



مطالعه تجربی و عددی اثر سرعت کشش در استحکام جوشکاری لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های پلی‌آمید

هادی صفی ولیلو^۱، موسی ساجد^{۱*}، محمد علی صائیمی صدیق^۱، سروش سلطانی برچلوئی^۱، وحید طاووسی^۲، علی‌رضا محمدی^۱

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، دانشکده فنی و مهندسی، تبریز، ایران

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: sajed@azaruniv.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۱ خرداد ۱۴۰۴

پذیرش: ۶ مهر ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ورق‌های پلی‌آمید

تست کشش

نرخ کرنش

استحکام

در این پژوهش به مطالعه اثر نرخ کرنش در استحکام اتصالات جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است. تست‌های تجربی بر روی ورق‌های پلی‌آمید که به صورت لب روی هم قرار گرفته بودند، انجام شد. نرخ کرنش اثر قابل ملاحظه‌ای در رفتار مکانیکی ترموپلاستیک‌ها دارد. به منظور ارزیابی اثر نرخ کرنش در استحکام اتصالات پلی‌آمید، چهار نرخ جابجایی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در آزمون کشش مورد مطالعه قرار گرفت. بر طبق نتایج به دست آمده، بیشترین استحکام در نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه با استحکام ۱۷۹۲/۵ نیوتون بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که در اتصالات پلی‌آمید با افزایش نرخ جابجایی استحکام کششی کاهش می‌یابد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر رفتار اتصالات، شرایط آزمون کشش با استفاده از نرم‌افزار تحلیل المان محدود آباکوس نیز شبیه‌سازی شد. نتایج بیانگر انطباق مناسب نتایج تجربی و عددی است و نشان می‌دهد که می‌توان از این مدل عددی در پیش‌بینی رفتار اتصال تحت بارگذاری کششی استفاده نمود.

Experimental and numerical study of the effect of tensile speed on the strength of friction stir overlapping welding of polyamide Sheets

Hadi Safi Valilu¹, Moosa Sajed^{1*}, Mohammad Ali Saeimi Sadigh¹, Surosh Soltani Barcheloei¹, Vahid Tavooosi², Alireza Mohammadi¹

1- Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: sajed@azaruniv.ac.ir

Article Information

Abstract

Original Research Paper

Received: 1 June 2025

Accepted: 28 September 2025

Keywords:

Friction Stir Welding

Polyamide Sheets

Tensile Test

Strain Rate

Strength

This research investigates the effect of strain rate on the strength of friction stir welded joints. Experimental tests were conducted on overlapping polyamide sheets, as strain rate significantly influences the mechanical behavior of thermoplastics. To evaluate the impact of strain rate on the joint strength of polyamide, four displacement rates (20, 30, 40, and 50 mm/min) were examined in tensile tests. The results demonstrated that the maximum strength of 1792.5 N was achieved at the displacement rate of 20 mm/min. Furthermore, the findings revealed an inverse relationship between displacement rate and tensile strength in polyamide joints. For more precise evaluation of joint behavior, the tensile test conditions were simulated using ABAQUS finite element analysis software. The numerical results showed good agreement with experimental data, confirming the reliability of this computational model for predicting joint behavior under tensile loading conditions. The developed finite element model effectively captured the stress distribution and failure mechanisms observed in the physical tests, validating its applicability for mechanical analysis of friction stir welded thermoplastic joints. This research provides valuable insights into the strain rate sensitivity of polyamide friction stir welds, with implications for optimizing welding parameters in industrial applications where dynamic loading conditions are anticipated. The combination of experimental and numerical approaches offers a comprehensive understanding of the mechanical performance of these joints across different loading rates.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Safi Valilu H, Sajed M, Saeimi Sadigh MA, Soltani Barcheloei S, Tavooosi V, Mohammadi A. Experimental and numerical study of the effect of tensile speed on the strength of friction stir overlapping welding of polyamide Sheets. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Sep 23;12(7):18-30. doi: 10.22034/ijme.2025.526860.2090 [In Persian]

۱- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، یک روش اتصال جامد است. در این روش، قطعات با کمک گرمای اصطکاکی ایجاد شده توسط ابزار غیرمصرفی دوار متصل می‌شوند. از زمان معرفی این روش در اوایل دهه ۹۰ میلادی پیشرفت‌های مختلفی در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد شده است که از جمله آن‌ها استفاده از روش‌های هیبریدی است. یکی از روش‌های هیبریدی مورد مطالعه استفاده از جریان الکتریکی در حین جوشکاری به منظور تولید و توزیع بهتر حرارت و دستیابی به کیفیت بهتر جوشکاری است [۱]. از این فرایند در ساخت افزایشی نیز استفاده شده است [۲، ۳]. پردازش اصطکاکی اغتشاشی نیز فرایندی مبتنی بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است و انواع آلیاژها و کامپوزیت‌ها با استفاده از این روش مورد پردازش قرار می‌گیرد [۴، ۵]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ابتدا به منظور ارائه یک روش کارآمد برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم ارائه شد، همچنین این روش قابلیت خود را در اتصال پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری نیز نشان داده است [۶]. خواص ذاتی کامپوزیت‌های پلیمری شامل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت شیمیایی و مقاومت در برابر خوردگی، سبب شده است تا در بسیاری از کاربردهای مرتبط با قطعات خودرو و ماشین‌آلات از این مواد برای جایگزینی فلزات معمولی استفاده شود.

پلی‌آمیدها به روش پلیمریزاسیون تراکمی یک دی‌آمین و یک اسید دو عاملی و یا پلیمریزاسیون آمینواسیدها تولید می‌شوند. این پلیمرها دارای رشته‌های منظم و هم‌اندازه هستند که به همین خاطر بلورینگی زیادی از خود نشان می‌دهند. این مواد با یک عدد شناخته می‌شوند که نشان دهنده تعداد اتم‌های کربن در آمینواسید اولیه مانند پلی‌آمید ۶ و یا تعداد اتم‌های کربن در دی‌آمین و تعداد اتم‌های کربن در دی‌اسید مانند پلی‌آمید ۶۶ است. آمین‌ها می‌توانند از ۲ تا ۱۰ اتم کربن و اسیدها می‌توانند از ۲ تا ۱۸ اتم کربن داشته باشند. پرکاربردترین آن‌ها پلی‌آمیدهای ۶، ۶۶ و ۱۱ هستند. تفاوت اصلی پلی‌آمید ۶ و ۶۶ در حداکثر دمای قابل استفاده است که پلی‌آمید ۶۶ مقاومت حرارتی بیشتری دارد. همچنین تفاوت عمده پلی‌آمیدهای ۶ و ۶۶ با پلی‌آمید ۱۱ در جذب آب و پایداری ابعادی است و پلی‌آمید ۱۱ در این خصوص عملکرد بهتری دارد [۷].

خواص منحصربفرد پلیمرها همچون سبک بودن و مقاومت خوب در برابر خوردگی، سبب شده است کاربرد پلیمرها و کامپوزیت‌های پایه پلیمری به صورت مداوم افزایش یابد. خواص مکانیکی اتصالات جوش داده شده به عوامل متعددی از جمله پارامترهای فرایند، ماده پایه و هندسه ابزار بستگی دارد [۸]. از این رو اتصال این دسته از مواد مورد توجه محققین حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز قرار گرفته است. ویداکیس و همکاران [۹] به مطالعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های پلی‌آمید تولید شده به روش اکسترژن افزایشی و بهینه‌سازی پارامترهای این فرایند پرداخته‌اند. پی‌ریرا و همکاران [۱۰] جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم به پلی‌آمید ۶ را مورد مطالعه قرار دادند که در این مطالعه به تاثیر عمق فرورفتگی و زمان ماند بر کیفیت اتصالات پرداخته شده است. نتایج نشان داد که افزایش مقادیر این پارامترها موجب افزایش استحکام اتصال در تست کشش می‌شود.

توجه به این نکته لازم است که فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای پلیمرها برخلاف فلزات یک فرایند حالت جامد نیست. این روش برای پلیمرها ترکیبی از اتصال حالت جامد و ذوبی است. ترکیب جامد و ذوبی بودن به معنی تامین حرارت از گرمای اصطکاکی و سیلان برشی ویسکوز است. الحورانی و همکاران [۱۱] در یک مطالعه به بررسی تولید و اتلاف حرارت در جوشکاری اصطکاکی ورق‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا به ضخامت ۱۴ میلی‌متر به صورت عددی از طریق حل مسئله هدایت حرارتی مستقیم پرداختند. از دو مدل تولید حرارت در حل عددی استفاده کردند و تأثیر سرعت چرخش پین بر دماهای فرایند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از یک مدل تولید حرارت مختلط که شامل هر دو حالت جامد و جریان برشی ویسکوز است، پیش‌بینی‌های مدل عددی را به طور قابل توجهی بهبود بخشید. پیش‌بینی‌های دما از طریق آزمایش‌های جوشکاری تأیید شده و اختلاف دمای ۳ درصدی را نشان داد. علاوه بر این، مشخص شد که فرایند جوشکاری در سرعت‌های چرخشی بالای ۸۰۰ دور در دقیقه پایدار می‌شود. در یافته‌های جدید یانگ و همکاران [۱۲] به مطالعه اتصال پلی‌آمید ۶ و آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداختند. در این مطالعه سه فرایند جوشکاری شامل جوشکاری سنتی، جوشکاری با شانه ثابت و جوشکاری با شانه ثابت به کمک اولتراسونیک مقایسه شدند. تحلیل‌های میکروسکوپی و مکانیکی نشان داد که استفاده از روش اولتراسونیک منجر به افزایش بار شکست برشی لبه‌ای به ۱۵۰۲ نیوتن نسبت به ۸۱۴ نیوتن در جوشکاری سنتی شد. این افزایش به دلیل جلوگیری از نقص‌های ساختاری و حفره‌ای در ناحیه

همزدن (SZ) و بهبود در نقطه تماس اتصال بود. در یک مطالعه دیگر جوش‌های اصطکاکی بر روی ورق‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در برخی شرایط، کیفیت و استحکام جوش مطلوب بوده، اما در مواردی دیگر اتصالات موفقیت‌آمیز نبوده‌اند. در این مطالعه عیوب جوش در ترکیب پلی‌اتیلن با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به طور خاص بررسی و کیفیت جوش و عملکردها با استفاده از ساختار ماکروسکوپی تحلیل گردید [۱۳]. نتایج بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی‌پروپیلن‌ها نشان داده است که ابزار با هندسه سوزنی باعث کاهش تشکیل حفره می‌شود و جهت چرخش ابزار بر کیفیت اتصالات تأثیرگذار است. پانزده سالوام و لاین [۱۴] نشان دادند که در چرخش خلاف جهت عقربه‌های ساعت، قدرت ابزار نسبت به حالت ساعتگرد برابر است اما جریان ماده داخلی بهتر می‌شود. در مطالعه ای دیگر ساحو و همکاران [۱۵] به بررسی جوشکاری لب به لب نایلون ۶ با استفاده از روش جوشکاری با همزن اصطکاکی پرداختند و دریافتند که سرعت چرخش و سرعت عبور ابزار دو عامل کلیدی تأثیرگذار بر استحکام جوش و سختی میکرو هستند. آن‌ها نشان دادند که در سرعت ۱۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت عبور ۲۰ میلی‌متر در دقیقه، بالاترین کارایی اتصال به میزان ۴۱ درصد به دست آمده است. همچنین در مطالعه دیگر نشان داده شد نایلون ۶ نیروی محوری بالاتر و گشتاور کمتری نسبت به پلی‌کربنات دارد. بهترین کارایی اتصال (> ۵۰ درصد) در سرعت چرخش ۱۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت جوشکاری ۲۰ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از پروفیل پین مربعی به دست آمده است [۱۶]. فن و همکاران [۱۷] به بررسی تأثیر زاویه ابزار در جوشکاری اصطکاکی ورق‌های پلی‌پروپیلن پرداختند و دریافتند که جریان ورق‌های پلی‌پروپیلن به زاویه ابزار حساس است و در زاویه‌های بالاتر، حرارت تولید شده افزایش یافته و منجر به ایجاد شکاف‌های داخلی می‌شود. بالاترین استحکام برابر با ۶۶ مگاپاسکال و مربوط به جوش با زاویه ۱۰° ابزار است. در مطالعه‌ای دیگر میراب‌زاده و همکاران [۱۸] به بررسی حرارت تولید شده در جوشکاری اصطکاکی ورق‌های پلی‌پروپیلن پرداختند و دریافتند که حرارت تولید شده به عوامل مختلفی از جمله سرعت چرخش و حرکت خطی ابزار، هندسه و زاویه آن وابسته است. همچنین به این نتیجه رسیدند که سرعت چرخش ابزار مهم‌ترین عامل در تولید حرارت (۷۰ درصد) است. این در حالی است که هندسه ابزار (۱۵ درصد)، سرعت حرکت (۱۱ درصد) و زاویه کج شدن (۴ درصد) در تولید حرارت تأثیرگذار هستند. راوی و همکاران [۱۷] نیز به بررسی تأثیر تقویت الیاف شیشه بر استحکام جوش و خواص تریبولوژیکی ورق‌های پلی‌آمید ۶۶ پرداختند و نتیجه گرفتند که استحکام جوش این پلیمر در محدوده ۴۶ درصد تا ۵۲ درصد استحکام ماده پایه قرار دارد و همچنین یافته‌های آن‌ها نشان داد که ورق‌های پلی‌آمید ۶۶ تقویت‌شده با ۲۰ درصد الیاف شیشه، دارای حداقل نرخ سایش و ضریب اصطکاک بهتری است.

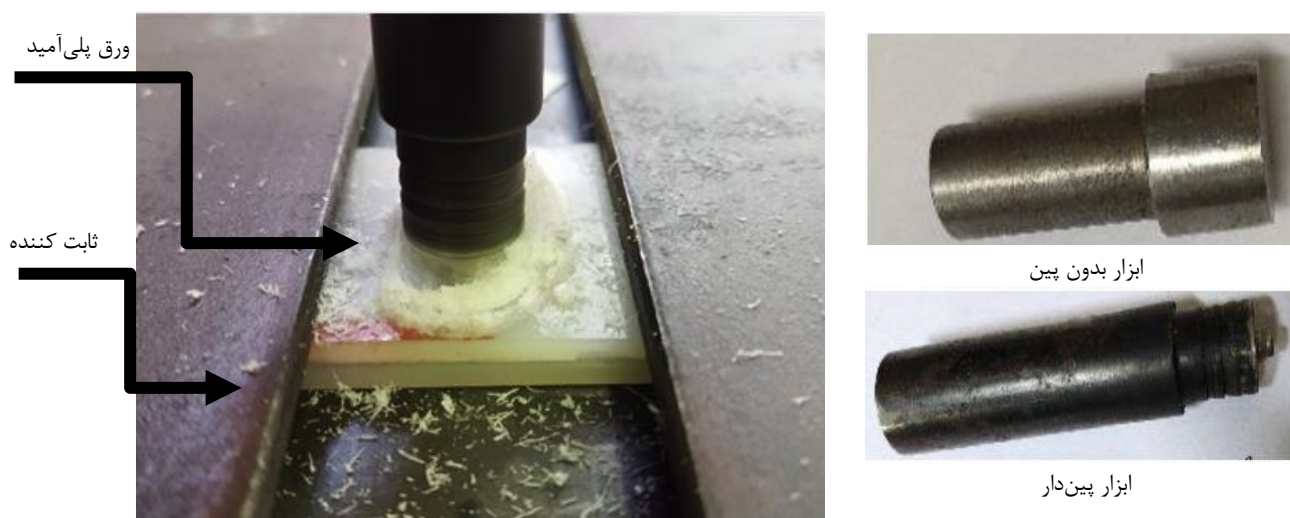
اگرچه در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزات مطالعات قابل توجهی انجام شده و این روش جوشکاری را به عنوان یک روش جوشکاری صنعتی برای فلزات مطرح کرده است اما در مورد پلیمرها، حجم مطالعات صورت گرفته هنوز کافی نیست. از طرفی در مورد عملکرد اتصالات ایجاد شده با این روش در پلیمرها که تحت بارگذاری قرار می‌گیرند نیاز به بررسی با جزئیات بیشتر وجود دارد. از این رو در مقاله حاضر، رفتار اتصالات اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های پلی‌آمیدی که به صورت لب روی هم جوشکاری شده‌اند در نرخ کرنش‌های مختلف به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در محدوده مورد مطالعه در مقاله حاضر، تطابق مناسبی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده شد. این مطالعه با رویکردی نوین به بررسی تأثیر نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ورق‌های پلی‌آمید پرداخته است. پژوهش حاضر از چند جهت حاوی نوآوری‌های قابل توجه می‌باشد: نخست آن‌که برای اولین بار تأثیر سیستماتیک نرخ‌های مختلف کرنش بر استحکام کششی اتصالات پلی‌آمید جوش‌خورده به روش اصطکاکی اغتشاشی مورد تحلیل قرار گرفته که منجر به شناسایی رابطه معکوس بین نرخ کرنش و استحکام اتصالات شده است. دومین نوآوری این تحقیق تعیین نرخ بهینه جابجایی برای دستیابی به حداکثر استحکام در اتصالات بوده که می‌تواند به عنوان معیاری ارزشمند در طراحی اتصالات مورد استفاده قرار گیرد. از دیگر جنبه‌های نوآورانه این پژوهش می‌توان به توسعه یک مدل المان محدود معتبر اشاره کرد که با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی رفتار اتصالات تحت بارگذاری کششی در محدوده وسیعی از نرخ‌های کرنش می‌باشد. همچنین این مطالعه موفق به شناسایی و تفکیک مکانیزم‌های مختلف شکست در نرخ‌های کرنش متفاوت شده است، به طوری که الگوی شکست در نرخ‌های پایین و بالا به صورت متمایز مورد تحلیل قرار گرفته است. ترکیب هوشمندانه روش‌های تجربی و عددی در این پژوهش، امکان درک عمیق‌تری از رفتار اتصالات تحت تأثیر نرخ کرنش را فراهم آورده است. یافته‌های این تحقیق نه تنها از جنبه علمی حائز اهمیت است بلکه از منظر کاربردی نیز می‌تواند به عنوان مبنایی برای بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری در صنایع پیشرفته

مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش با ارائه چارچوبی نظام‌مند، گامی مؤثر در جهت توسعه دانش پایه در حوزه اتصالات پلیمری و کاربردهای صنعتی آن برداشته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه‌ها

در مطالعه حاضر هدف بررسی تاثیر نرخ کرنش بر خواص مکانیکی ورق‌های پلی‌آمید است که به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر اتصال یافته‌اند. پارامتر مورد مطالعه در این پژوهش نرخ کرنش در اعمال تنش کششی است. برای بررسی این موضوع، چهار نرخ جابجایی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در اتصالات ایجاد شده از ورق‌های پلی‌آمیدی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ورق‌های پلی‌آمید (PA6) به ضخامت ۳ میلی‌متر با ابعاد 215×40 میلی‌متر با استفاده از روش جوشکاری خطی اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر اتصال داده شدند. استحکام نهایی پلیمر مورد استفاده ۶۵ مگاپاسکال، مدول الاستیک آن $3/5$ گیگاپاسکال و نسبت پواسون آن $0/3$ است که در جدول ۱ آمده است. خواص مکانیکی پلیمر پایه در جنس ابزار استفاده شده فولاد گرم‌کار H13 ماشینکاری شده است. پین ابزار به شکل استوانه با قطر ۵ میلی‌متر و ارتفاع $5/2$ میلی‌متر تراشکاری و تحت عملیات حرارتی سختی آن تا 54 راکول سی افزایش داده شد. همچنین از ابزار با قطر شانه ۱۴ میلی‌متر استفاده شد. فرایند با استفاده از دستگاه فرز انجام و برای بستن قطعه‌کار روی دستگاه، ثابت‌کننده مخصوص طراحی و ساخته شد به نحوی که از تغییر شکل و بالا آمدن ورق‌ها در طول فرایند به دلیل وجود روبندهای فولادی جلوگیری شود. در یکی از مطالعه‌های اخیر انجام شده توسط سلطانی و همکاران [۱۹] که به بررسی اثر سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار در جوشکاری لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های پلی‌آمید پرداختند. آن‌ها چندین پارامتر که شامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی است را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نمونه‌ها را جوشکاری کرده و تحت آزمون کشش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد بیشترین استحکام برای پارامترهای با سرعت دورانی 1600 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 8 میلی‌متر بر دقیقه برابر با 2408 نیوتن است. در مطالعه حاضر جهت بهینه‌سازی پارامترها از نتایج آن‌ها استفاده شد. این فرایند با عمق فرورفتگی ابزار $0/2$ میلی‌متر، سرعت دورانی 1600 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 8 میلی‌متر بر دقیقه برای همه نمونه‌ها انجام شد. میزان حرارت تولیدی و نحوه توزیع آن در طول انجام فرایند جوشکاری از مولفه‌های مهم برای دستیابی به جوش با کیفیت و استحکام بالا است. شکل ۱ نمایی از فرایند جوشکاری و ابزارهای استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲ نمونه‌ای از ورق جوشکاری شده را نشان می‌دهد. برای بررسی تاثیر نرخ کرنش بر خواص مکانیکی پلی‌آمید، نمونه‌های جوشکاری شده تحت آزمون کشش قرار گرفتند.



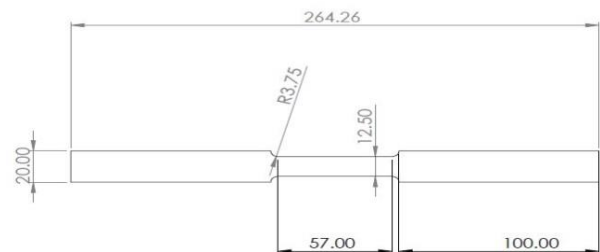
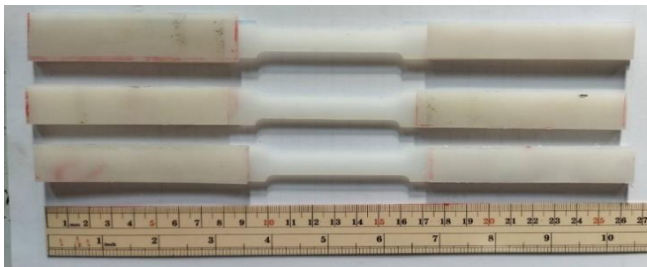
شکل ۱ نمایی از فرایند جوشکاری و ابزارهای استفاده شده



شکل ۲ نمونه جوشکاری شده قبل از تست کشش

۲-۲-۲-آزمون کشش

برای انجام تست کشش با نرخ جابجایی‌های مختلف، نمونه‌ها با استفاده از ورق‌های پلی‌آمید که در بالا شرح داده شد جوش داده شدند و در سرعت‌های جابجایی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تحت تنش کششی قرار گرفتند. همچنین به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق‌های پلی‌آمید در نرخ‌های کرنش مختلف، ورق‌های پایه نیز در همین سرعت‌های جابجایی تحت آزمون کشش قرار گرفتند. در آزمون‌های کشش، به منظور افزایش قابلیت اتکا نتایج در هر آزمایش سه نمونه تهیه شد. شکل ۳ ابعاد نمونه استاندارد و نمونه‌های ساخته شده برای آزمون کشش را نشان می‌دهد که طبق استاندارد ASTM D638 تهیه شده است. در نمونه‌های جوشکاری شده، به منظور توزیع یکنواخت تنش در حین کشش و همچنین جلوگیری از لهیده شدن ورق‌های پلی‌آمید توسط فک‌های قدرتمند هیدرولیکی دستگاه آزمون کشش، در هر دو انتهای نمونه‌ها یک ورق با ضخامت یکسان با ورق اصلی به نمونه‌ها چسبانده شد که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۳ نقشه نمونه استاندارد تست کشش و نمونه‌های ساخته شده برای تست کشش

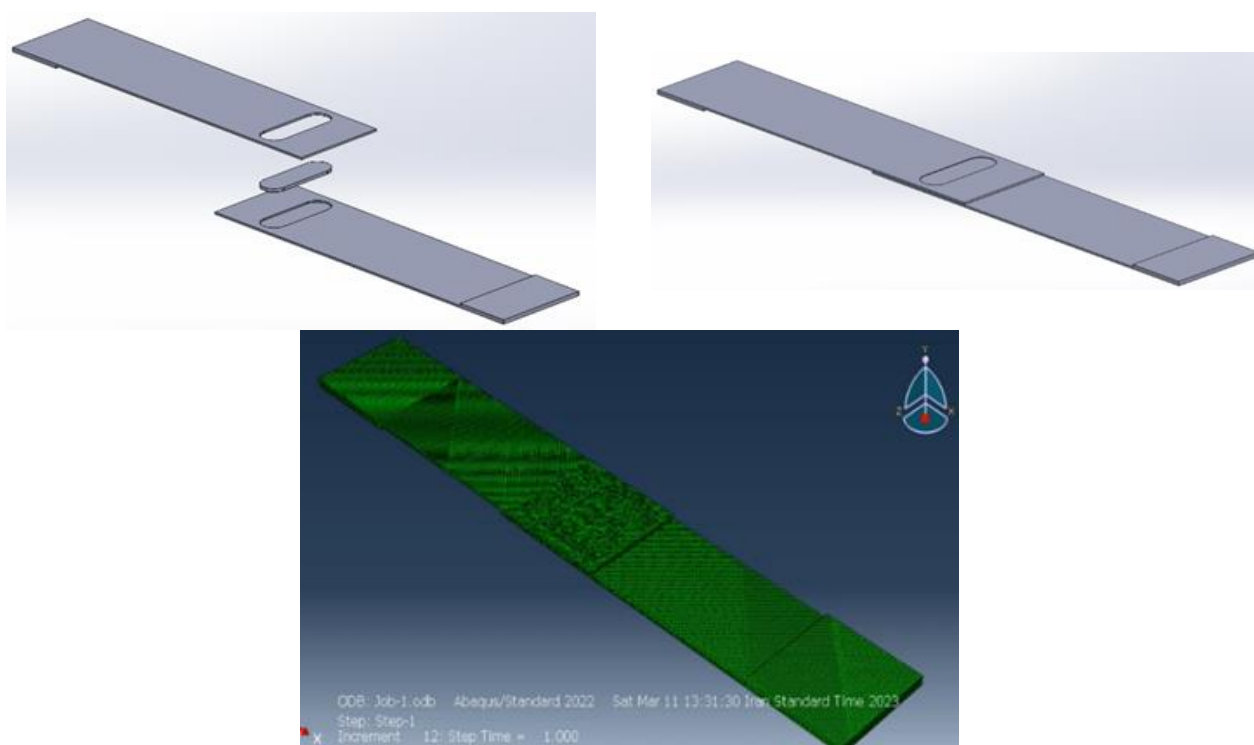
۲-۳-۳-شبیه‌سازی المان محدود

با استفاده از تحلیل المان محدود می‌توان تنش‌های پسماند، اعوجاج‌ها، توزیع دما و عیوب احتمالی را برای بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری (مانند ورودی گرما، سرعت) و یکپارچگی اتصال پیش‌بینی نمود. شبیه‌سازی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۱ که جزء نرم‌افزارهای رایج و پرکاربرد در این زمینه است انجام شد. هدف از انجام شبیه‌سازی مقایسه نتایج آن با نتایج آزمون کشش نمونه‌های اتصال پلی‌آمید تولید شده به روش جوشکاری خطی اصطکاکی اغتشاشی است که به صورت تجربی تولید شده‌اند. نتایج مورد بررسی استحکام شکست و محل شکست نمونه‌ها است. ابتدا نمونه‌های تولید شده در نرم‌افزار سالدورکس طراحی سپس وارد نرم‌افزار تحلیل المان محدود شد. همه نمونه‌ها به صورت همگن در نرم‌افزار تعریف شدند. برای تعریف خواص مکانیکی ماده که شامل مدول الاستیسیته، رفتار ماده در محدوده پلاستیک، تنش تسلیم و استحکام شکست است، از نتایج آزمون کشش استفاده شد. همچنین نسبت

^۱ ABAQUS

پواسون برای همه نمونه‌ها ۰/۳ تعریف شد. در مرحله بعدی در نرم افزار المان محدود، باید مشابه نمونه واقعی ۳ قطعه طراحی شود که شامل یک ورق در زیر، یک ورق بر روی آن و ناحیه همزن است. با توجه به شرایط واقعی باید منطقه همزن با ورق زیرین و رویین یکی شود که نیازمند به دستور تای^۱ است.

با توجه به اینکه جمع‌آوری داده‌ها در ناحیه تغییرشکل از اهمیت بیشتری برخوردار است و همچنین به دلیل تنش شدید اعمالی به این ناحیه، در این ناحیه از اندازه مش ۰/۳ میلی‌متر استفاده شد. در سایر قسمت‌های ورق، اندازه مش ۰/۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در این تحلیل از المان مکعبی خطی ۸ گره‌ای با ادغام کاهش‌یافته (C3D8R) استفاده شد. به دلیل عدم تغییر دما در حین تست کشش که در مرحله شبیه‌سازی نیز وارد شده است خواص وابسته به دما مانند رسانایی حرارتی، گرمای ویژه، چگالی، استحکام تسلیم و مدول یانگ ثابت در نظر گرفته شد. به عنوان شرایط مرزی، یک لبه از اتصال به صورت یک سرگیردار تعریف شد و برای لبه بعدی همانند شرایط تست کشش حرکت با سرعت ثابت در سرعت‌های جابجایی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تعریف گردید. در نرم‌افزار به منظور شبیه‌سازی آزمون کشش جابجایی در امتداد محور نمونه اعمال گردید. همچنین صفحاتی که با فک‌های دستگاه آزمون کشش در تماس هستند نیز در نرم‌افزار مقید شدند. از نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از شبیه‌سازی و تبدیل مقادیر آن به تنش-کرنش، برای مقایسه با نتایج تجربی استفاده شد. شکل ۴ نمونه مونتاژ شده و مش‌بندی شده نمونه پلی‌آمید را نشان می‌دهد.



شکل ۴ نمونه مونتاژ شده و مش‌بندی شده قطعه پلی‌آمید

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تست کشش نمونه‌های پلی‌آمیدی با نرخ جابجایی‌های مختلف

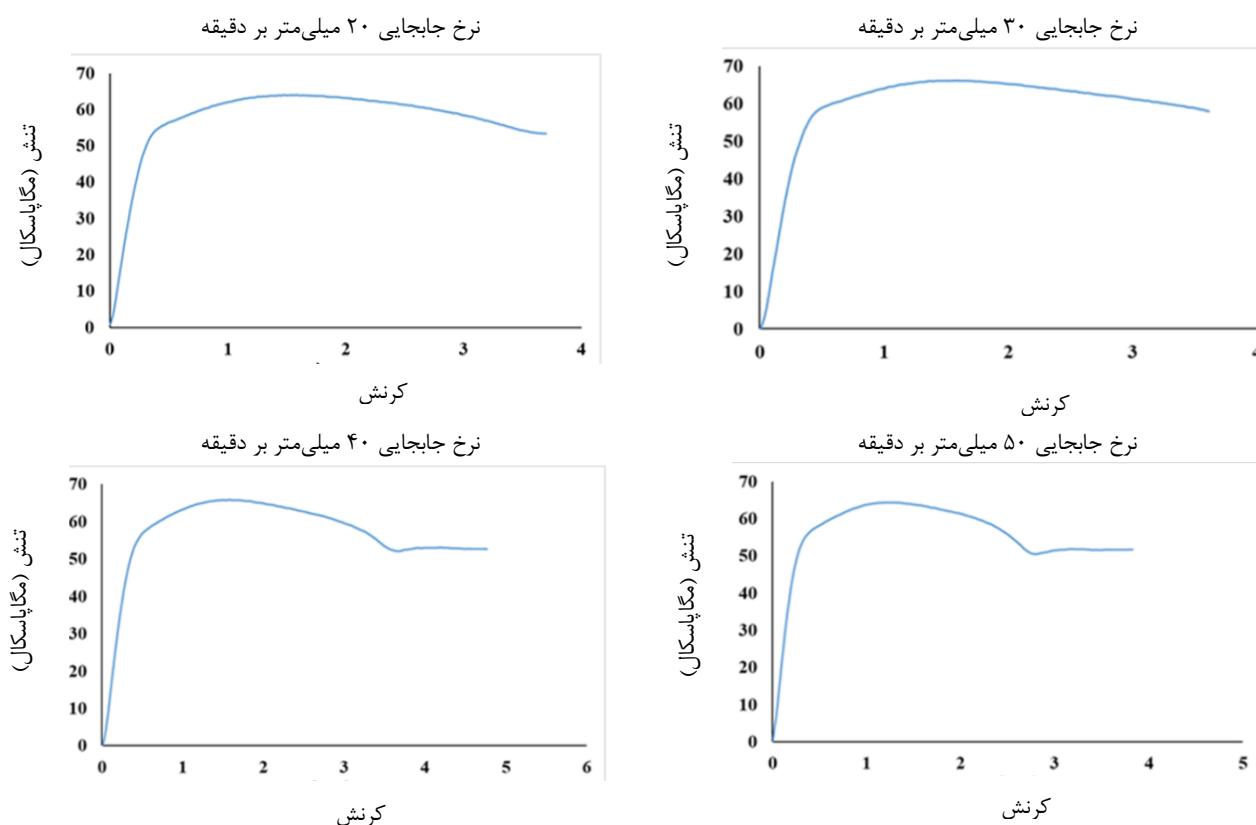
به منظور ارزیابی عملکرد نمونه‌های جوشکاری شده در نرخ کرنش‌های مختلف و با توجه به اثر قابل توجه پارامترهای جوشکاری در خواص مکانیکی اتصال، لازم است نمونه‌ها در شرایط یکسان جوشکاری شوند. به این منظور، سرعت دورانی و نرخ پیشروی به ترتیب برابر ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و ۸ میلی‌متر بر دقیقه برای نمونه‌های جوشکاری شده برای هر چهار سرعت جابجایی انتخاب شده تنظیم شد. آزمون کشش در نرخ جابجایی‌های ذکر شده انجام شد. با انجام تست کشش نمودار نیرو-جابجایی بدست آمد و نمودار تنش-کرنش از آن استخراج و خواص مکانیکی مربوط به هر سرعت جابجایی مشخص شد. با استفاده از تست نمونه استاندارد برای نرخ جابجایی ۲۰

^۱ Tie

میلی‌متر بر دقیقه مقدار مدول الاستیسیته ۳۴۴۰/۹۶ مگاپاسگال، برای نرخ جابجایی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه مقدار مدول الاستیسیته ۳۲۹۱/۹۷ مگاپاسگال، برای نرخ جابجایی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه مقدار مدول الاستیسیته ۳۵۱۹/۷۵ مگاپاسگال و برای نرخ جابجایی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه مقدار مدول الاستیسیته ۳۸۱۶/۵ مگاپاسگال به دست آمد. شکل ۵ نمودار تنش- کرنش مدل‌های استاندارد با سرعت‌های جابجایی مختلف ذکر شده را نشان می‌دهد. در جدول مقادیر مدول الاستیسیته و تنش نهایی برای مدل استاندارد ذکر شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۱ به عنوان ورودی برای تحلیل در نرم افزار المان محدود مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱ خواص مکانیکی مدل‌های استاندارد

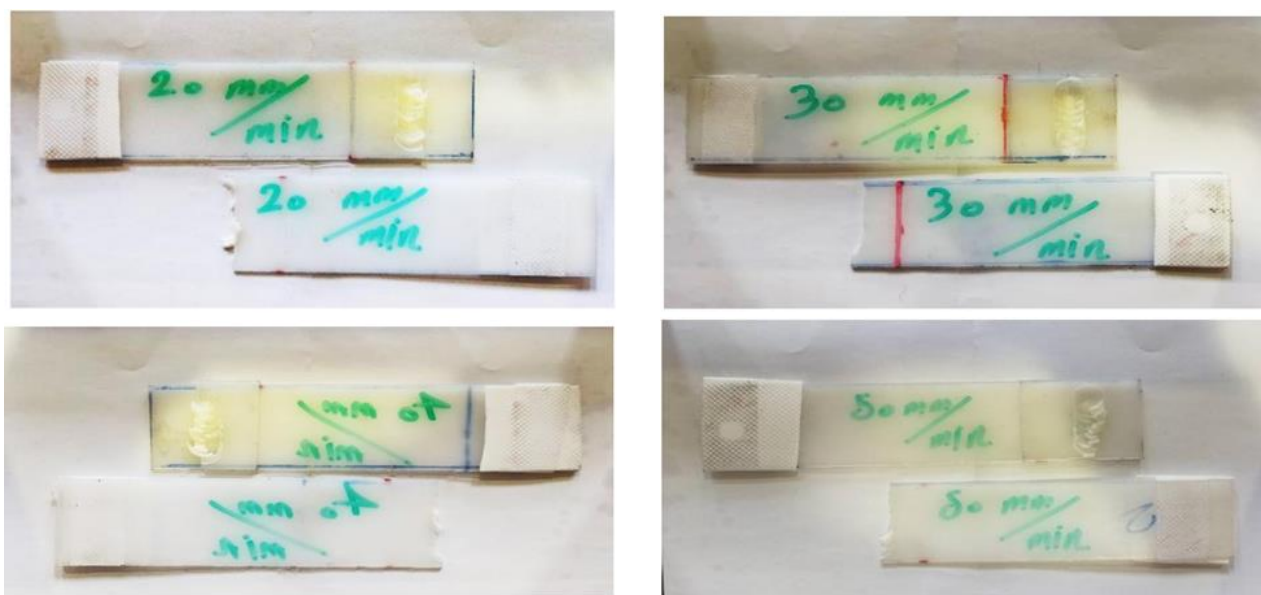
ردیف	عنوان	۲۰ میلی‌متر بر دقیقه	۳۰ میلی‌متر بر دقیقه	۴۰ میلی‌متر بر دقیقه	۵۰ میلی‌متر بر دقیقه
۱	مدول الاستیسیته (MPa)	۳۴۴۰/۹۶	۳۲۹۱/۹۷	۳۵۱۹/۷۵	۳۸۱۶/۵
۲	استحکام نهایی (MPa)	۶۴	۶۶/۱۲	۶۴/۸۱	۶۴/۳۱
۳	نسبت پواسون	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰



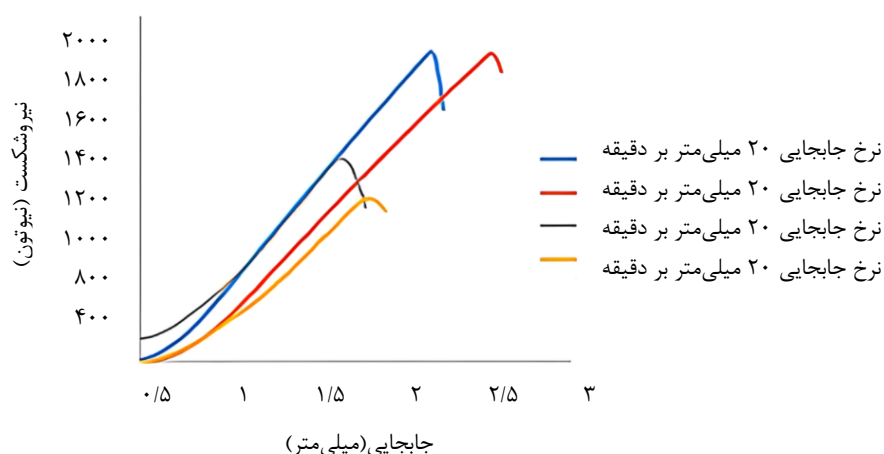
شکل ۵ نمودار تنش-کرنش مدل‌های استاندارد با نرخ جابجایی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه

شکل ۶ نمونه‌های آزمایش شده بعد از آزمون کشش را نشان می‌دهد. برای اولین آزمون نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. نمونه اول در نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه، نیروی ۱۷۹۲/۵ نیوتن را تحمل کرد و بعد دچار شکست شد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پدیده شکست در محل جوش نمونه رخ نداده بلکه روی ورق پلی‌آمید پدیده شکست مشاهده شد. این نشان دهنده استحکام بالاتر اتصال در مقایسه با پلیمر پایه و استحکام مناسب اتصال است. برای دومین آزمون نرخ جابجایی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد که نمونه نیروی ۱۷۸۵ نیوتن را تحمل کرد و بعد دچار شکست شد. با مقایسه آزمون اول و دوم می‌توان نتیجه گرفت که پدیده شکست در نرخ جابجایی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه نسبت به نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه اندکی استحکام پایین‌تری را

نشان می‌دهد. به عبارت دیگر استحکام در نرخ جابجایی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه در مقایسه با نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه ۰/۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد. برای سومین آزمون و در نرخ جابجایی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه، نیروی شکست ۱۱۷۵ نیوتن است. در این آزمایش نمونه جوشکاری شده پلی‌آمید در مقطع جوش دچار شکست شد. به عبارت دیگر، در این نرخ جابجایی استحکام اتصال کمتر از پلیمر پایه است. در مقایسه با آزمون نخست، در این نمونه استحکام ۳۴ درصد کاهش یافت. برای چهارمین آزمون نرخ جابجایی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد که نمونه نیروی ۹۴۲/۵ نیوتن را قبل از شکست تحمل کرد. مقایسه بین آزمون اول و آزمون چهارم نشان داد که استحکام نمونه درصد ۴۷/۵ درصد کاهش داشته است. در شکل ۷ نمودار نیروی شکست-جابجایی برای این چهار نمونه در کنار هم نشان داده شده است.



شکل ۶ نمونه‌های آزمایش شده با نرخ کرنش‌های ۲۰-۵۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۷ نمودار مقایسه تست کشش کرنش‌های ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه

باتوجه به آزمون‌های انجام شده از اتصالات پلی‌آمیدی با نرخ‌های جابه‌جایی مختلف می‌توان نتیجه گرفت که هرچه قدر نرخ جابجایی بیشتر باشد، استحکام کششی کاهش می‌یابد. به طوری که کمترین اختلاف استحکام بین کرنش ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه به اندازه ۰/۴ درصد و بیشترین اختلاف استحکام مربوط به نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه با اختلاف ۴۷/۵ درصد بود. در نتیجه بهترین نتیجه مربوط به نمونه تست شده در نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه است که در

جابجایی ۲/۱۸ میلی‌متر استحکام ۱۷۹۲/۵ نیوتن را تحمل کرده است. این نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به توضیحات بالا، در این جدول استحکام در نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر در دقیقه به عنوان نرخ مینا در نظر گرفته شده است و سایر استحکام‌ها با توجه به آن سنجیده شده است.

جدول ۲ مقایسه نیرو شکست نمونه‌ها در نرخ‌های جابجایی متفاوت

ردیف	عنوان	۲۰ میلی‌متر بر دقیقه	۳۰ میلی‌متر بر دقیقه	۴۰ میلی‌متر بر دقیقه	۵۰ میلی‌متر بر دقیقه
۱	نیرو شکست (نیوتن)	۱۷۹۲/۵	۱۷۸۵	۱۱۷۵	۹۴۲/۵
۲	درصد کاهش در مقابل نمونه با نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر در دقیقه	۰	۰/۴	۳۴	۴۷/۵

۳-۲- تحلیل آماری نتایج تست کشش نمونه‌های پلی‌آمیدی با نرخ جابجایی‌های مختلف

بر اساس نتایج تجربی به دست آمده، در اینجا یک تحلیل آماری جامع از داده‌های استحکام کششی برای اتصالات پلی‌آمید جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در نرخ‌های جابجایی مختلف انجام شده است. میانگین نیرو شکست در نمونه‌ها برابر با ۱۴۲۳/۷۵ نیوتن، انحراف معیار برابر با ۴۱۴/۶۹ نیوتن، ضریب تغییرات ۲۹/۱ درصد و محدوده تغییرات ۸۵۰ نیوتن است.

با استفاده از تحلیل رگرسیون و مطالعه نیرو شکست در برابر نرخ جابجایی یک مدل رگرسیون خطی ($y = \beta_0 + \beta_1 x$) برازش داده شد، که در آن (y) نیروی شکست بر حسب نیوتن و (x) نرخ جابجایی بر حسب میلی‌متر بر دقیقه است. نتیجه این تحلیل معادله ۱ است:

$$y = 2102.5 + 24.75x \quad (1)$$

R^2 (ضریب تعیین) برابر با ۰/۹۵ است که نشان می‌دهد که ۹۵ درصد از تغییرات مقاومت توسط نرخ جابجایی توضیح داده می‌شود. همچنین مقدار p برای شیب کمتر از ۰/۰۵ است که رابطه معکوس آماری معنی‌دار را تأیید می‌کند. جدول ۳ آنالیز واریانس برای مدل رگرسیونی را نشان می‌دهد.

جدول ۳ آنالیز واریانس مدل رگرسیونی

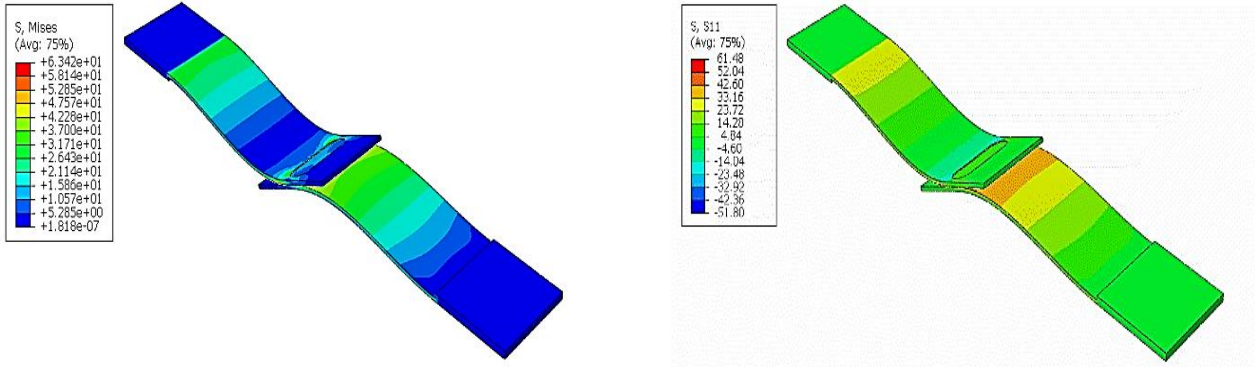
منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	مقدار P
رگرسیون	۱	۷۲۲۵۰۰	۷۲۲۵۰۰	۳۸/۶۷	۰/۰۲۵
باقیمانده	۲	۳۷۳۷۵	۱۸۶۸۷/۵		
جمع	۳	۷۵۹۸۷۵			

با توجه به تحلیل آماری ارائه شده می‌توان نتایج زیر را به صورت آماری تأیید نمود:

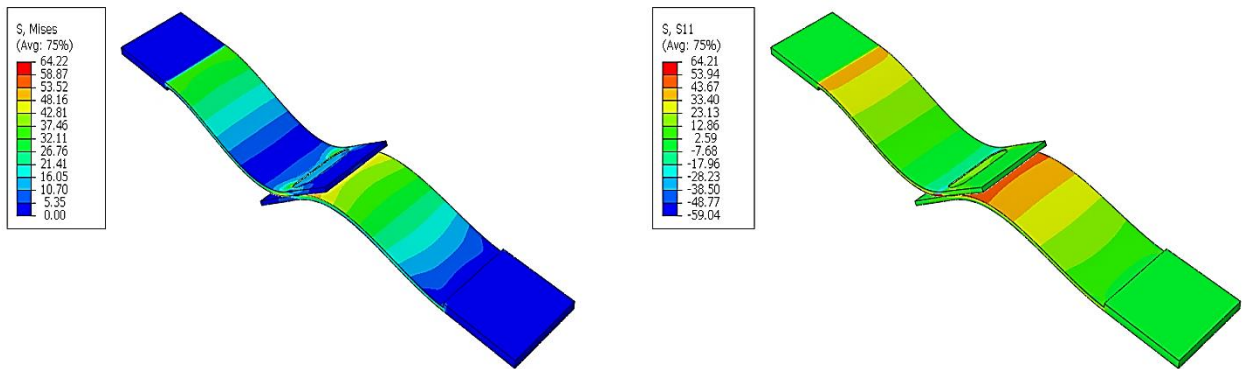
- همبستگی معکوس قوی: نیروی شکست با افزایش نرخ جابجایی به صورت خطی کاهش می‌یابد.
- حساسیت به نرخ کرنش: استحکام با عبور نرخ جابجایی از ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه به شدت کاهش می‌یابد (کاهش ۳۴-۴۷/۵ درصد) و در محدوده مورد آزمایش در این مقاله نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه نرخ بهینه است.

۳-۳- نتایج آزمون شبیه‌سازی در نرم افزار المان محدود

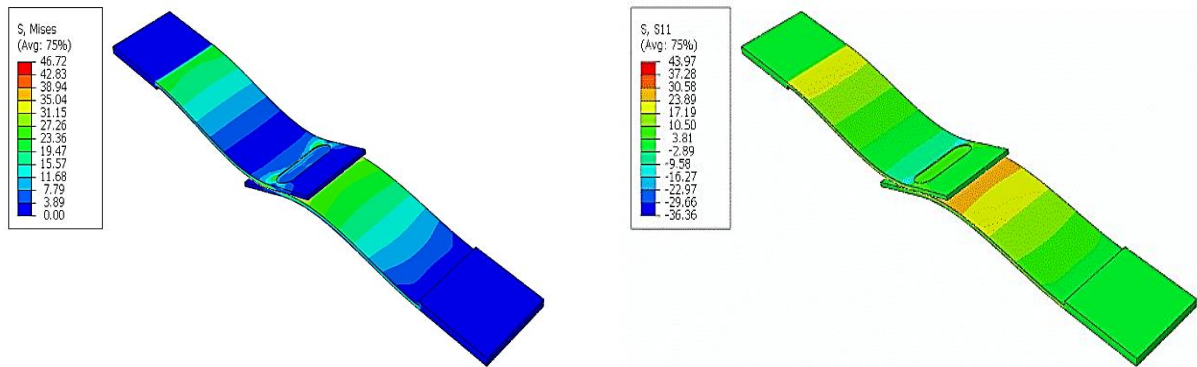
در شبیه‌سازی رفتار اتصالات تحت تنش کششی، خواص مکانیکی اتصالات پلی‌آمید در نرخ جابجایی‌های مختلف بصورت جداگانه برای نرم‌افزار تعریف شد. با مقایسه آزمون کشش در واقعیت و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس می‌توان نتیجه گرفت که در چهار آزمون انجام شده میانگین تفاوت نتایج تجربی و عددی، ۱۰/۹ درصد است. شکل‌های ۸ تا ۱۱ تنش فون میسز و تنش در محور X (به عنوان بیشترین مولفه تنش) را در نرخ‌های جابجایی مختلف را نشان می‌دهد.



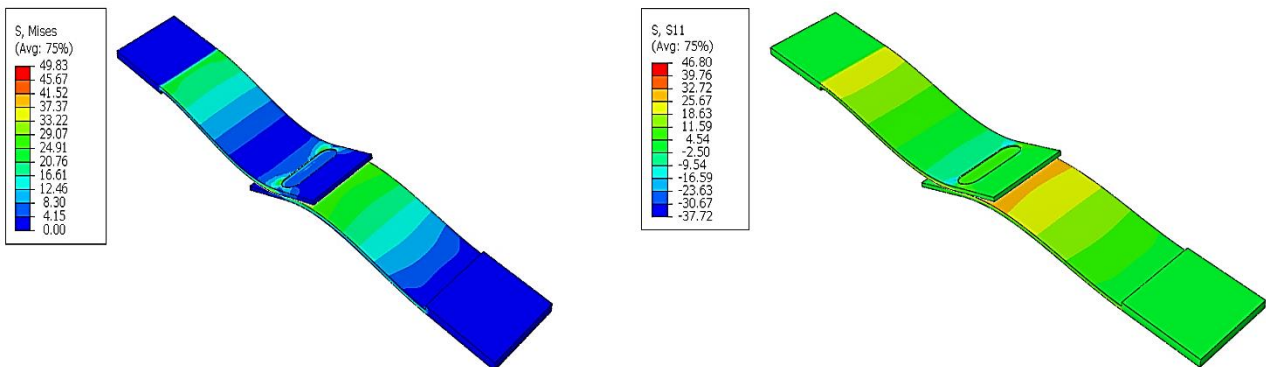
شکل ۸ تنش فون میسز و تنش در محور X در نرخ جابه‌جایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۹ تنش فون میسز و تنش در محور X در نرخ جابه‌جایی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه

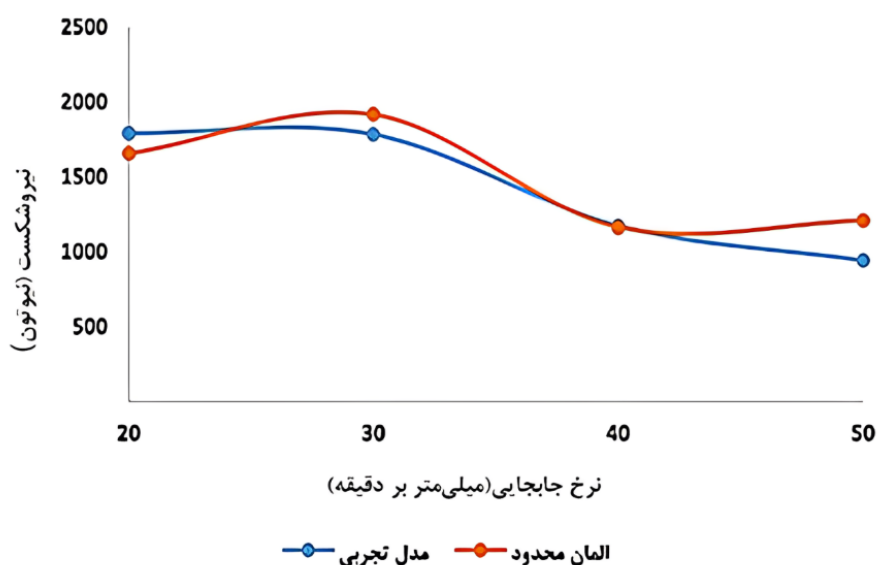


شکل ۱۰ تنش فون میسز و تنش در محور X در نرخ جابه‌جایی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۱ تنش فون میسز و تنش در محور X در نرخ جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه

مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمون کشش انجام شده به این صورت است: مدل شبیه‌سازی شده با نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه در نقطه ۲/۱۸ میلی‌متر به نیروی ۱۶۵۶/۵۷ نیوتون رسید که این مقدار ۷/۵ درصد با آزمون کشش اختلاف دارد. مدل شبیه‌سازی شده با نرخ جابجایی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه در نقطه ۲/۶۳ میلی‌متر به نیروی ۱۹۱۷/۹۹ نیوتون رسید که این مقدار ۷/۴ درصد با آزمون کشش اختلاف دارد. مدل شبیه‌سازی شده با نرخ جابجایی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه در نقطه ۱/۵۲ میلی‌متر به نیروی ۱۱۶۳/۵۶ نیوتون رسید که این مقدار ۱ درصد با آزمون کشش اختلاف دارد. مدل شبیه‌سازی شده با نرخ جابجایی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در نقطه ۱/۷۲ میلی‌متر به نیروی ۱۲۰۹/۱۱ نیوتون رسید که این مقدار ۲۸ درصد با آزمون در واقعیت اختلاف دارد. شکل ۱۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌های مدل عددی را نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته به خوبی توانسته است رفتار واقعی اتصالات را در محدوده‌های مختلف نرخ کرنش پیش‌بینی کند. بالاترین سطح دقت در نرخ‌های میانی کرنش مشاهده می‌شود، در حالی که در کرنش‌های بسیار پایین و بالا، انحرافات جزئی احتمالاً ناشی از اثرات نرخ کرنش بر رفتار ویسکوپلاستیک ماده است. مدل به درستی رابطه معکوس بین نرخ کرنش و استحکام را بازتولید کرده که تأییدی بر اعتبار آن است. اختلاف مشاهده شده بین نتایج عددی و تجربی در محدوده قابل قبولی قرار دارد و نشان‌دهنده قابلیت اطمینان مدل برای کاربردهای صنعتی است. این تطابق خوب، به ویژه در طراحی اتصالات تحت بارگذاری‌های دینامیک حائز اهمیت است. توزیع تنش‌های پیش‌بینی شده توسط مدل نیز با الگوهای شکست مشاهده شده در آزمایش‌ها همخوانی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که مدل نه تنها مقادیر کمی، بلکه الگوهای کیفی رفتار اتصال را نیز به درستی شبیه‌سازی می‌کند. چنین مدلی می‌تواند به عنوان ابزاری ارزشمند در بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار گیرد. جدول ۴ مقایسه نیرو در نرخ جابجایی‌های مختلف در شبیه‌سازی و تست تجربی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ مقایسه نیروی شکست در نرخ جابجایی‌های مختلف در شبیه‌سازی و تست تجربی

جدول ۴ مقایسه نیروی شکست در شبیه‌سازی و مدل تجربی

ردیف	مدل	نرخ جابجایی	۲۰ میلی‌متر بر دقیقه	۳۰ میلی‌متر بر دقیقه	۴۰ میلی‌متر بر دقیقه	۵۰ میلی‌متر بر دقیقه
۱	مدل المان محدود (نیوتن)	۱۶۵۶/۵۷	۱۹۱۷/۹۹	۱۱۶۳/۵۶	۱۲۰۹/۱۱	
۲	تست تجربی (نیوتن)	۱۷۹۲/۵	۱۷۸۵	۱۱۷۵	۹۴۲/۵	
۳	درصد اختلاف	۷/۵	۷/۴	۱	۲۸	

۴- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های پلی‌آمید پرداخت که نتایج آن حاوی یافته‌های ارزشمندی برای جامعه علمی و صنعتی است. مهم‌ترین دستاورد این تحقیق، شناسایی رابطه معکوس بین نرخ کرنش و استحکام اتصالات بود که در آن بیشترین استحکام (۱۷۹۲/۵ نیوتن) در نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه مشاهده شد و با افزایش نرخ جابجایی تا ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، کاهش ۴۷ درصدی استحکام ثبت گردید. تحلیل رفتار شکست نمونه‌ها نشان داد که در نرخ‌های پایین، شکست در ورق پایه اتفاق می‌افتد که نشانگر کیفیت بالای ناحیه جوش است. در حالی که در نرخ‌های بالاتر، شکست در خود ناحیه جوش رخ می‌دهد که بیانگر کاهش کیفیت اتصال در شرایط بارگذاری سریع‌تر است. شبیه‌سازی عددی انجام شده با نرم‌افزار آباکوس نیز با دقت قابل قبولی (میانگین اختلاف ۱۰/۹ درصد) توانست رفتار اتصالات را پیش‌بینی کند که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد این روش برای تحلیل‌های آینده است. با توجه به محدودیت‌های موجود در این پژوهش از جمله تمرکز بر یک نوع پلی‌آمید و محدوده نسبتاً کوچک نرخ کرنش بررسی شده، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده به بررسی رفتار سایر پلیمرهای مهندسی و کامپوزیت‌های پایه پلیمری گسترش یابد و تأثیر ترکیبی نرخ کرنش با سایر پارامترهای جوشکاری مانند سرعت چرخش، نیروی فشاری و هندسه ابزار مورد مطالعه قرار گیرد. توسعه مدل‌های چند مقیاسی پیشرفته‌تر برای پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار اتصالات و اعتبارسنجی این مدل‌ها با داده‌های تجربی در شرایط بارگذاری پیچیده‌تر مانند خستگی و خزش می‌تواند به درک جامع‌تری از این فرایند منجر شود. از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای بهینه‌سازی فرایند در صنایع پیشرفته مانند خودروسازی و هوافضا باشد و زمینه را برای توسعه دستورالعمل‌های طراحی اتصالات تحت بارگذاری دینامیکی فراهم کند. بررسی مکانیزم‌های تغییرات ریزساختاری در نرخ‌های کرنش مختلف و تحلیل ترمومکانیکی کوپل شده نیز می‌تواند به درک عمیق‌تری از رفتار مواد تحت این شرایط منجر شود. چشم‌انداز نهایی این پژوهش، دستیابی به روش‌های بهینه برای تولید اتصالات با عمر کاری طولانی‌تر در شرایط بارگذاری متغیر و کاهش هزینه‌های تولید از طریق بهینه‌سازی پارامترهای فرایند است که می‌تواند با همکاری مراکز علمی و صنعتی به حل چالش‌های عملی در زمینه اتصالات پلیمری منجر شود. این تحقیق گامی اساسی در جهت درک رفتار اتصالات پلیمری تحت بارگذاری دینامیکی محسوب می‌شود و افق‌های جدیدی را برای مطالعات آینده در این حوزه مهم از مهندسی مواد گشوده است. توسعه این مطالعات می‌تواند به تعریف استانداردهای جدید برای جوشکاری پلیمرها در کاربردهای حساس و طراحی سازه‌های پیچیده پلیمری با عملکرد بالا منجر شود.

References

- [1] Sajed M, Guerrero JW, Derazkola HA. A literature survey on electrical-current-assisted friction stir welding. *Applied Sciences*. 2023 Jan 25;13(3):1563. doi: 10.3390/app13031563
- [2] Tagimalek H, Mahmoodi M. Experimental evaluation of T-peel strength on functionally graded Al5083 and HDPE tri-laminated composites fabricated by colding-assisted friction stir additive manufacturing. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2024 Jun 1;9:100174. doi: 10.1016/j.jajp.2023.100174
- [3] Kallien Z, Rath L, Roos A, Klusemann B. Application of friction surfacing for solid state additive manufacturing of cylindrical shell structures. *Additive Manufacturing Letters*. 2024 Feb 1;8:100184. doi: 10.1016/j.addlet.2023.100184
- [4] Kumar R, Mehrotra N, Pal K. Effect of friction stir processing on mechanical, in vitro degradation, and biocompatibility behaviour of stir casted Mg-Zn-rare earth oxide composites for biodegradable implant applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024 Jan 25;972:172767. doi: 10.1016/j.jallcom.2023.172767
- [5] Iwaszko J, Sajed M. Technological aspects of producing surface composites by friction stir processing—A review. *Journal of Composites Science*. 2021 Dec 11;5(12):323. doi: 10.3390/jcs5120323
- [6] Pereira MA, Amaro AM, Reis PN, Loureiro A. Effect of friction stir welding techniques and parameters on polymers joint efficiency—a critical review. *Polymers*. 2021 Jun 23;13(13):2056. doi: 10.3390/polym13132056
- [7] Ravi N, Shanmugam M, Bheemappa S, Gowripalan N. Influence of reinforcement on tribological properties of friction stir welded glass fiber reinforced polyamide 66. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Oct 1;58:1052-63. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.068

- [8] Iftikhar SH, Mourad AH, Sheikh-Ahmad J, Almaskari F, Vincent S. A comprehensive review on optimal welding conditions for friction stir welding of thermoplastic polymers and their composites. *Polymers*. 2021 Apr 8;13(8):1208. doi: [10.3390/polym13081208](https://doi.org/10.3390/polym13081208)
- [9] Vidakis N, Petousis M, Mountakis N, Kechagias JD. Optimization of friction stir welding for various tool pin geometries: the weldability of Polyamide 6 plates made of material extrusion additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023 Feb;124(7):2931-55. doi: [10.1007/s00170-022-10675-5](https://doi.org/10.1007/s00170-022-10675-5)
- [10] Pereira MA, Galvão I, Costa JD, Leal RM, Amaro AM. Friction stir spot welding of thin aluminium sheets to polyamide 6: a study of the welding parameters and strategies. *Journal of Composites Science*. 2024 Jan 8;8(1):21. doi: [10.3390/jcs8010021](https://doi.org/10.3390/jcs8010021)
- [11] Alhourani A, Sheikh-Ahmad J, Almaskari F, Khan K, Deveci S, Barsoum I. Thermal modeling of friction stir welding of thick high-density polyethylene plates. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024 Jan 1;28:4186-98. doi: [10.1016/j.jmrt.2024.01.044](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.044)
- [12] Yang K, Nian S, Ji S, Hu W, Liu J, Ma L. Research on ultrasonic-stationary shoulder assisted friction stir lap welding of thermoplastic polymer and aluminum alloy. *Composites Part B: Engineering*. 2024 Nov 1;286:111797. doi: [10.1016/j.compositesb.2024.111797](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111797)
- [13] Sahu SK, Mahto RP, Pal K. Investigation on mechanical behavior of friction stir welded nylon-6 using temperature signatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020 Aug;29(8):5238-62. doi: [10.1007/s11665-020-05030-2](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05030-2)
- [14] Asadi Borojeni B, Mozafari Vanani L. The effect of tool geometry on the tensile strength of polypropylene Components Welded by Friction Stir Welding Method. *Karafan Journal*. 2020;17(1):133-45. [In Persian]
- [15] Sahu SK, Pal K, Das S, Tripathy A. Study on mechanical behavior of friction stir welded nylon-6 sheets. In *Recent Trends in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICIME 2020* 2020 Oct 31 (pp. 151-160). Singapore: Springer Singapore. doi: [10.1007/978-981-15-7557-0_13](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7557-0_13)
- [16] Sahu SK, Mishra D, Pal K. A comparative study between weldability of polycarbonate and nylon-6 using different pin geometries in friction stir welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2022 Apr;236(5):522-39. doi: [10.1177/09544054211040705](https://doi.org/10.1177/09544054211040705)
- [17] Fan G, Tomków J, Abdullah ME, Derazkola HA. Investigation on polypropylene friction stir joint: effects of tool tilt angle on heat flux, material flow and defect formation. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023 Mar 1;23:715-29. doi: [10.1016/j.jmrt.2023.01.028](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.028)
- [18] Mirabzadeh R, Parvaneh V, Ehsani A. Experimental and numerical investigation of the generated heat in polypropylene sheet joints using friction stir welding (FSW). *International Journal of Material Forming*. 2021 Sep;14(5):1067-83. doi: [10.1007/s12289-021-01622-y](https://doi.org/10.1007/s12289-021-01622-y)
- [19] Soltani S, Sajed M, Saeimi Sadigh MA. An experimental investigation on effect of tool rotational speed and feed rate in friction stir overlap welding of polyamide sheets. *Mechanical Engineering Journal*. 2024;33(4):28-36. doi: [10.30506/mmep.2024.2015459.2145](https://doi.org/10.30506/mmep.2024.2015459.2145) [In Persian]