



## تأثیر ماده میانی BNi-2 و مدت زمان نگهداری روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فاز مایع گذرا فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L به مونل 400

سجاد دهکار<sup>۱</sup>، امیر رهبرکلیشم<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مرکز مواد پیشرفته و نانوفناوری، دانشگاه جامع امام حسین،

۲- دانشکده مرکز مواد پیشرفته و نانوفناوری، دانشگاه جامع امام حسین،

### چکیده

اتصال غیر مشابه مونل 400 به فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L به منظور بازده اقتصادی و کاربردهای صنعتی مختلف در توربین‌های گازی، صنایع کاغذ و مبدل‌های حرارتی به علت مشکلات ناشی از جوشکاری ذوبی مانند ترک خوردگی، رشد بیش از حد دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت و خوردگی گالوانیکی باعث شده است تا فرآیندهای حالت جامد و لحیم کاری سخت امروزه اهمیت بیشتری پیدا کنند. با توجه به اینکه روش اتصال فاز مایع گذرا ترکیبی از مزایای جوشکاری و لحیم سخت را دارد؛ هدف مقاله حاضر، بررسی اثر زمان نگهداری و ماده میانی BNi-2 بر ریزساختار فلزات پایه و ارتباط آن با خواص مکانیکی اتصال فاز مایع گذرا فولاد زنگ‌نزن 304-L به مونل 400 است. در پژوهش حاضر، از فلزات پایه مونل 400 و فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L به عنوان زیرلایه و برای اتصال‌دهی از لایه میانی آمورف BNi-2 به ضخامت 50 μm استفاده شده است. سپس تاثیر پارامترهای زمان نگهداری و ماده میانی BNi-2 بر فرآیند اتصال‌دهی فاز مایع گذرا، ریزساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که نمونه‌ها از زمان 1 دقیقه تحت فرآیند انجماد همدم‌ها قرار گرفته‌اند که شامل تک فاز محلول جامد نیکل می‌باشند. انجام سایر زمان‌های اتصال‌دهی با هدف حذف منطقه متأثر از نفوذ نشان داد که در فصل مشترک منطقه انجماد همدم/فلزات پایه، منطقه تحت تاثیر نفوذ قرار دارد که شامل ترکیبات بورایدی غنی از آهن و کروم می‌باشد. اتصال‌دهی با ماده میانی BNi-2 استحکام برشی مونل 400 در حدود 130 درصد و فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L در حدود 136 درصد بوده است.

**واژگان کلیدی:** اتصال فاز مایع، فولاد زنگ نزن 304-L، مونل 400، خواص مکانیکی، ماده میانی BNi-2.



## 1- مقدمه

در دهه های اخیر، جوشکاری یکی از قابل توجه ترین فرآیندهای اتصال زمینه های مختلف تولید و مونتاژ تجهیزات بوده است. فولادهای زنگ نزن آستنیتی جوش پذیرترین خانواده فولادهای زنگ نزن هستند که خواص خوردگی و شکل پذیری مطلوبی نیز دارند (Wang, Ma, and Li 2011). روش های مختلفی برای اتصال فولادهای زنگ نزن آستنیتی وجود دارد که عبارتند از: جوشکاری ذوبی، جوشکاری حالت جامد، لحیم کاری و اتصال نفوذی. اگرچه این روش ها برای اتصال این نوع فولادها بسیار متداول بوده، اما برای رفع مشکلات ناشی از جوشکاری ذوبی و همچنین دستیابی به یک اتصال ایده آل لازم است تا از روش های با کمترین میزان رقت و شیب ترکیب شیمیایی استفاده شود. برای حل این مسئله می توان از فرآیندهای حالت جامد مثل اتصال دهی فاز مایع گذرا استفاده کرد (Ogawa and Tsunetomi 1982; Shankar et al. 2003).

اتصال دهی فاز مایع گذرا (TLP)، یک فرآیند نسبتاً جدید با ترکیبی از دو روش اتصال دهی نفوذی و لحیم کاری سخت است در آن از یک لایه میانی دارای عناصر کاهنده نقطه ذوب استفاده می شود. فرآیند TLP یک روش اتصال بر مبنای تشکیل پیوند متالورژیکی بین دو سطح اتصال با انجماد همدمای برای لایه میانی مایع نگهداری شده در دمای اتصال است. این فرآیند منجر به ایجاد اتصالی با ریزساختار و خواص مکانیکی مشابه ماده زمینه می شود. از این رو، روش اتصال غیرمشابه زمانی به کار گرفته میشود که فولاد مورد استفاده در صنعت به خواص مکانیکی خوب، مقاومت در برابر حرارت، مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت در برابر خزش نیاز داشته باشد (Dinkel et al. 2008; Ojo and Abdelfatah 2008; Duvall, Owczarski, and Paulonis 1974).

موری و همکاران اتصال دهی با فاز مایع گذرا بر سوپر آلیاژ اینکونل 625 را با استفاده از لایه میانی BNi-2 و ضخامت  $\mu\text{m}$  50 انجام دادند. در طی پروسه آزمایش مشاهده کردند که از همان دمای شروع ذوب لایه میانی تا رسیدن به اوج دما، انجماد سریع نفوذی اتفاق افتاد. این جریان سریع نفوذ به صورت چشمگیری زمان اتصال دهی در دمای اتصال را کاهش داده است (Murray and Corbin 2017). عبدالوند و همکاران (Abdolvand et al. 2017) تأثیر زمان اتصال دهی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن دوفازی SAF 2507 و فولاد AISI 304 به روش اتصال دهی فاز مایع گذرا با لایه میانی BNi-2 و ضخامت  $\mu\text{m}$  50 در زمان های مختلف با دمای اتصال 1050 جهت دستیابی به ریزساختار عاری از ترکیبات بین فلزی بررسی کردند و دریافتند که با افزایش زمان نگهداری، پهنای منطقه انجماد تحت تأثیر حرارت کاهش و استحکام برشی نمونه ها افزایش یافته است. همچنین برای نمونه نگهداری شده در زمان 45 دقیقه، شکست نرم اتفاق افتاده است. تحقیقات نشان داده است روش های مرسوم جوشکاری را می توان جهت اتصال آلیاژ مونل 400 به کار برد، اما برخی پارامترهای مربوط به آلیاژهای پایه نیکل منجر به استفاده از فرآیندهای متفاوتی با روش های جوشکاری فولادهای زنگ نزن می شود. بنابراین، اتصال غیرمشابه موجب صرفه جویی در مواد مصرفی و کاهش هزینه های تولید خواهد شد. به طوری که اگر قطعه نهایی به طور یکپارچه از آلیاژ مونل 400 ساخته شود، هزینه تمام شده به طور قابل توجهی افزایش می یابد که از لحاظ اقتصادی به صرفه نخواهد بود. اما در صورتی که محل های بحرانی که باید خواص مکانیکی و حرارتی مناسبی داشته باشند، از آلیاژ مونل 400 ساخته شوند و مناطق غیر بحرانی از یک آلیاژ ارزان تر مثل فولاد زنگ نزن 304-L که نسبتاً ارزان تر و خواص مکانیکی و حرارتی خوبی دارد، ساخته شوند؛ آن گاه این اتصال می تواند در کاهش هزینه های تولید بسیار مؤثر باشد (Ramkumar, Arivazhagan, and Narayanan 2012; Arivazhagan et al. 2011). هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی لایه میانی و زمان اتصال دهی بر خواص ریزساختاری و مکانیکی اتصال غیرمشابه مونل 400 به فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L است. در حوزه اتصال دهی آلیاژهای مونل 400 و فولاد زنگ نزن 304-L با فرآیند اتصال دهی فاز مایع گذرا تحقیق و پژوهشی گزارش نشده، لذا با توجه به اهمیت موضوع، بازده اقتصادی و کاربرد آن در صنایع مختلف لازم است تا در این حوزه تحقیقات بیشتری انجام شود.



## 2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش ورق های سوپرآلیاژ مونل 400 و فولاد زنگ آستنیتی 304-L مواد پایه می باشند. این ورق ها به ضخامت 5 mm تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. برای اینکه ترکیب شیمیایی فلزات پایه در محدوده مقادیر استاندارد باشد لازم است تا ترکیب شیمیایی دقیق آن ها بررسی شود. براساس مطالعات و تحقیقات انجام شده لایه میانی BNi-2 به عنوان یکی از مهم ترین و پرکاربردترین لایه میانی در صنایع مختلف برای اتصال دهی و تعمیر استفاده می شوند. از این رو، فویل آمورف BNi-2 با ضخامت 50  $\mu$ m به عنوان لایه میانی انتخاب شدند. در این پژوهش از فرایند اتصال دهی فاز مایع گذرا برای اتصال سوپرآلیاژ مونل 400 استحکام دهی شده با محلول جامد و فولاد زنگ زن آستنیتی 304-L با لایه های میانی BNi-2 استفاده شده است. ابعاد نمونه های تهیه شده 5  $\times$  10  $\times$  40 mm است. نمونه های تهیه شده قبل از عملیات آماده سازی در محلول تینر 10000 نگهداری شدند. برای از بین بردن آلودگی های اکسید سطحی و روغنی، نمونه ها با گریدهای 80 تا 1200 سنباده زنی شدند. سپس لایه های میانی بریده شده به ابعاد 2  $\times$  10  $\times$  40 mm و نمونه ها با دستگاه اولتراسونیک حاوی استون به مدت یک ساعت چربی زدایی و تا زمان اتصال دهی در الکل نگهداری شدند. لایه میانی بین دو نمونه سوپرآلیاژ مونل 400 و فولاد زنگ زن آستنیتی 304-L قرار گرفت و از نگهدارنده اتصال دهی با فشار اعمالی 3/0 MPa بر اتصال استفاده شد تا دمای اتصال دهی در حین حرارت دادن در محل خودبه خوبی حفظ و همچنین از جاری شدن ماده لایه میانی مذاب جلوگیری شود. سپس عملیات اتصال دهی در کوره تیوپی با اتمسفر خلأ در دمای ثابت 1050°C با زمان های نگهداری 1، 15، 30 و 45 دقیقه انجام شده است. تصاویر ریزساختاری نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف-سنجی پرتو X برای تعیین ترکیب شیمیایی نسبی فازهای تشکیل شده و بررسی تغییرات غلظتی در موضع اتصال و از پراش پرتو X برای شناسایی فازها استفاده شد. در نهایت، آزمون ریزسختی سنجی و آزمون برشی براساس استاندارد ASTM D05-1002 برای بررسی خواص مکانیکی اتصالات انجام شدند.

جدول 1- ترکیب شیمیایی فلزات پایه مورد استفاده در این پژوهش.

مونل 400							
عنصر	Ni	Cu	C	Mn	Fe	S	Si
مقدار (%wt.)	مابقی	32	0/3	2	2/5	0/025	0/5

304-L							
عنصر	Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr
مقدار (%wt.)	مابقی	0/03	2	1	0/05	0/02	18

جدول 2. ترکیب شیمیایی فویل آمورف BNi-2

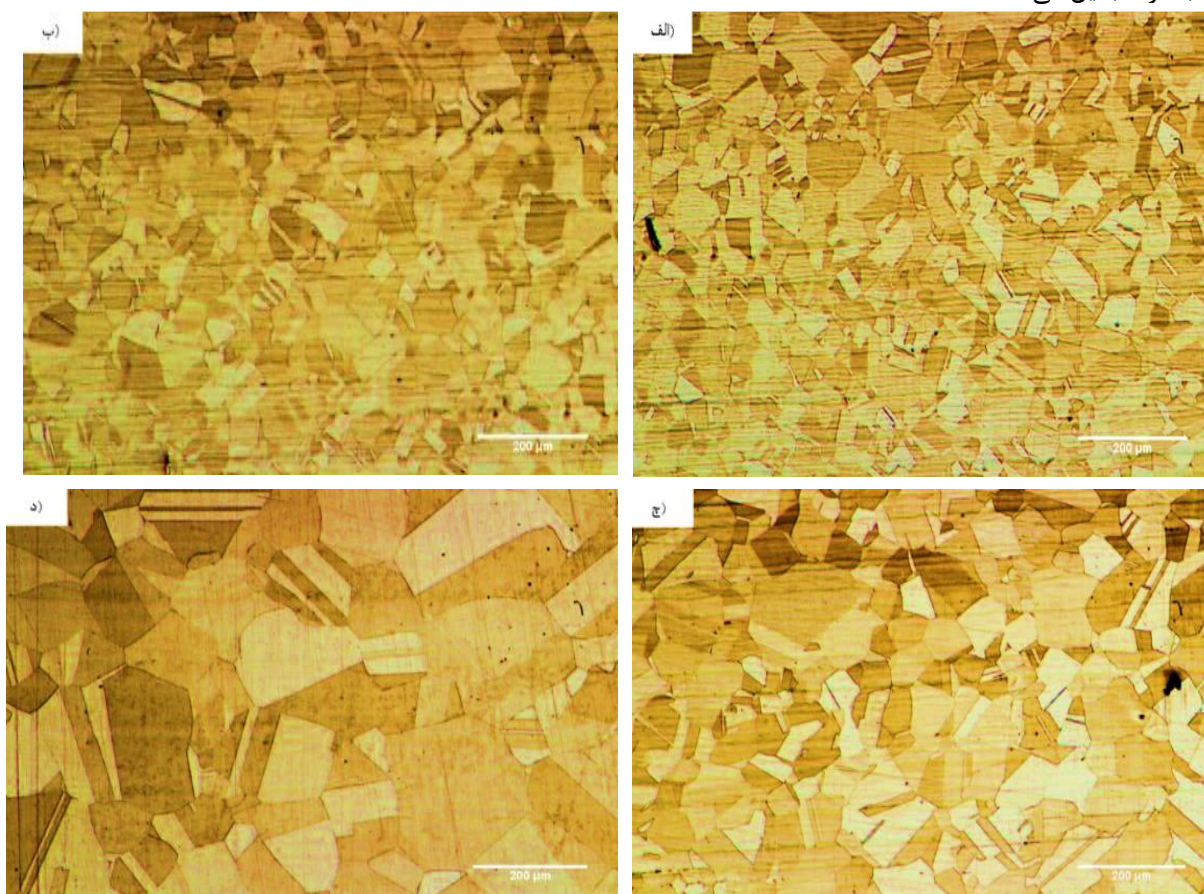
عنصر	Ni	Fe	Cr	B	Si
مقدار (BNi-2)	مابقی	2	7	3/2	4/3



## 3- نتایج و بحث

## 3-1- تاثیر زمان نگهداری بر ریزساختار سوپرآلیاژ مونل 400

شکل 1، ریزساختار سوپرآلیاژ مونل 400 در شرایط اتصال دهی (عملیات حرارتی) در دمای ثابت  $1050^{\circ}\text{C}$  و زمان های نگهداری 1، 15، 30 و 45 دقیقه را نشان می دهد. این تصویر نشان می دهد که زمان های نگهداری 1 و 15 دقیقه تأثیر چندانی بر رشد دانه و ریزساختار زمینه نداشته است، تنها  $5-7\ \mu\text{m}$  رشد دانه اتفاق افتاده است. در حالی که در شرایط نگهداری 30 و 45 دقیقه اندازه دانه به ترتیب به  $75\ \mu\text{m}$  و  $87\ \mu\text{m}$  رسیده است که نشان دهنده تأثیر زمان نگهداری بر رشد دانه می باشد. مونل 400 سوپرآلیاژ استحکام دهی شده با محلول جامد و کارسختی است، افزایش دما یا افزایش زمان نگهداری در دمای ثابت باعث رشد دانه شده و به کاهش استحکام و سختی زمینه منجر می شود. چن و همکاران (Chen et al. 2022) به منظور بررسی خواص مکانیکی دما بالا و رفتارهای شکست آلیاژ مونل 400 رسوب گذاری شده از آزمون های کشش دما بالا در دماهای  $700^{\circ}\text{C}$ ،  $800^{\circ}\text{C}$ ،  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  با دستگاه حرارتی گلیبل D1500 استفاده کردند. بررسی ها نشان داد که خواص مکانیکی فلز رسوب گذاری شده در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  بسیار عالی بوده است، حداکثر استحکام تسلیم و استحکام کششی به ترتیب  $148/6$  و  $284/1\ \text{MPa}$  حاصل شد. در دماهای  $100^{\circ}\text{C}$  تا  $1100^{\circ}\text{C}$ ، با افزایش دمای آزمایش ابتدا خواص مکانیکی و شکل پذیری به شدت کاهش می یابد و سپس به تدریج پایدار می شود. مکانیزم شکست در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  نرم و در دمای بالا ترد بوده است. لذا، با توجه به رشد دانه، در دماهای بالا، شکست از طریق مرزدانه ها اتفاق می افتد که حالت شکست را به ترد تبدیل می کند.



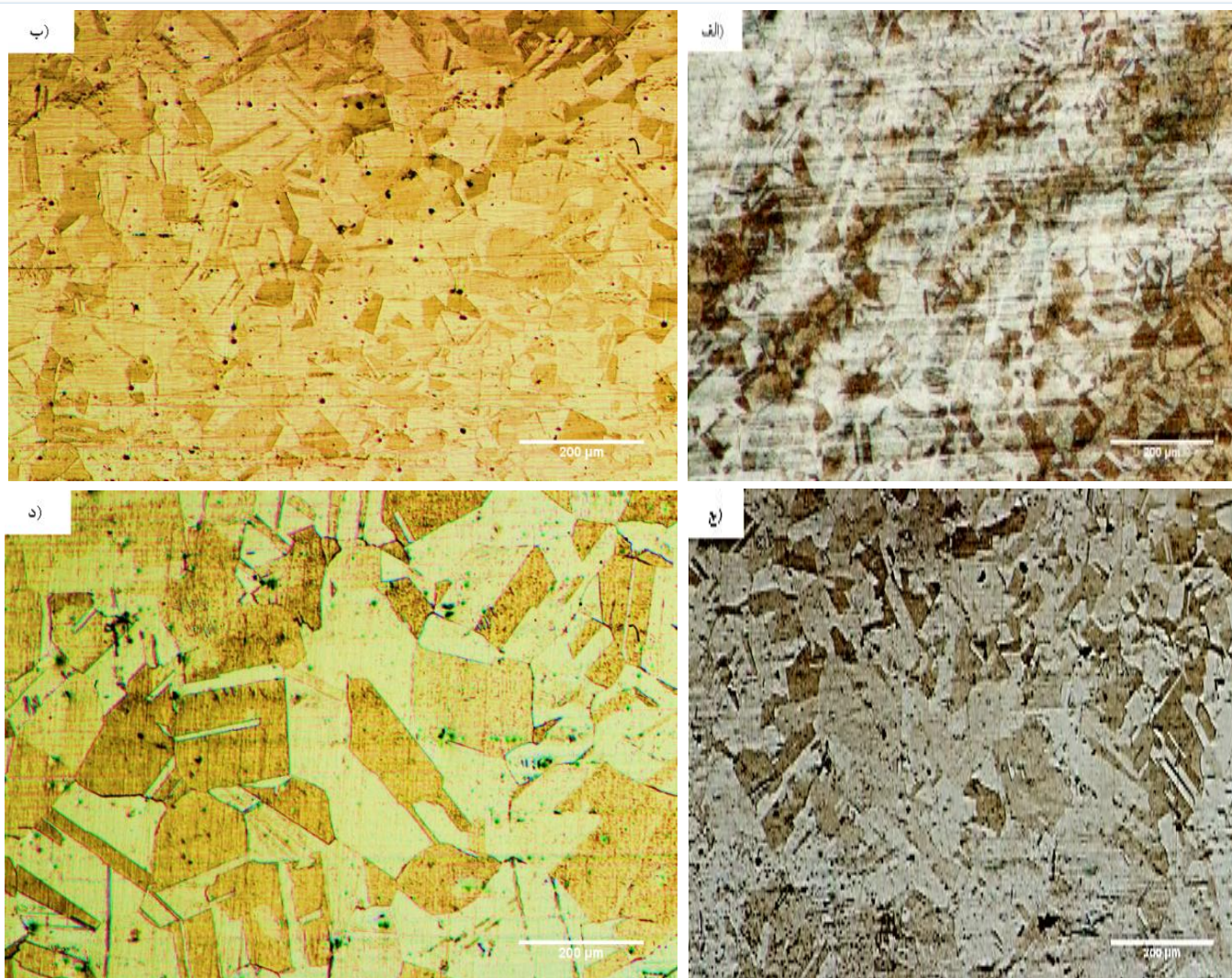
شکل 1- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار مونل 400 در دمای ثابت  $1050^{\circ}\text{C}$  در زمان های: الف) 1 min، ب) 15 min، ج) 30 min و د) 45 min.



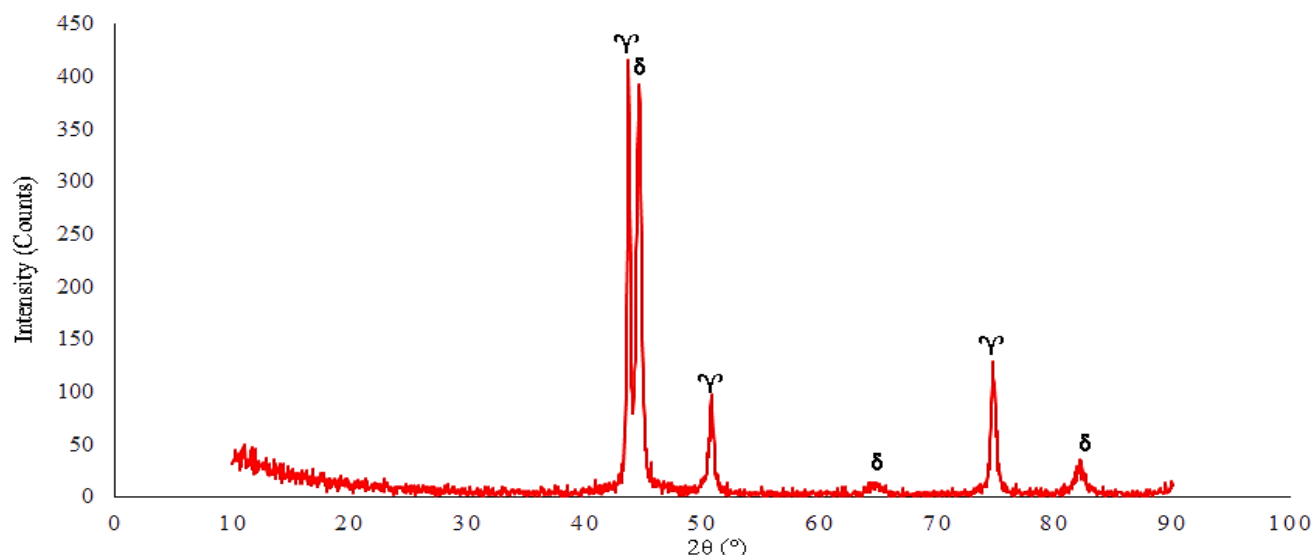
### 2-3- تأثیر زمان نگهداری بر ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L

شکل 2، تأثیر زمان نگهداری در دمای ثابت بر فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که با افزایش زمان نگهداری در دمای ثابت، اندازه دانه‌ها رشد کرده و دوقلوبی‌های مکانیکی کاملاً از بین رفته است. در زمان نگهداری 1 و 15 دقیقه، ریزساختار به صورت تک فاز و محلول جامد  $\gamma$  بوده است؛ در حالی که در زمان نگهداری 30 دقیقه، فاز  $\delta$  از طریق مکانیزم نفوذ کروم (پایدار کننده فاز فریت) رشد کرده و به صورت مناطق تیره در زمینه قابل مشاهده است. شکل 3، الگوی پراش پرتو X از ریزساختار نمونه اتصال داده شده در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  و زمان 45 دقیقه را نشان می‌دهد. در این الگوی، پیک صفحه  $(1\ 1\ 0)$  با شدت بالا مربوط به فاز فریت  $\delta$  بوده و در کنار آن پیک صفحات  $(2\ 0\ 0)$  و  $(2\ 1\ 1)$  مشاهده می‌شود که نشان دهنده حضور فاز فریت  $\delta$  است. به نظر می‌رسد که حضور مقدار بسیار کم فریت  $\delta$  در زمینه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L می‌تواند عامل جوانه زنی برای استحاله فاز آستنیت به فریت باشد. حضور عنصر کروم حین عملیات حرارتی در اثر فرایند نفوذ حالت جامد به فاز فریت نفوذ و به رشد آن کمک می‌کند. بنابراین، حضور فاز فریت حتی در مقادیر بسیار کم می‌تواند به عنوان چاهک جذب عناصر پایدارکننده فریت عمل کند (Saeidi et al. 2015). میزان سختی ناشی از رشد دانه و تبلور مجدد به HRB 68 کاهش یافته است. لازم به ذکر است که پیک کاربید  $(\text{M}_{23}\text{C}_6)$  (در الگوی پراش پرتو X شناسایی نشده است. این فاز که در نگهداری یا سرمایش آرام در محدوده دمایی  $900-600^{\circ}\text{C}$  تشکیل می‌شود، تأثیر مخربی بر خواص خوردگی و مکانیکی فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L دارد (Bakhtiari and Berenjani 2014).





شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304-L در دمای ثابت 1050 °C در زمان‌های: الف) 1 min، ب) 15 min، ج) 30 min و د) 45 min.



شکل 3- نمودار XRD فولاد زنگ نزن آستنیتی در شرایط 1050°C و 45 دقیقه.

### 3-3- منطقه انجماد همدم

در کلیه نمونه های اتصال دهی شده، منطقه انجماد همدم تشکیل شده و منطقه انجماد غیرهمدم حاوی ترکیبات بین-فلزی ترد و مخرب مشاهده نشده است. در بررسی اتصالات با لایه میانی BNi-2 مشخص شد که درز اتصال بدون ترک و حفره بوده که نشان دهنده دستیابی به یک اتصال ایده آل است. از خصوصیات یک اتصال ایده آل می توان به عدم وجود ترکیبات بین-فلزی، حفره و ترک در خط مرکزی اتصال اشاره کرد. حضور ترکیبات بین فلزی و حفره، اثرات مخربی بر خواص مکانیکی و خوردگی اتصال خواهد داشت. اسماعیلی و همکاران (Esmaeili, Mirsalehi, and Farzadi 2017) اتصال دهی فاز مایع گذرا سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل 617 را با استفاده از فلز پرکننده Ni-Cr-Si-Fe-B به ضخامت 50 μm در اتمسفرهای مختلف کوره بررسی کردند. آن ها دریافتند که اتصال دهی تحت شرایط اتمسفری و آرگون منجر به ایجاد حفره هایی در منطقه اتصال می شود که خواص مکانیکی را به شدت کاهش می دهد. یوان و همکارانش در تحقیقات خود عنوان کردند که عدم یکنواختی ترکیب شیمیایی و حضور ترکیبات بین فلزی باعث می شود که خواص خوردگی به شدت افت کند. علاوه بر این، اتصال باید در دو طرف سطوح اتصال پیوسته و با فلزات پایه پیوند متالورژیکی خوبی داشته باشد و از نظر ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی مشابه با فلزات پایه باشد.

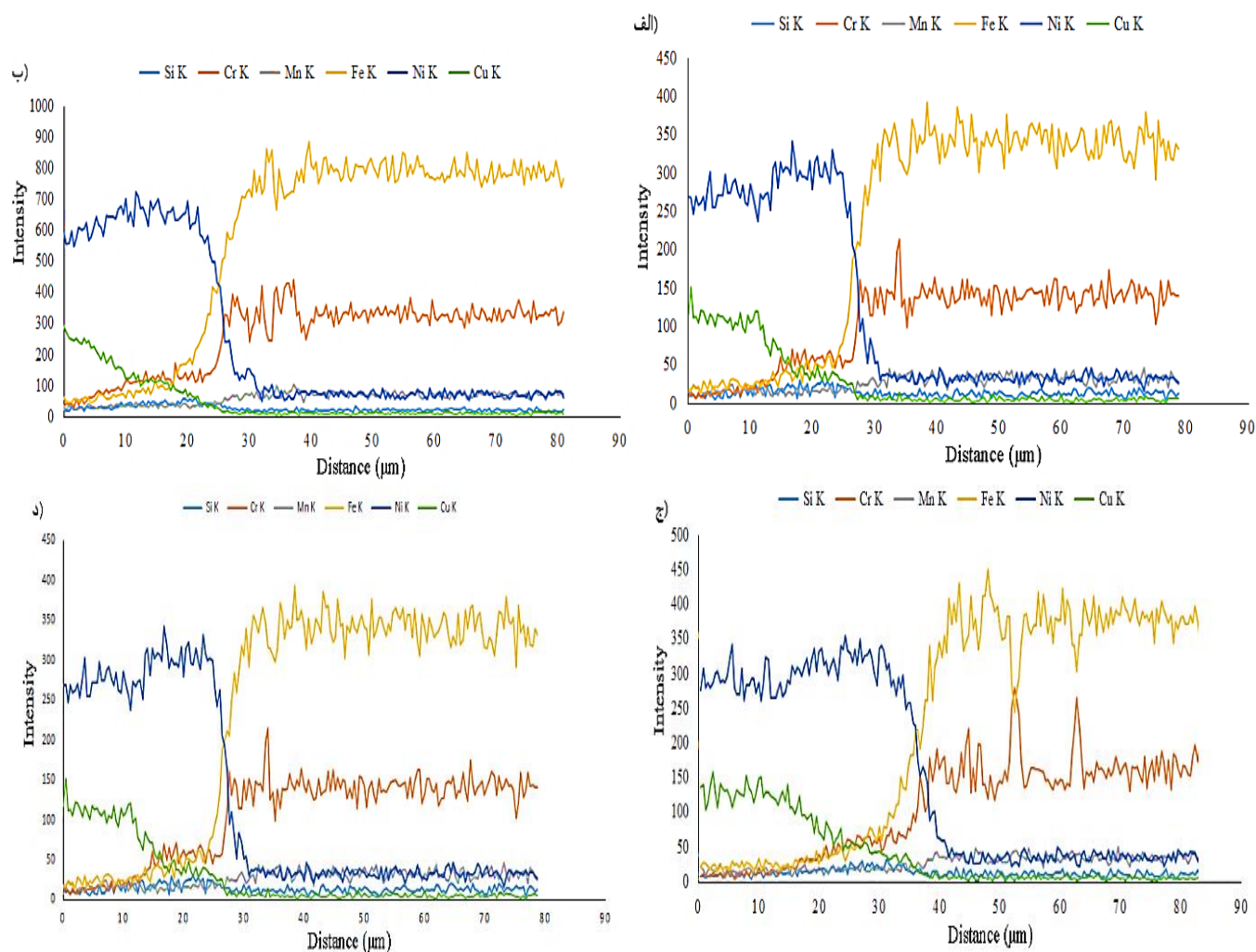
شکل 4 نشان دهنده آنالیز خطی در امتداد منطقه اتصال دهی نمونه های متصل شده با لایه میانی BNi-2 است. در کلیه تصاویر سمت چپ مونل 400 و در سمت راست آن فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L قرار گرفته است. در تصاویر مشخص است که با حرکت از چپ به راست از غلظت نیکل و مس کم شده و به غلظت آهن افزوده می شود. علاوه بر این، غلظت عنصر کروم آرام آرام افزایش می یابد. در تصاویر مونل 400 (سمت چپ)، عنصر کروم وجود ندارد، اما با رسیدن به درز اتصال (لایه های میانی حاوی کروم) غلظت آن افزایش یافته و در نهایت با رسیدن به فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L، غلظت عنصر کروم به حداکثر مقدار آن می رسد. در نهایت، غلظت عنصر منگنز در امتداد درز اتصال تقریباً یکنواخت است. در تصاویر مونل 400 (سمت چپ)، حداکثر و حداقل غلظت عناصر بورایدزا (کروم، نیکل و آهن) کمترین مقدار است یا به عبارت دیگر چنین نوساناتی مشاهده نشده که دلیل عمده آن، عدم تشکیل ترکیبات بورایدی مثل بوراید نیکل (B<sub>3</sub>Ni) است؛ اما در تصاویر فولاد



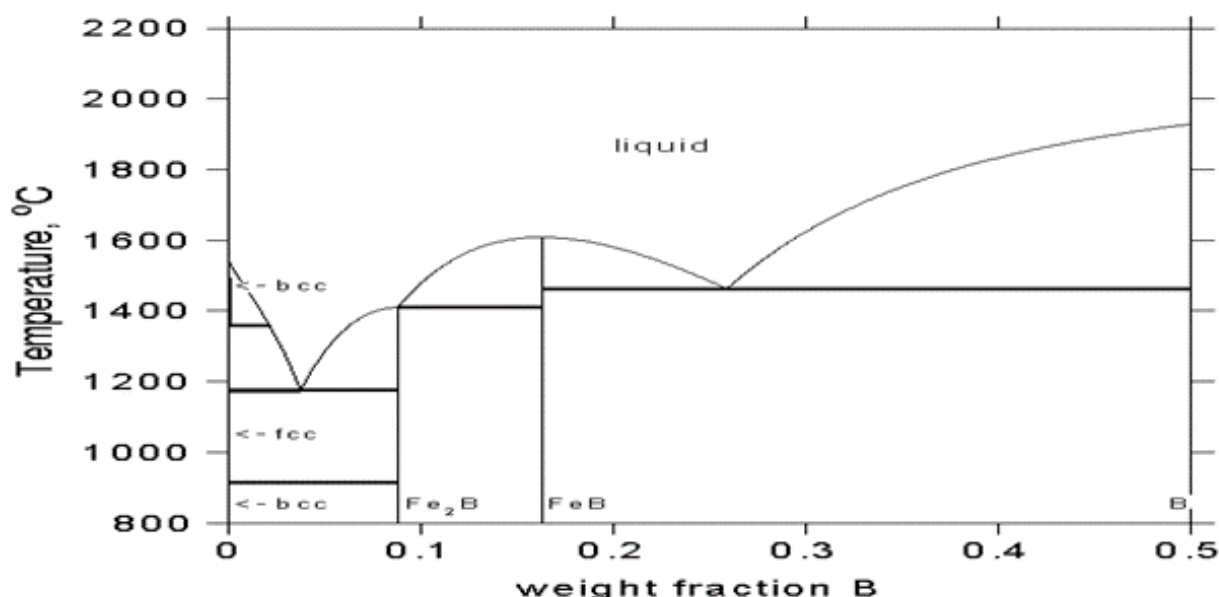
زنگ نزن آستنیتی (304-L) سمت راستمیزان این نواسانات بسیار بیشتر بوده که دلیل عمده آن تجمع این عناصر در ترکیبات ثانویه بورایدی (بوراید آهن) می باشد.

غلظت عنصر حل شونده بور با نفوذ عنصر بور از طریق فصل مشترک زیرلایه/لایه میانی جامد افزایش می یابد. با توجه به اینکه میزان انحلال پذیری بور در آهن (زمینه آستنیتی فولاد زنگ‌نزن 304-L) بسیار کم است. از این رو، براساس دیاگرام فازی دوتایی آهن- بور که در شکل 5 ارائه شده است، در اثر نفوذ بور به فلزات پایه ترکیبات بین فلزی  $B_2Fe$  و  $FeB$  تشکیل می‌شود که مانندی سدی در برابر نفوذ بور به فلزات پایه عمل می کنند (Steuer and Singer 2014). با توجه به اینکه عنصر بور پایدارکننده فاز آستنیت است، در نزدیکی فصل مشترک 2205/لایه میانی مذاب در دمای اتصال دهی، استحاله فریت به آستنیت صورت می گیرد و باعث پایداری فاز آستنیت می‌شود. از طرف دیگر، مزیت استحاله آستنیتی این است که نرخ نفوذ بور را افزایش می دهد (Busby, Warga, and Wells 1953; Massalski 1986).





شکل 4- آنالیز خطی EDS در امتداد درز اتصال نمونه‌های اتصال‌دهی شده در دمای ثابت  $1050^\circ\text{C}$  با ماده پرکننده BNi-2 و زمان‌های نگهداری: الف) 1 min، ب) 15 min، ج) 30 min و د) 45 min.



شکل ۵ - دیاگرام فازی دوتایی آهن - بور.

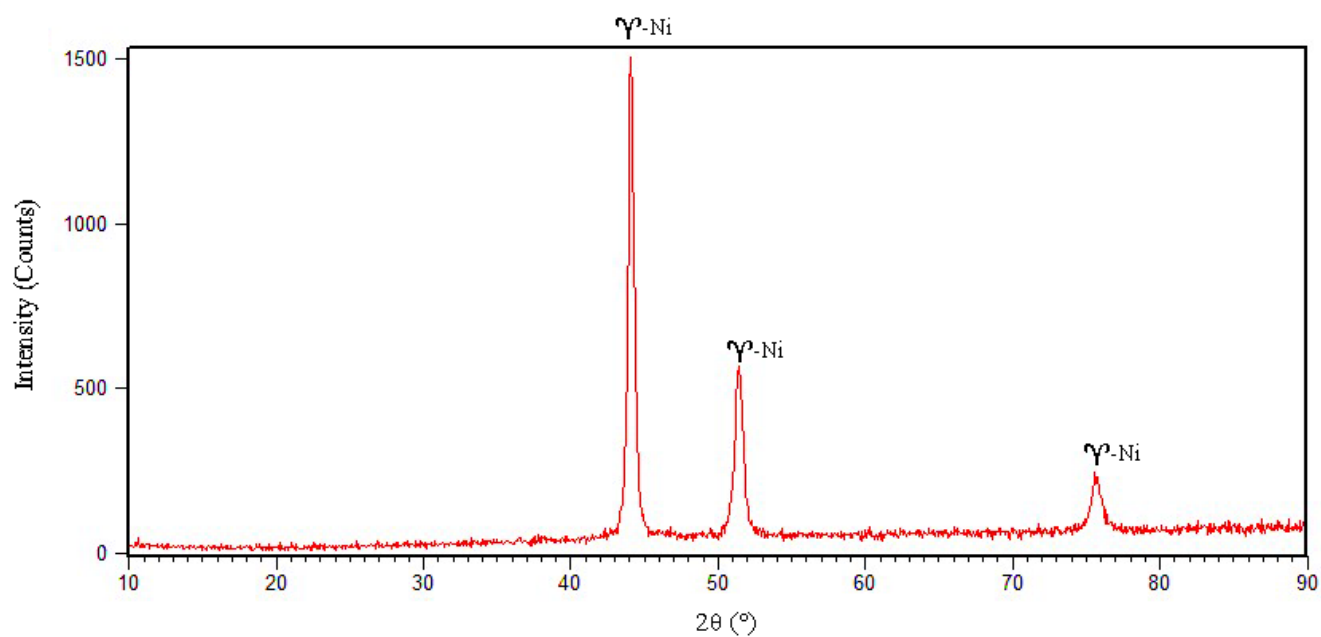
آنالیز ناحیه ای EDS از منطقه انجماد همدمما از نمونه های اتصال داده شده در زمان های نگهداری 1، 15، 30 و 45 دقیقه در دمای اتصال دهی ثابت 1050 °C با لایه میانی BNi-2 در جدول 1 آورده شده است. لایه میانی BNi-2 تنها حاوی عنصر نیکل، کروم و سیلیسیم بوده که یک فاز محلول جامد است. آنالیز ناحیه ای نشان می دهد که عناصر آهن، مس و منگنز توانسته اند توسط مکانیزم انحلال زیرلایه و نفوذ متقابل به لایه میانی مذاب وارد شده و از طریق تشکیل محلول جامد منجر به افزایش استحکام شوند. مطابق با جدول 1 با افزایش زمان نگهداری، میزان عناصر آلیاژی بیشتری وارد مذاب لایه میانی شده که حداکثر میزان آن در زمان نگهداری 45 دقیقه اتفاق افتاده است. حضور این عناصر آلیاژی و کاهش عناصر کاهنده نقطه ذوب باعث افزایش دمای ذوب (لیکوئیدوس) مجدد لایه میانی منجمد شده می شود. شکل 6، الگوی پراش پرتو X از مقطع شکست برشی نمونه متصل شده تحت شرایط 45/1050 °C / دقیقه با لایه میانی BNi-2 را نشان می دهد. در این الگو پیکهای محلول جامد پایه نیکل با ساختار کریستالی مکعبی سطوح مرکزدار (FCC) با بیشترین میزان شدت نشان می دهد که زمینه غالب محلول جامد پایه نیکل با عناصر آلیاژی است که به صورت جانشین در ساختار کریستالی نیکل قرار گرفته اند (نکته: نمونه از سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L شکسته شده و سمت دیگر آن برای آزمون پراش پرتو X استفاده شده است).

جدول 1- آنالیز EDS ناحیه ای از منطقه انجماد همدمما از نمونه های اتصال داده شده با لایه میانی BNi-2.

عناصر (%wt)						زمان نگهداری
سیلیسیم	کروم	منگنز	مس	آهن	نیکل	(min)
2/14	7/05	1/08	0/81	18/11	پایه	1
2/37	7/95	1/23	1/04	21/91	پایه	15



1/17	8/5	1/78	4/46	22/2	پایه	30
0/71	9/89	2/01	4/67	25/2	پایه	45

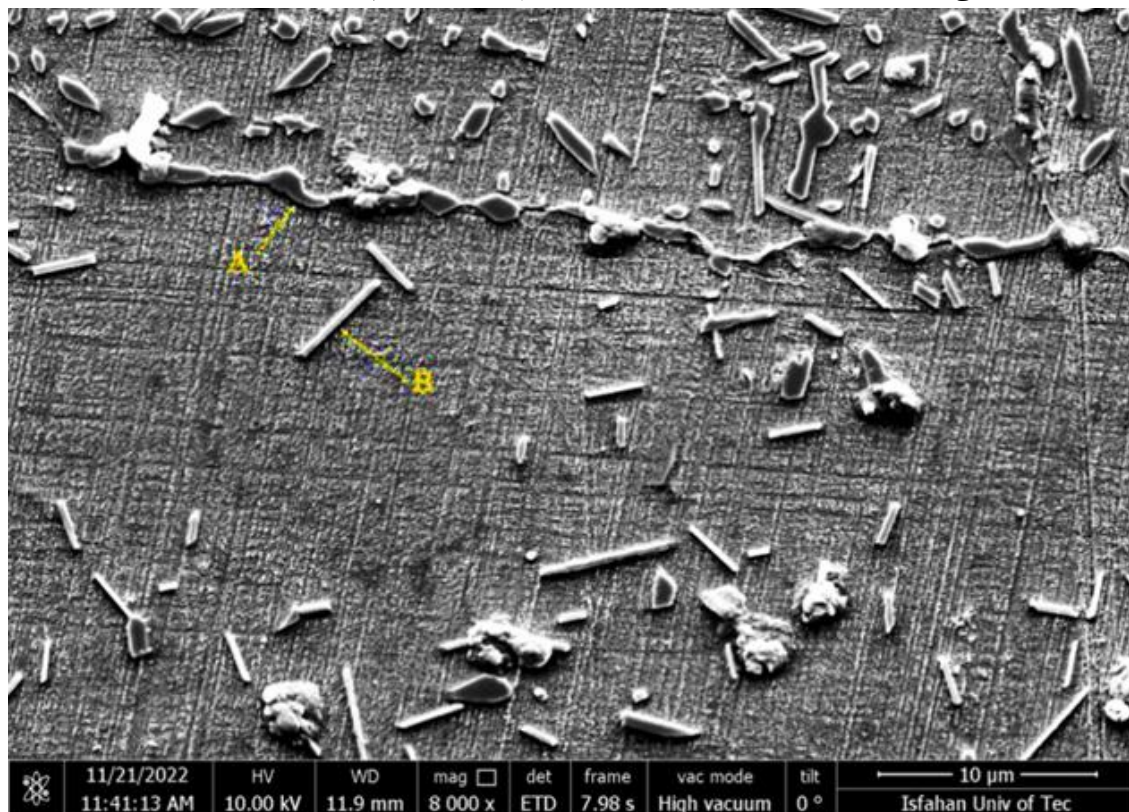


شکل 6- الگوی پراش پرتو X از مقطع شکست برش نمونه اتصال داده شده در شرایط 1050 °C و 45 min با لایه میانی BNi-2.



## 3-4- منطقه متأثر از نفوذ

در لایه میانی BNi-2 زمان رسیدن به منطقه متأثر از نفوذ با وسعت بیشتر به دلیل مقدار بور بالا و مقدار عناصر آلیاژی مانند کروم بیشتر بوده، بنابراین کم می‌باشد. شکل 7، تصاویر SEM ریزساختار منطقه متأثر از نفوذ فولاد زنگ‌زن 304-L نمونه اتصال داده شده در شرایط اتصال دهی  $1050^{\circ}\text{C}$  و 5 min با لایه میانی BNi-2 را نشان می‌دهد. در این تصویر، رسوبات فاز ثانویه با مورفولوژی مرزدانه‌ای با حرف A و رسوبات میله‌ای با حرف B نشان داده شده است. آنالیز EDS نقطه‌ای از این رسوبات در جدول 2 نشان می‌دهد که این رسوبات غنی از آهن و کروم هستند که همراه با عنصر بور نفوذ کرده از مذاب لایه میانی حین حرارت‌دهی با نگهداری در دمای ثابت، رسوبات بورایدی پایه آهن - کروم ساخته‌اند.



شکل 7- تصویر SEM از منطقه متأثر از نفوذ فولاد زنگ‌زن 304-L در شرایط اتصال دهی  $1050^{\circ}\text{C}$  و 45 min با لایه میانی BNi-2.

جدول 2- آنالیز EDS رسوبات نشان داده شده در تصاویر SEM از منطقه متأثر از نفوذ فولاد زنگ‌زن آستنیتی 304-L در شرایط اتصال دهی  $1050^{\circ}\text{C}$  و 45 min با لایه میانی BNi-2.

عناصر (%wt)						رسوبات
Si	Cr	Mn	Cu	Ni	Fe	
1/51	23/44	1/96	0/13	6/69	پایه	A-مرزدانه‌ای
1/07	27/48	1/95	0/48	6/02	پایه	B-میله‌ای

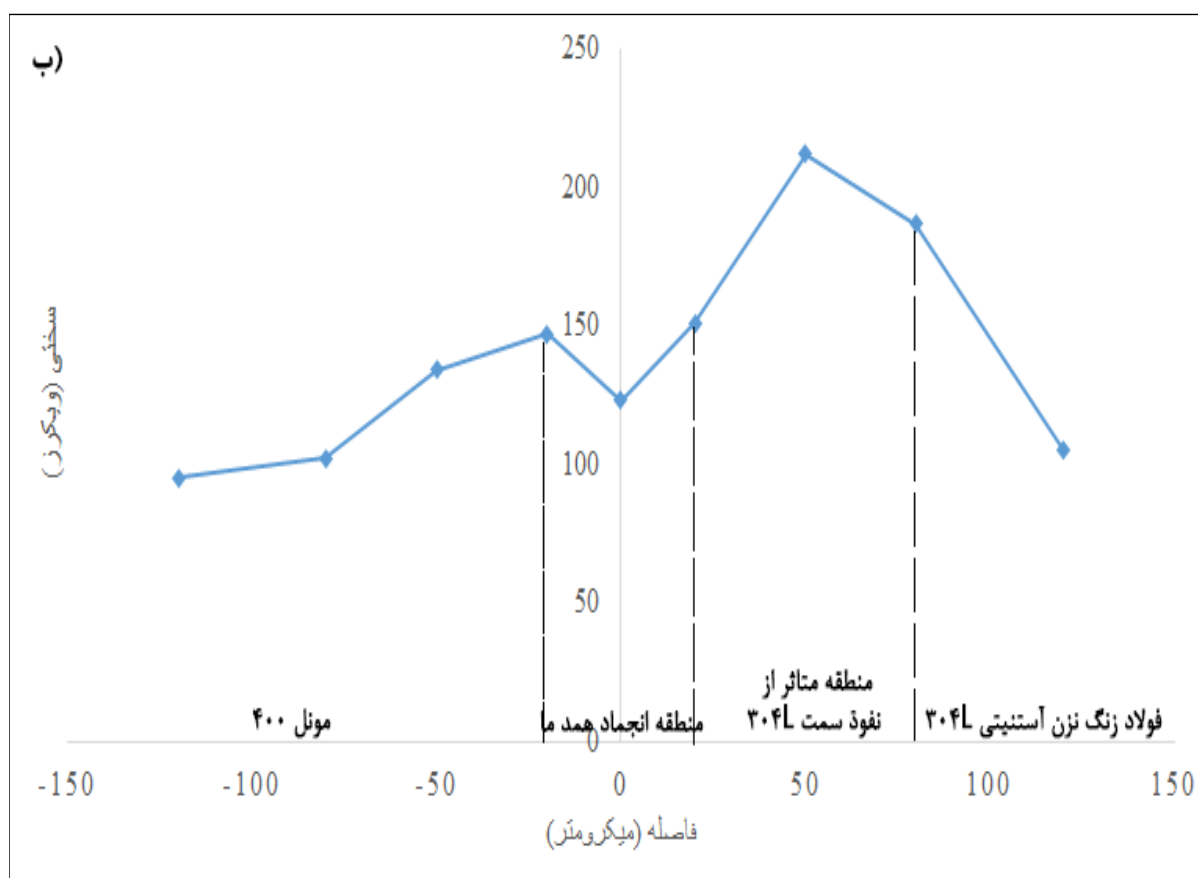
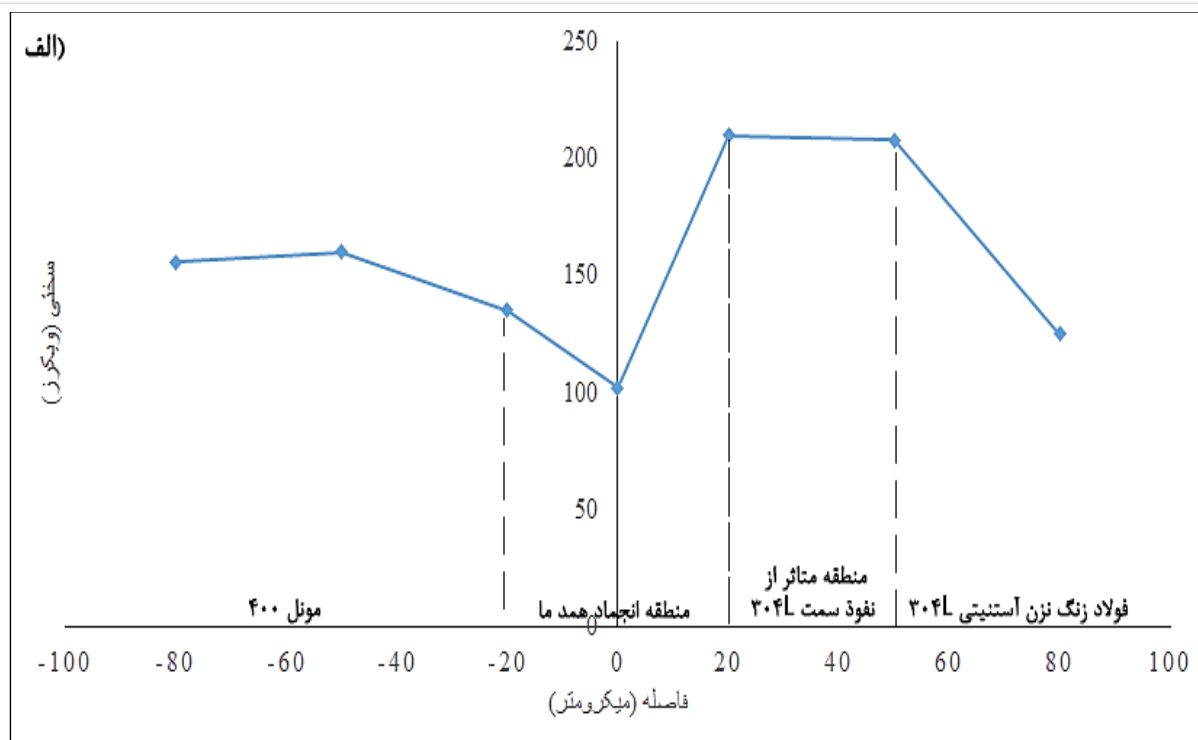
## 3-5- خواص مکانیکی

هنگامی که زمان نگهداری کم است (شکل 8-الف)، میزان انحلال فلز پایه و انجام واکنش‌های متالورژیکی مثل نفوذ متقابل بین زیرلایه ها و لایه میانی مذاب کم است. از این رو، درز اتصال باریک بوده و منطقه انجماد همدمای کمترین میزان سختی را





نسبت به مناطق مجاور آن دارد. بیشترین میزان سختی در شکل 8- الف مربوط به منطقه متأثر از نفوذ فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L است که ناشی از تجمع رسوبات فاز ثانویه (کربو-بوراید های پایه آهن-کروم) می باشد. یکی از نکات جالب نمودار (الف) آن است که در مجاورت با منطقه انجماد همدم مونل 400 (منطقه متأثر از نفوذ مونل 400) به دلیل نفوذ عنصر بور با وجود عدم تشکیل رسوبات بورایدی، ولیکن ریزسختی افزایش یافته است که نشان دهنده تأثیر عنصر بور بر ساختار شبکه کریستالی مونل 400 می باشد. با افزایش زمان نگهداری (شکل 8-ب)، درز اتصال وسیع تر شده است. علاوه بر این، با افزایش نفوذ عنصر بور به سمت فلزات پایه (مخصوصاً فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L) وسعت منطقه متأثر از نفوذ افزایش یافته است که نشان می دهد رسوبات از حالت تجمع یافته در فصل مشترک منطقه انجماد همدم/منطقه متأثر از نفوذ به حالت نیمه پیوسته و جدا از هم درآمده است که بیان کننده آن است که با افزایش زمان می توان رسوبات فاز ثانویه را حتی حذف کرد.

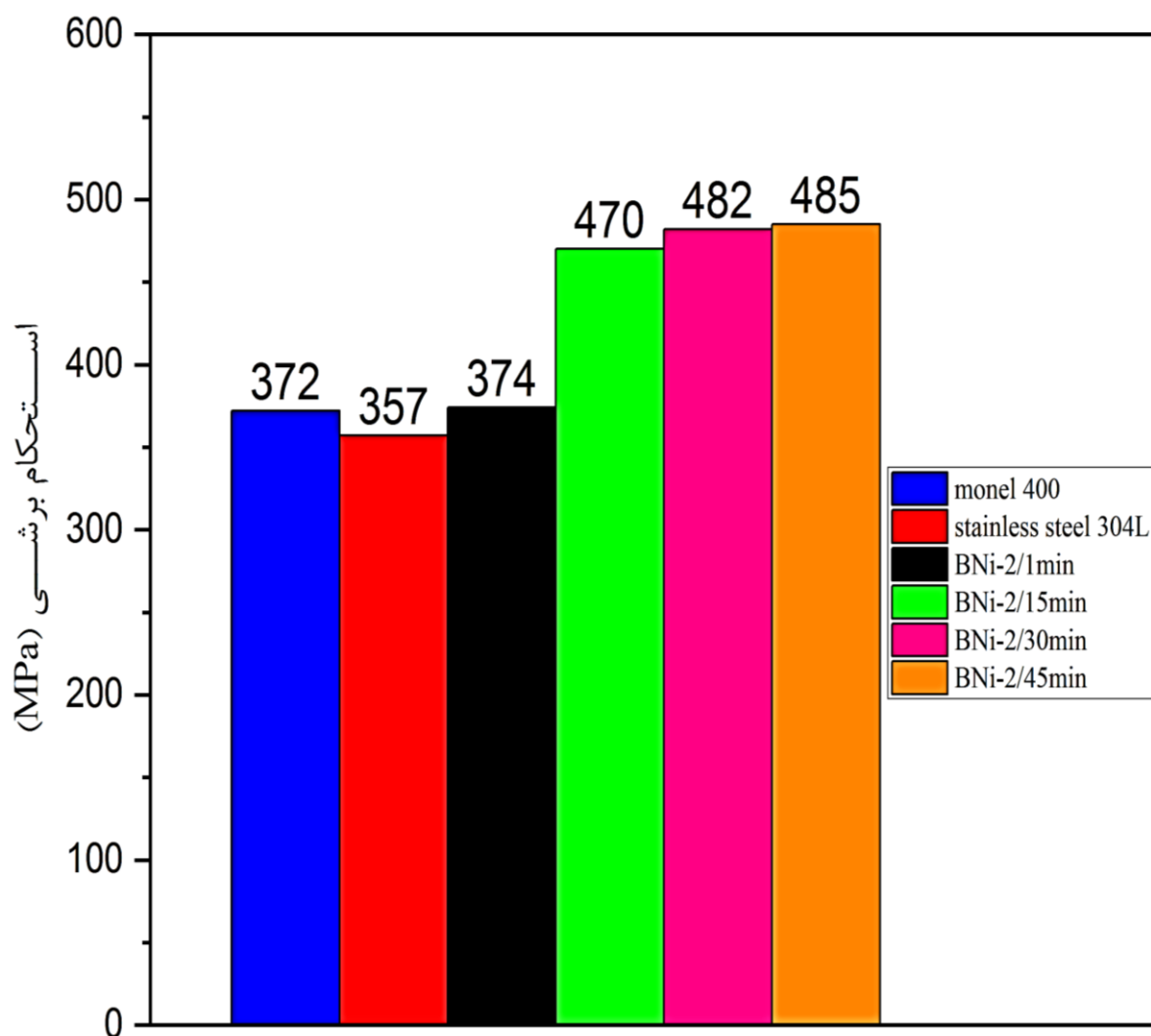


شکل ۸- نمودار ریزسختی نمونه های اتصال داده شده در دمای ثابت  $1050^{\circ}\text{C}$  با لایه میانی BNi-2 در زمان: الف) 1 min و ب) min 45.



## 3-5- استحکام برشی

شکل 9 نشان دهنده استحکام برشی فلزات پایه مونل 400 و فولاد زنگ نزن آستنیتی 304-L همراه با نمونه‌های متصل شده با لایه‌میانی BNi-2 در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  و زمان‌های 1، 15، 30 و 45 دقیقه می‌باشد. روند نموداری نشان می‌دهد با افزایش زمان نگهداری استحکام برشی نمونه‌های متصل شده با فاز میانی افزایش یافته است. به صورتی که حتی نمونه متصل شده در مدت زمان 1 دقیقه استحکام برشی بیشتری نسبت استحکام برشی فلزات پایه دارد که نشان دهنده انجماد همدمای کامل است. استحکام برشی نمونه متصل شده به وسیله ماده میانی BNi-2 حدود 35 درصد بالاتر از فلزات پایه و زمینه است.



شکل 9- نمودار میله‌ای مقایسه استحکام برشی نمونه‌های فلزات پایه و نمونه‌های اتصال داده شده.



#### 4- نتیجه گیری:

نتایج بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که در طی فرآیند انجماد همدم، نمونه‌ها از زمان ابتدایی (زمان 1 دقیقه) به دلیل نفوذ عنصر بور، در اثر انجماد همدم با یکدیگر ترکیب شده‌اند و مناطق تحت تأثیر نفوذ از فرآیند انجماد حذف شده‌اند. این مناطق شامل تک‌فاز محلول جامد نیکل با ساختار کریستالی FCC هستند و سایر عناصر آلیاژی به صورت جانشین در فضاهای خالی نیکل قرار می‌گیرند. در ناحیه مشترک منطقه انجماد همدم و فولادهای پایه، منطقه‌ای تحت تأثیر نفوذ قرار دارد که شامل ترکیبات بورایدی غنی از آهن و کروم است. اتصال‌های حاصل از این فرآیند اتصال‌دهی دارای استحکام برشی حدود 130% استحکام برشی مونل 400 و 136% استحکام برشی فولاد زنگ‌زن آستنیتی L-304 می‌باشند. حضور لایه میانی BNi-2 در فرآیند اتصال باعث بهبود خواص مکانیکی و میکروساختاری اتصال می‌شود. این لایه میانی تأثیر مثبتی بر فرآیندهای دیفیوژیونی دارد و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی کاهنده مانند ترکیبات فاز ثانویه را تسهیل می‌کند. این ترکیبات فازی منجر به افزایش سختی و استحکام برشی منطقه اتصال می‌شوند و نقش مهمی در بهبود ویژگی‌های مکانیکی اتصال ایفا می‌کنند. در کل، نتایج پژوهش نشان می‌دهند که کنترل دقیق زمان نگهداری و استفاده از لایه‌های میانی مناسب می‌تواند بهبود ویژگی‌های مکانیکی و میکروساختاری اتصالات دیسیمیلا را در کاربردهای مختلف مهندسی ایجاد کند.





## مراجع

- Abdolvand, R, M Atapour, M Shamanian, and A Allafchian. 2017. "The Effect of Bonding Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Transient Liquid Phase Bonding between SAF 2507 and AISI 304." *Journal of Manufacturing Processes* 25: 172–80.
- Arivazhagan, N, Surendra Singh, Satya Prakash, and G M Reddy. 2011. "Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding." *Materials & Design* 32 (5): 3036–50.
- Bakhtiari, Amirreza, and I Berenjani. 2014. "Influence of Annealing Heat Treatment on Pitting Corrosion Resistance of Stainless Steel Type 316." *Metallurgical and Materials Engineering* 20 (2): 97–106.
- Busby, Paul E, Mary E Warga, and Cyril Wells. 1953. "Diffusion and Solubility of Boron in Iron and Steel." *JOM* 5: 1463–68.
- Chen, Ze, Chengcheng Wang, Chao Tang, Yung Zhen Lek, Sastry Yagnanna Kandukuri, Hejun Du, Huajian Gao, and Kun Zhou. 2022. "Microstructure and Mechanical Properties of a Monel K-500 Alloy Fabricated by Directed Energy Deposition." *Materials Science and Engineering: A* 857: 144113.
- Dinkel, M K, Paul Heinz, Florian Pyczak, Andreas Volek, Michael Ott, Ernst Affeldt, Andreas Vossberg, Mathias Göken, and Robert F Singer. 2008. "New Boron and Silicon Free Single Crystal-Diffusion Brazing Alloys." In *Proceedings of the International Symposium on Superalloys*, 211–20.
- Duvall, D S, W A Owczarski, and D F Paulonis. 1974. "TLP Bonding: A New Method for Joining Heat Resistant Alloys." Pratt and Whitney Aircraft, Middletown, CO.
- Esmaeili, H, S E Mirsalehi, and A Farzadi. 2017. "Effect of Joining Atmosphere in Transient Liquid Phase Bonding of Inconel 617 Superalloy." *Metallurgical and Materials Transactions B* 48: 3259–69.
- Massalski, Thaddeus B. 1986. "Binary Alloy Phase Diagrams." *ASM* 2.
- Murray, D C, and S F Corbin. 2017. "Determining the Kinetics of Transient Liquid Phase Bonding (TLPB) of Inconel 625/BNi-2 Couples Using Differential Scanning Calorimetry." *Journal of Materials Processing Technology* 248: 92–102.
- Ogawa, T, and E Tsunetomi. 1982. "Hot Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steels." *WELDING J.* 61 (3): 82.
- Ojo, O A, and M M Abdelfatah. 2008. "On Deviation from Parabolic Behaviour during Transient Liquid Phase Bonding." *Materials Science and Technology* 24 (6): 739–43.
- Ramkumar, K Devendranath, N Arivazhagan, and S Narayanan. 2012. "Effect of Filler Materials on the Performance of Gas Tungsten Arc Welded AISI 304 and Monel 400." *Materials & Design* 40: 70–79.
- Saeidi, Kamran, X Gao, F Lofaj, L Kvetková, and Zhijian James Shen. 2015. "Transformation of Austenite to Duplex Austenite-Ferrite Assembly in Annealed Stainless Steel 316L Consolidated by Laser Melting." *Journal of Alloys and Compounds* 633: 463–69.
- Shankar, V, T P S Gill, S L Mannan, and S Sundaresan. 2003. "Solidification Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds." *Sadhana* 28: 359–82.
- Steuer, Susanne, and Robert F Singer. 2014. "Suppression of Boride Formation in Transient Liquid Phase Bonding of Pairings of Parent Superalloy Materials with Different Compositions and Grain Structures and Resulting Mechanical Properties." *Metallurgical and Materials Transactions A* 45: 3545–53.
- Wang, Shaogang, Qihui Ma, and Yan Li. 2011. "Characterization of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Dissimilar Welded Joint between 2205 Duplex Stainless Steel and 16MnR." *Materials & Design* 32 (2): 831–37.



## The effect of intermediate material BNi-2 and duration of storage on the microstructure and mechanical properties of the transition liquid phase connection of austenitic stainless steel 304-L to Monel 400

Sajjad Dehkar<sup>1</sup>, Amir RahbarKlishm<sup>2</sup>.

<sup>a</sup>, *Imam Hossein University, Tehran, Iran*

### Abstract

Non-matching Monel 400 to austenitic stainless steel 304-L connection for economic efficiency and various industrial applications in gas turbines, paper industries, and heat exchangers has led to the increased importance of solid-state and hard soldering processes due to problems arising from fusion welding, such as cracking, excessive grain growth in the heat-affected zone, and galvanic corrosion. Considering that the transient liquid phase bonding method combines the advantages of welding and hard soldering, the aim of this article is to investigate the effect of holding time and BNi-2 interlayer on the microstructure of the base metals and its relationship with the mechanical properties of the transient liquid phase bonding of stainless steel L-304 to Monel 400. In the present study, Monel 400 and austenitic stainless steel L-304 were used as the base metals, and an amorphous BNi-2 interlayer with a thickness of 50  $\mu\text{m}$  was used for bonding. The effect of holding time and BNi-2 interlayer on the transient liquid phase bonding process, microstructure, and mechanical properties was then examined. Microstructural investigations showed that the samples underwent solidification during the 1-minute holding time, resulting in a single-phase solid nickel solution. Performing additional bonding times with the aim of eliminating the affected diffusion zone revealed that the joint interface of the solidification zone/base metals is affected, which includes iron and chromium-rich boride compounds. The bonding with BNi-2 interlayer resulted in a shear strength of approximately 130% for Monel 400 and approximately 136% for austenitic stainless steel 304L.

**Keywords:** Liquid phase connection, stainless steel 304-L, Monel 400, properties.