه ذوب، متأثر از حرارت و فلز پایه در جوشکاری نقطه ای مقاومتی وجود دارند.

نتایج نشان دادند که ریزساختار فلز پایه به صورت مارتنزیت بازپخت شده بود. همچنین ریزساختار فلز جوش نیز بیان گر وجود تیغه های مارتنزیت بسیار ظریف بود. دلیل ایجاد این ریزساختار این بود که فولادهای یوتکتوئیدی با توجه به مقدار کربن زیاد سختی پذیری بسیار بالایی داشته و در سرعت های سرد شدن نسبتا پایین نیز ساختار مارتنزیتی حاصل می شود. در جوشکاری نقطه ای مقاومتی با توجه به حجم مذاب بسیار ناچیزی که تشکیل می شود، سرعت سرد شدن از دمای ذوب بسیار زیاد بوده و لذا انتظار می رود که ساختار فلز جوش فولاد یوتکتوئیدی به صورت مارتنزیت بسیار ظریف متبلور شود.

نتایج ریزسختی سنجی نشان دادند که سختی فلز جوش تقریباً ۷۰۰ ویکرز بود که تأیید کننده ساختار مارتنزیتی موجود در این ناحیه می باشد. در منطقه متأثر از حرارت نیز با توجه به پیشرفت میزان بازپخت (نسبت به فلز پایه که خود نیز در حالت بازپخت شده قرار دارد) سختی در مقایسه با فلز پایه با کاهش روبرو شد.

نتایج تأثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش و مود شکست نشان دادند که تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود داشت. همچنین از نتایج مشخص گردید که قطر دکمه جوش با افزایش جریان جوشکاری افزایش می یابد که می تواند به دلیل افزایش انرژی تولید شده در سطوح تماس ورقها باشد. همچنین نتایج تجربی و عددی نشان دادند که افزایش جریان جوشکاری منجر به تغییر مود شکست جوش نقطه ای از حالت فصل مشترکی به حالت محیطی می شود.

نتایج تأثیر اندازه دکمه جوش بر ماکزیمم نیروی کششی جوشهای نقطه ای مقاومتی نشان دادکه رابطه ای خطی بین اندازه دکمه جوش و ماکزیمم نیروی کششی وجود دارد.

منابع

1.R.S Florea, D.J Bammann, A. Yeldell, K.N. Solanki, Y. Hammi, Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy, Materials and Design 45 (2013) 456–465.

2.M. Alizadeh-Sh, S.P.H. Marashi, M. Pouranvari, Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformationsand mechanical properties, Materials and Design 56 (2014) 258–263.

3.Yang Li, Zhen Luo, Fuyu Yan, Rui Duan, Qi Yao, Effect of external magnetic field on resistance spot welds of aluminum alloy, Materials and Design 56 (2014) 1025–1033.

4.M.H. Razmpoosh, M. Shamanian, M. Esmailzadeh, The microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded Fe–31Mn–3Al–3Si TWIP steel, Materials and Design 67 (2015) 571–576.

5.Yoon HK, Min BH, Lee CS, Kim DH, Kim YK, Park WJ. Strength characteristics onresistance spot welding of Al alloy sheets by Taguchi method. Int J Mod Phys B2006;20:4297–302.

6.Esme U. Application of Taguchi method for the optimization of resistance spotwelding process. Arabian J Sci Eng 2009;34:519–28.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]