



تحلیل تنش در اتصالات جوشی یک خشک کن صنعتی ناشی از بارگذاری ضربه‌ای

ایمان باری، یدالله علی‌نیا*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

کلمات کلیدی:

خشک کن صنعتی
اتصال جوشی
روش اجزای محدود
بارگذاری ضربه‌ای
تنش ون مایسز

خلاصه: در این پژوهش، مسأله جدایش اتصال جوشی پروازنده‌های یک خشک کن صنعتی تحت بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. وظیفه پروازنده‌ها پخش یکنواخت محصول درون سیستم و جلوگیری از تماس فوری محصول مرطوب با سطح خارجی لوله‌های بخار است. علاوه بر این، برای جدایش محصول چسبیده به بدنه داخلی از ضربه چکش‌های ثقلی بر روی بدنه خارجی استفاده می‌گردد. بررسی‌های به عمل آمده حاکی از آن است که ضربات مکرر چکش بر روی بدنه سیستم موجب خرابی اتصال جوش‌های نگهدارنده پروازنده به پوسته داخلی و در نهایت جدایش کامل آنها خواهد شد. با فرض اینکه چکش با سرعت اولیه مشخص به سطح خارجی سیستم برخورد می‌کند، مدل اجزای محدود مسأله به کمک نرم‌افزار تجاری آباکوس تهیه می‌شود. نتایج اولیه حاکی از آن است که ضربات چکش موجب تولید تمرکز تنش و تغییر شکل پلاستیک قابل توجه در ریشه اتصال جوش‌های پروازنده می‌گردد. به منظور پیشگیری از پدیده خرابی اتصال راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده است از جمله: تغییر مکان اتصال جوشی، تقویت اتصال به کمک نبشی، تغییر ضخامت و جنس صفحه جاذب. بر اساس نتایج به دست آمده، تغییر موضع خط جوش به سمت ابتدای پروازنده و استفاده از نبشی تقویت کننده می‌تواند به ترتیب حدود ۱۸٪ و ۴۳٪ ماکزیمم تنش ون مایسز را کاهش دهند. علاوه بر این، کاربرد یک صفحه جاذب دو لایه می‌تواند مقدار تمرکز تنش در ریشه اتصال جوشی را به میزان ۸۰٪ کاهش دهد.

۱- مقدمه

علی‌رغم اهمیت اتصالات جوشی در ساخت سازه‌های مهندسی، روش‌های محاسباتی دقیق برای ارزیابی مقاومت جوش در برابر شکست به دلیل چالش‌های شبیه‌سازی توسعه چندان نیافته است. مدل‌سازی انتشار و گسترش ترک در اتصالات جوشی سه‌بعدی نیازمند زمان محاسباتی بالا است زیرا یک سازه واقعی اغلب دارای اتصالات جوشی با هندسه پیچیده است. اکثر مطالعات گذشته بر رفتار شکست سراسری اتصالات جوشی متمرکز می‌باشند. همچنین رفتار شکست محلی جوش مانند شروع و انتشار ترک را نمی‌توان به طور مؤثر مدل‌سازی کرد.

لنگرند و مارکیویکز [۱] به بررسی تجربی تأثیر نرخ کرنش بر رفتار غیر خطی شکست جوش نقطه‌ای تحت شرایط بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی پرداختند. نتایج تجربی آنها نشان داد که پدیده‌های تسلیم، سخت شونده‌گی و شکست جوش‌های نقطه‌ای وابسته به نرخ کرنش است. یانگ و همکاران [۲] به مدل‌سازی اتصالات تیر-ستون فولادی صلب

تحت بارگذاری ضربه پرداختند. آن‌ها از مدل خرابی شکست پلاستیک در محاسبات استفاده کردند که با نتایج تجربی تطابق دارد. علاوه بر این، اثرات وزن و ارتفاع رهاسازی بر پاسخ دینامیکی اتصالات فولادی بررسی شد. کو و همکاران [۳] حالت‌های مختلف خرابی اتصالات T شکل لوله‌ای تحت اثر ضربه چکش را با استفاده از مدل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه، کو و همکاران [۴] اثر تقویت مفاصل K و T شکل لوله‌ای را به صورت عددی و تجربی بررسی نمودند. بر اساس نتایج آنها، تقویت اتصال به طور قابل توجهی مقاومت ضربه‌ای مفاصل لوله‌ای را بهبود می‌بخشد. ریبریو و همکاران [۵] رفتار دینامیکی اتصالات گیردار پیچی^۱ را به کمک نرم‌افزار آباکوس مطالعه نمودند. اثرات اندازه بار، مدت زمان اعمال بار و ضخامت فلنج اتصال پیچی در تحلیل پارامتری آنها در نظر گرفته شد. آن‌ها در مرحله اول اثرات نرخ کرنش بالا بر خواص مکانیکی، در مرحله دوم مدل شکست شکل‌پذیر برای پیش‌بینی شروع آسیب و در مرحله آخر الگوریتم عددی برای حل مسائل دینامیکی را بررسی نمودند. چاو



می‌دهد که افزایش انرژی ضربه تأثیر چندانی بر حداکثر مقدار نیروی ضربه ندارد ولیکن طول فرآیند ضربه را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش نسبت پهنا به ضخامت فلنج به طور قابل توجهی، مقاومت تیر در مقابل ضربه را تضعیف می‌کند.

چن و همکاران [۱۳] به بررسی رفتار دو نوع اتصال تیرستون تحت شرایط مختلف بارگذاری پرداختند. برای درک بهتر نسبت انرژی جذب شده توسط اتصالات تیر-ستون، تحلیل پارامتری با استفاده از مدل اجزای محدود انجام شد. براساس مطالعات عددی و تجربی آنها، دو شاخص برای ارزیابی عملکرد اتصالات تیر-ستون تحت بارهای ضربه‌ای پیشنهاد شد. همچنین افزایش سرعت ضربه تأثیر بسیار بزرگتری بر رفتار ساختاری اتصالات نسبت به افزایش جرم ضربه زنده دارد.

با توجه به مطالب اخیر، هدف اصلی این پژوهش شناسایی مواضع تمرکز تنش و نقاط مستعد وقوع خرابی در اتصالات جوشی یک خشک‌کن صنعتی است. اتصال جوشی و ضربه ناشی از چکش در نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی می‌شود و عوامل مؤثر بر کاهش سطح تنش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- بیان مسئله

شکل ۱ شماتیک یک خشک‌کن چرخان^۲ از نوع حرارت غیر مستقیم را نشان می‌دهد که شامل یک استوانه گردان متمایل به سمت خروجی، مجموعه‌ای از لوله‌های بخار به عنوان مبدل حرارتی، مجموعه حلقه فولادی به عنوان تکیه‌گاه، مجموعه چرخ‌دنده و موتور محرک می‌باشد.

خشک‌کن‌های چرخان در فرآوری محصولات مختلف نظیر سویا، مواد معدنی، سیمان و ملامین مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به نوع محصول، خشک‌کن می‌تواند شامل لوازم جانبی دیگر باشد به عنوان مثال در خشک‌کن مورد بررسی به دلیل چسبندگی ملامین به بدنه داخلی، تعدادی چکش ثقیل همانند شکل ۲ بر روی بدنه خارجی خشک‌کن تعبیه شده‌اند. ضربات مداوم این چکش‌ها موجب جدایش ملامین از دیواره داخلی خشک‌کن خواهد شد. در خشک‌کن مورد بررسی، بخار اشباع به عنوان ماده گرم‌کننده از داخل مجموعه‌ای از لوله‌ها عبور می‌کند. گرما از طریق دیافراگم لوله به دو روش انتقال حرارت تابشی^۳ و هدایتی^۴ به محصول منتقل می‌شود در مجاورت هر

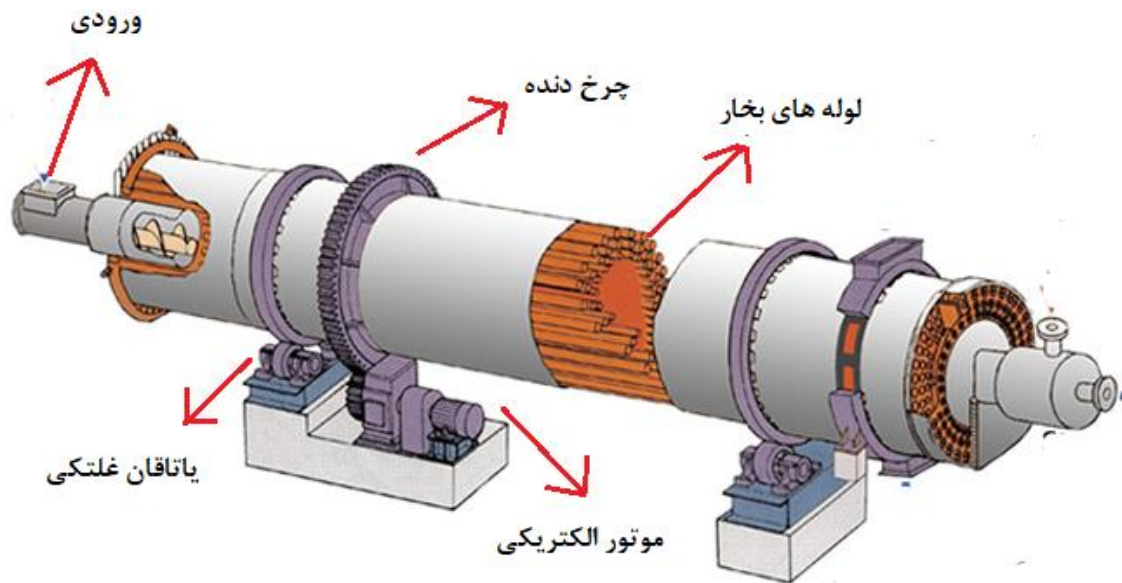
و همکاران [۶] به مطالعه پارامتری برای تعیین اثرات سرعت ضربه، جرم ضربه زنده و انرژی ضربه بر پاسخ دینامیکی اتصالات پرداختند. آن‌ها عوامل خارجی تأثیرگذار بر پاسخ دینامیکی مفاصل T شکل لوله را شناسایی و میزان تأثیر عوامل را به صورت کمی ارائه نمودند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در خصوص رفتار اتصالات در سازه‌های فولادی تحت بارگذاری شدید ضربه‌ای انجام شده است. اتصالات سازه‌ای اغلب شامل چندین جوش گوشه‌ای^۱ هستند. این جوش‌ها معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌شوند که مقاومت استاتیکی بیشتری نسبت به سایر اجزای اتصالات داشته باشند زیرا جوش‌ها معمولاً انعطاف‌پذیری کمتری دارند. با این حال، مقاومت دینامیکی جوش‌های گوشه‌ای ممکن است تحت تأثیر نرخ کرنش و همچنین نرم شدن به دلیل کار پلاستیک و خود گرمایشی قرار گیرد. بژورک و همکاران [۷] عملکرد مکانیکی اتصالات دارای جوش گوشه‌ای را تحت بارگذاری استاتیکی مطالعه کردند و راهکارهایی جهت افزایش قابلیت تحمل بارگذاری کششی و خمشی ارائه دادند. مینگ و همکاران [۸] به بررسی پارامترهای مختلف از جمله حالت‌های شکست، زاویه شکست، استحکام نهایی و شکل‌پذیری جوش گوشه‌ای در یک اتصال صلیبی تحت بارگذاری کششی پرداختند. اثر هندسه جوش‌های فولادی بر خستگی اتصالات جوشکاری شده در مراجع [۹ و ۱۰] مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد استحکام خستگی حاصل از جوش‌های فولادی می‌تواند بسیار بالاتر از مقادیر مقاومت خستگی معمولی ارائه شده در استانداردها باشد. گریسمو و همکاران [۱۱] به بررسی پاسخ جوش‌های گوشه‌ای فولادی تحت بارگذاری ضربه‌ای، به ویژه از نظر مقاومت و ظرفیت تغییر شکل جوش‌ها پرداختند. این امر با توسعه یک روش تجربی برای آزمایش سازه‌های فولادی متشکل از جوش‌های گوشه‌ای انجام شد. بر اساس نتایج آنها، ظرفیت تغییر شکل نمونه‌های طولی با افزایش نرخ جابجایی به شدت کاهش می‌یابد. در مقابل، نرخ جابجایی به طور جزئی بر ظرفیت تغییر شکل نمونه‌های عرضی تأثیر می‌گذارد. همچنین بررسی سطح مقطع جوش‌های شکسته نشان داد که نمونه‌های طولی، تغییر شکل بیشتری را هنگام اعمال بار ضربه‌ای در مقایسه با بار شبه استاتیکی تجربه می‌کنند.

هو و همکاران [۱۲] رفتار دینامیکی تیرهای دارای اتصال جوش H شکل را تحت بارگذاری ضربه‌ای به صورت عددی و تجربی مطالعه نمودند. تأثیر عوامل مختلف از جمله انرژی ضربه و نسبت ضخامت به پهناي فلنج تیر بر نیروی ضربه، تغییر شکل و مودهای خرابی بررسی گردید. نتایج نشان

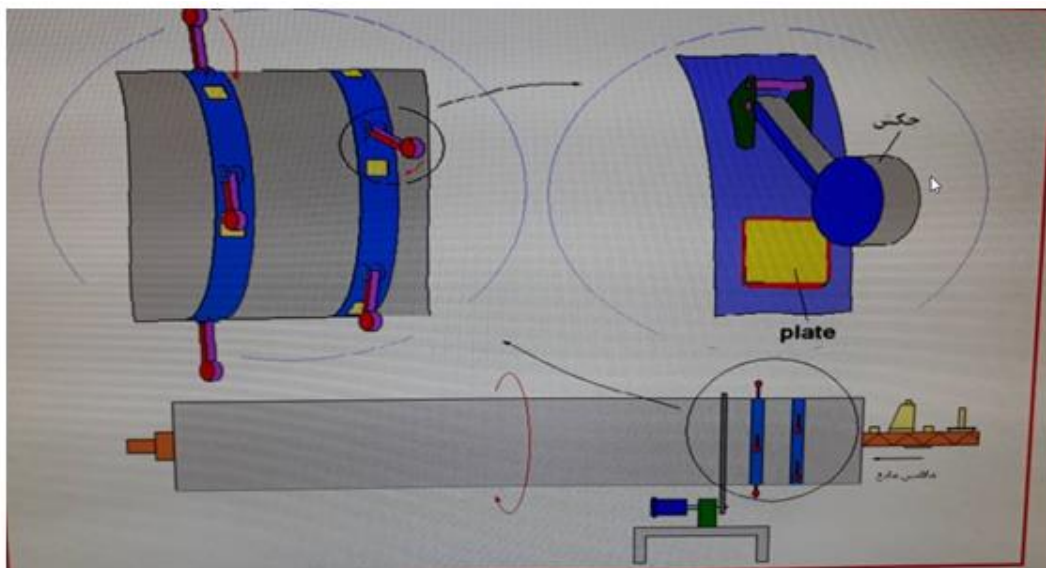
2 Rotary dryer
3 Radiation
4 Conduction

1 Fillet weld



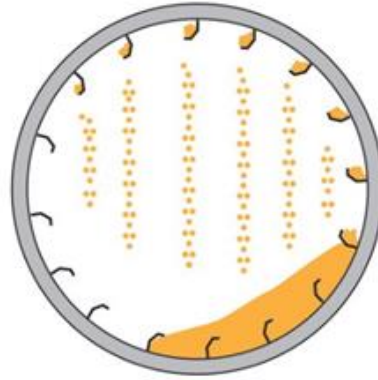
شکل ۱. شماتیک اجزای یک خشک کن حرارت غیرمستقیم دارای لوله های بخار

Fig. 1. Schematic of the indirect rotary dryer



شکل ۲. چکش های ثقیلی تعبیه شده بر بدنه خارجی خشک کن

Fig. 2. Schematic of hammer band on rotary dryer



شکل ۳. شماتیک عملکرد پروازنده به منظور پخش محصول درون خشک کن

Fig. 3. The effect of flight bars on product distribution



شکل ۴. نمای داخلی خشک کن و نحوه قرارگیری جوش ها و پروازنده

Fig. 4. The location of welding joints on the flight bars

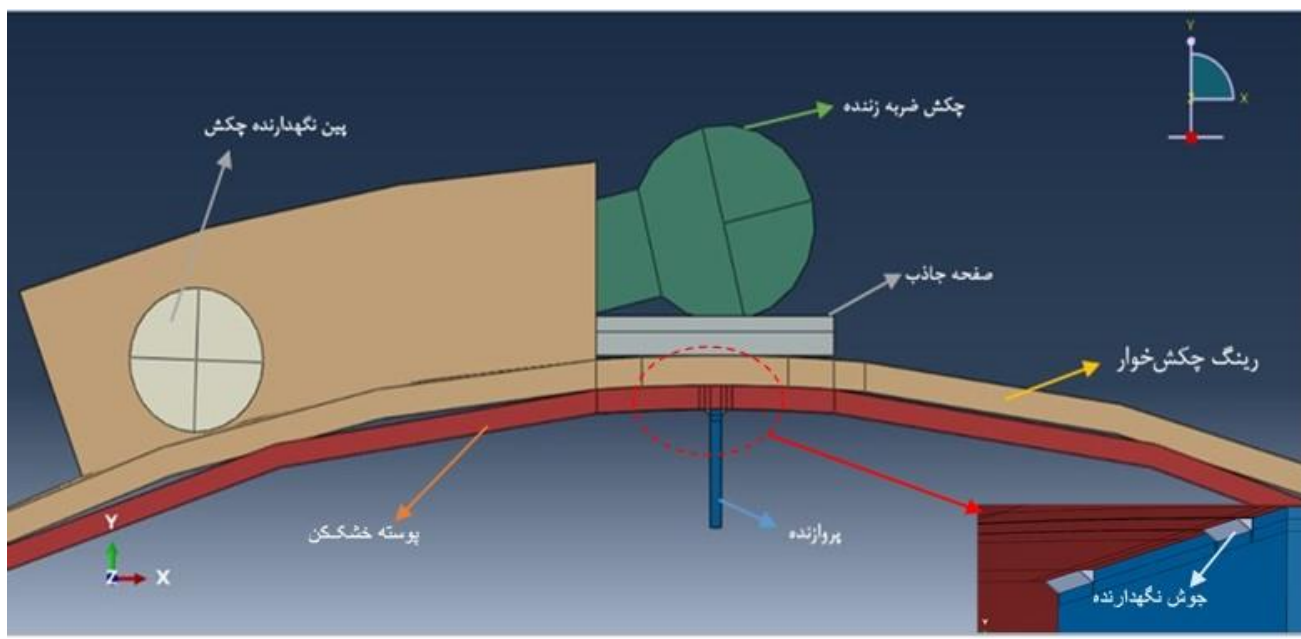
داخلی پوسته می گردد. جدایش پروازنده ها می تواند به طور مستقیم بر کیفیت محصول خروجی تأثیر بگذارد. اتصال پروازنده ها به پوسته توسط جوش آرگون^۲ به صورت سپری (دو طرفه) با ابعاد ۸۰×۳۳ میلی متر انجام می شود. از آنجا که پروازنده های نزدیک به محل اعمال ضربه چکش دچار جدایش می شوند بنابراین تنش های اعمالی ناشی از ضربه چکش می تواند عامل اصلی خرابی باشد. جدایش صفحات پروازنده باعث افزایش احتمال چسبندگی ملامین به پوسته، عدم پخش یکنواخت محصول، کاهش کیفیت محصول و راندمان خشک کن، ورود قطعات پروازنده به داخل محصول خروجی و تجهیزات گردنده بعد از خشک کن می شود. مورد اخیر می تواند باعث آسیب جدی به تجهیزات گردان و توقف خط تولید شود.

یک از لوله های بخار تعدادی صفحه طولی به نام پروازنده^۱ به پوسته اصلی جوش داده می شوند. وظیفه این صفحات جلوگیری از تماس فوری محصول مرطوب با سطح داغ لوله های بخار و پخش کردن محصول به صورت آبشاری است که به صورت شماتیک در شکل ۳ مشاهده می شود. به عبارت دیگر، صفحات پروازنده از گلوله شدن خمیر ملامین جلوگیری می کنند.

صفحات پروازنده همانند شکل ۴ در راستای طولی به سطح داخلی خشک کن جوش داده شده اند. با توجه به ضربات مکرر چکش های ثقیلی به پوسته بیرونی استوانه، تنش های نوسانی به اتصال جوش پروازنده منتقل می شود. با گذشت زمان پدیده خستگی و رشد ترک های میکروسکوپی منجر به جدایش جوش از محل اتصال و در نهایت کنده شدن پروازنده ها از سطح

2 Tungsten Inert Gas (TIG)

1 Flight bar



شکل ۵. مدل اجزای محدود مسأله مورد بررسی

Fig. 5. The finite element model of problem

جدول ۱. ابعاد هندسی هر یک از اجزای سیستم

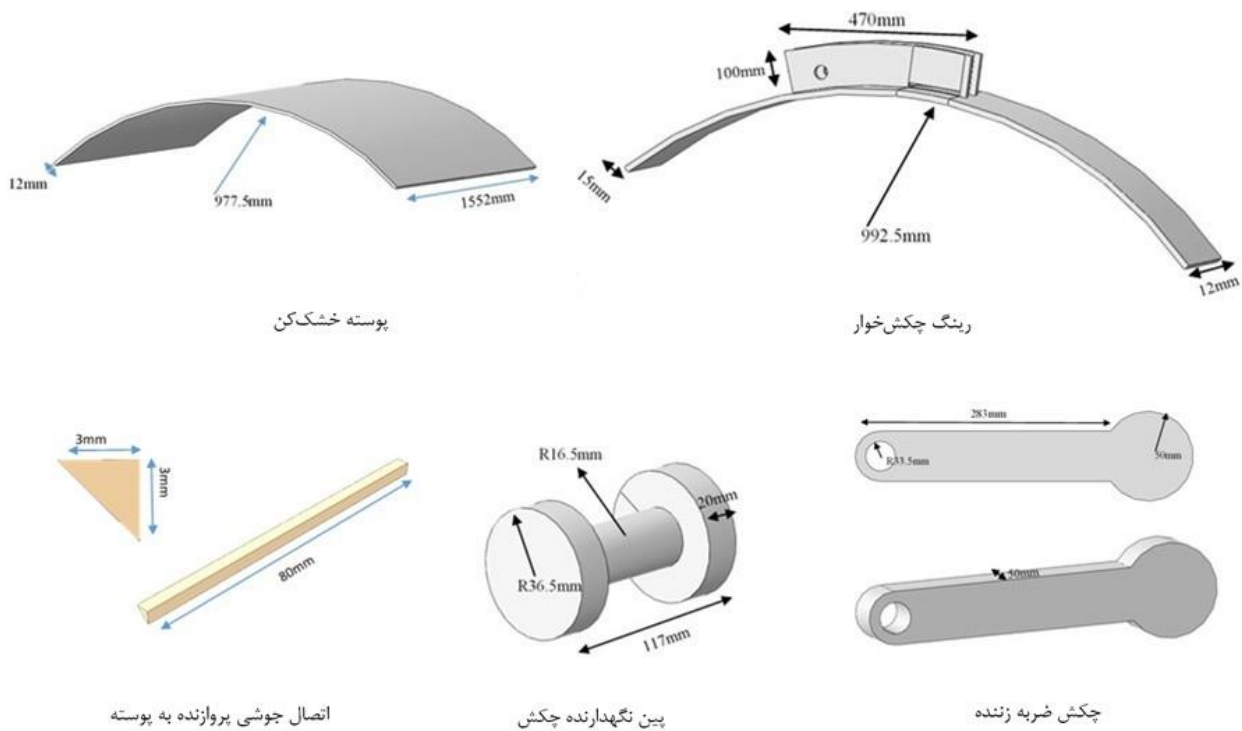
Table 1. Geometric dimensions of the finite element model components

ابعاد (میلی متر)	اجزای مدل
۱۰۰-۳۸۳-۵۰	چکش ضربه زننده (شعاع، طول، ضخامت)
۱۱۰-۱۳۰-۱۲	صفحه جاذب انرژی ضربه (طول، عرض، ضخامت)
۱۵-۲۳۰-۹۹۲/۵	رینگ چکش خوار (شعاع، طول، ضخامت)
۱۲-۱۵۵۲-۹۹۷/۵	خشک کن (شعاع، طول، ضخامت)
۶-۶۰-۵۱۶	پروازنده (طول، عرض، ضخامت)
۳-۳-۸۰	اتصال جوشی (طول، قاعده، ارتفاع)
۱۶/۵-۳۶/۵-۱۱۷	پین نگهدارنده چکش (طول، قطر خارجی، قطر داخلی)

۳- مدل سازی اجزای محدود

می باشد و در سطح داخلی پوسته خشک کن، صفحات پروازنده با استفاده از جوش سپری به مجموعه متصل می گردد. ابعاد هندسی اجزای سیستم در شکل ۶ به صورت شماتیک ارائه شده اند. همچنین ابعاد هندسی تمام اجزای مجموعه در جدول ۱ آمده است.

مدل اجزای محدود مسأله در نرم افزار تجاری آباکوس تهیه می شود که قسمت های تشکیل دهنده مجموعه در شکل ۵ ارائه شده است. مدل سازی شامل حلقه فولادی و چکش ضربه زننده در سطح خارجی پوسته خشک کن



شکل ۶. شماتیک هندسی هریک از اجزای سیستم

Fig. 6. Schematic of the finite element model components

جهت افزایش دقت مسأله از المان‌های با شبکه‌بندی ریز استفاده می‌شود و هر چه از نقاط با تمرکز تنش بالا دور می‌شویم اندازه المان‌ها جهت کاهش هزینه محاسباتی افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۷ شمایی کلی از شبکه‌بندی اجزای سیستم و در شکل ۸ نحوه شبکه‌بندی اتصال جوشی متصل به پروازنده و پوسته خشک‌کن مشاهده می‌شود.

خواص مکانیکی به هریک از اجزای مسأله براساس جدول ۳ اختصاص داده می‌شود. با توجه به اینکه سطح تنش‌های وارده به اتصال جوشی از حد الاستیک ماده فراتر می‌رود بنابراین خواص الاستو پلاستیک ماده مدنظر قرار می‌گیرد. بدین منظور رفتار الاستو پلاستیک جوش مطابق شکل ۹ بر اساس نتایج تجربی ارئه شده در مرجع [۱۴] مداسازی می‌گردد. همچنین برای سایر اجزای مدل، رفتار الاستو پلاستیک ماده همانند شکل ۱۰ در نظر گرفته شده است.

استخراج نتایج قابل اعتماد به کمک روش اجزای محدود نیازمند مدل‌سازی صحیح جزئیات مسأله از جمله خواص مواد، ابعاد هندسی، اعمال بارگذاری، شرایط مرزی و نحوه شبکه بندی مسأله می‌باشد. از دیدگاه شبکه بندی موارد زیر حائز اهمیت خواهد بود:

۱. دقت حل مسأله و هزینه محاسباتی با توجه به نوع و تعداد المان متغییر خواهد بود.
۲. به کارگیری المان‌های دارای اشکال با قاعده مناسب‌ترین نوع شبکه‌بندی است.
۳. در مناطقی که دارای حساسیت بیشتر و اهمیت بالا برای تحلیل می‌باشد باید از شبکه‌بندی ریزتری استفاده کرد.

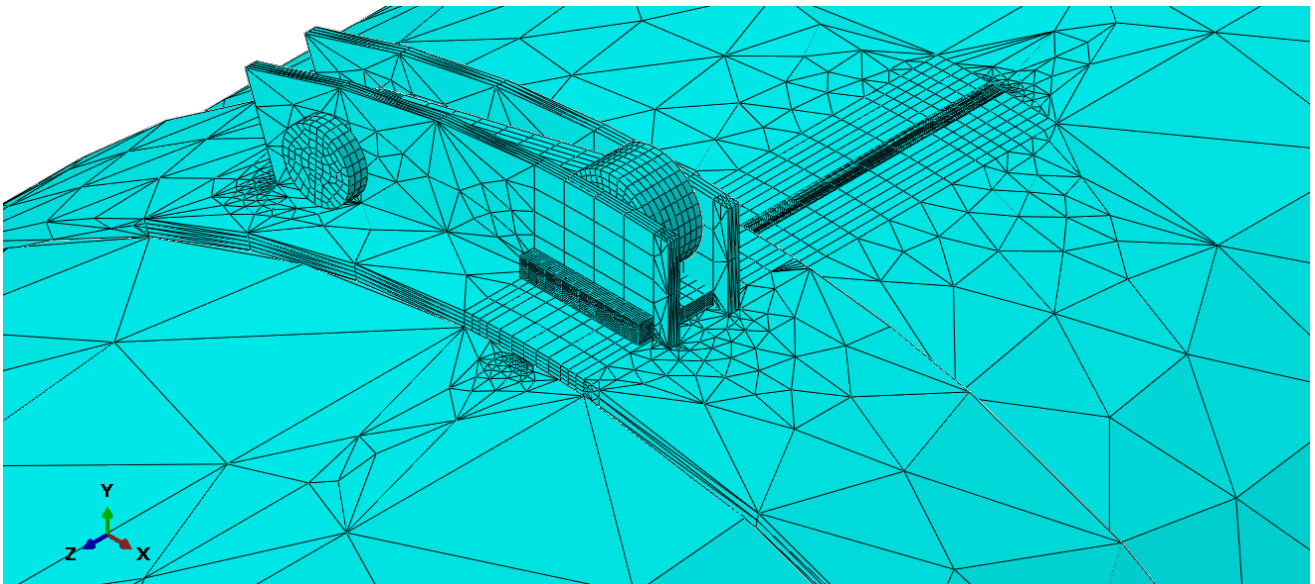
در این پژوهش از دو نوع المان چهار وجهی^۱ و هشت وجهی^۲ برای مدل‌سازی استفاده می‌شود که در جدول ۲ تعداد و نوع المان به کار رفته برای هر جزء آمده است. همانطور که گفته شد در مکان‌های دارای تمرکز تنش

1 C3D4
2 C3D8R

جدول ۲. تعداد و نوع المان به کار رفته در هر جزء

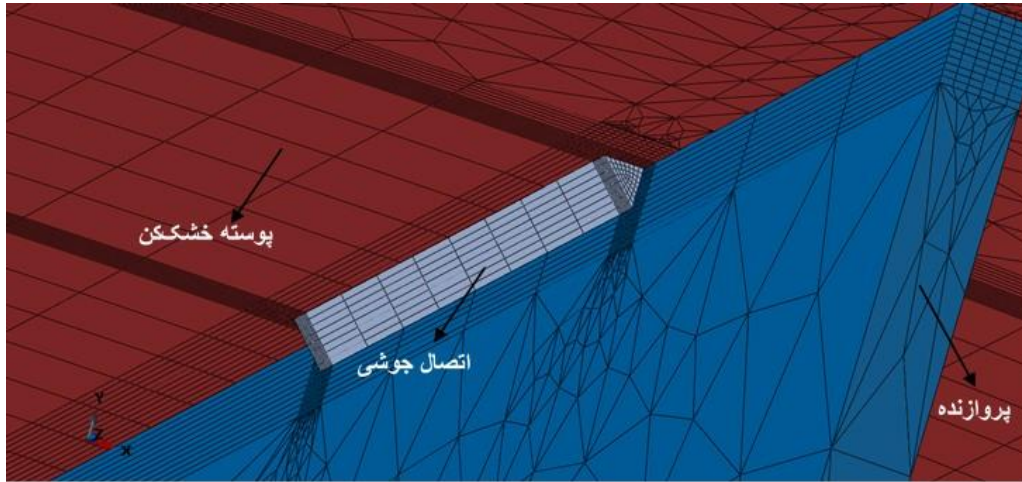
Table 2. Element types and numbers for each component

تعداد المان	تعداد گره	نوع المان هشت وجهی	نوع المان چهار وجهی	جزء
۵۱۲۰	۶۲۶۴	C۳D۸R	-	چکش ضربه زننده
۷۰۱۶	۱۰۵۱	C۳D۸R	-	پین نگهدارنده چکش
۶۰۷۷	۳۰۵۵	C۳D۸R	C۳D۴	رینگ چکش خوار
۳۴۳۰	۴۳۲۰	C۳D۸R	-	صفحه جاذب انرژی
۵۶۹۹۳	۴۳۱۹۱	C۳D۸R	C۳D۴	پوسته خشک کن
۱۳۴۲۲	۹۹۹۷	C۳D۸R	C۳D۴	پروازنده
۲۲۵۰	۲۸۲۱	C۳D۸R	-	اتصال جوشی



شکل ۷. شمای کلی شبکه بندی اجزای سیستم

Fig. 7. The mesh schematic of the system components



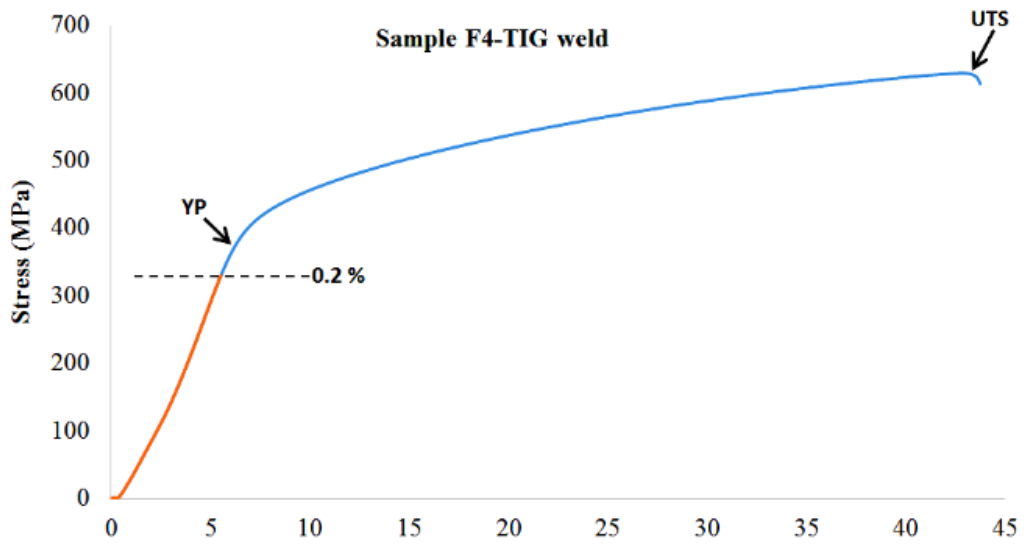
شکل ۸. نحوه شبکه‌بندی اتصال جوش

Fig. 8. The mesh detail for the welding joints

جدول ۳. خواص مکانیکی اختصاص داده شده به هر یک از اجزای مجموعه

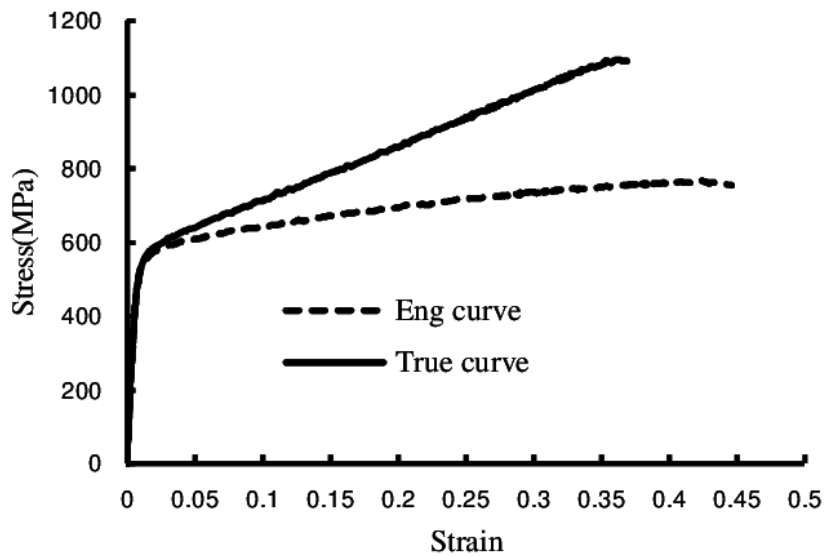
Table 3. The mechanical properties of each component

استحکام نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (kg/m ^۳)	نسبت پواسون	مدول (GPa) یانگ	ماده سازنده	جزء
۵۶۰	۲۷۵	۸۰۰۰	-۰/۲۹	۱۹۸	Fe ۴۳۰D-UNI	صفحه جاذب
۶۲۰	۲۶۰	۷۸۵۰	-۰/۲۹	۲۰۵	ASTM A ۵۱۶-۷۰	رینگ چکش خوار
۵۱۵	۲۷۵	۷۸۰۰	-۰/۳۳	۲۰۰	A۲۴۰-۳۰۴	پوسته خشک کن
۵۱۵	۲۷۵	۷۸۰۰	-۰/۳۳	۲۰۰	A۲۴۰-۳۰۴	پروازنده
۵۱۵	۲۷۵	۷۸۰۰	-۰/۳۳	۲۰۰	A۲۴۰-۳۰۴	پین نگهدارنده
۵۱۵	۲۷۵	۷۸۰۰	-۰/۳۳	۲۰۰	A۲۴۰-۳۰۴	پین نگهدارنده چکش
۶۹۰	۳۶۵	۷۸۰۰	-۰/۳۳	۲۰۰	TIG-welding type ۳۰۴	اتصال جوشی



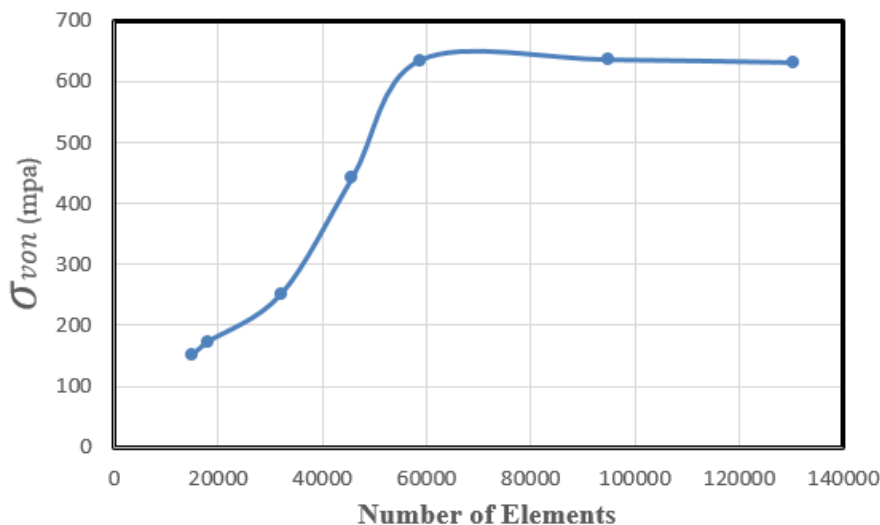
شکل ۹. رفتار تنش-کرنش مد نظر برای محاسبه خواص ماده جوش [۱۴]

Fig. 9. The elasto-plastic behavior of the weld material [14]



شکل ۱۰: نمودار تنش-کرنش برای فلز A240-304 [۱۵]

Fig. 10. The elasto-plastic behavior for A240-304 [15]



شکل ۱۱. نمودار تغییرات تنش ون مایسز برحسب تعداد کل المان‌های به کار رفته در شبکه‌بندی مساله

Fig. 11. Variation of maximum von Mises stress versus the total number of elements

در ناحیه اتصال جوش رخ می‌دهد لذا تعداد المان‌های به کار رفته در ناحیه مذکور طی چند مرحله افزایش می‌یابد. همان طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد اگر تعداد کل المان‌های مدل بیشتر از ۶۰۰۰۰ باشد آنگاه همگرایی قابل قبولی حاصل می‌آید.

۴- نتایج عددی

مدل‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که دلیل اصلی جدایش صفحات پروازنده (از محل اتصال جوش) ناشی از تنش‌های اعمالی توسط ضربه‌های چکش می‌باشد. از این رو در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود در قالب تعیین نقاط بحرانی و توزیع تنش ون مایسز ارائه می‌شود. همچنین در ادامه به بررسی تأثیر عوامل مختلف از جمله وجود نبشی، تغییر محل اتصال جوش، تغییر ابعاد و جنس صفحه جاذب بر حداکثر تنش ون مایسز پرداخته می‌شود.

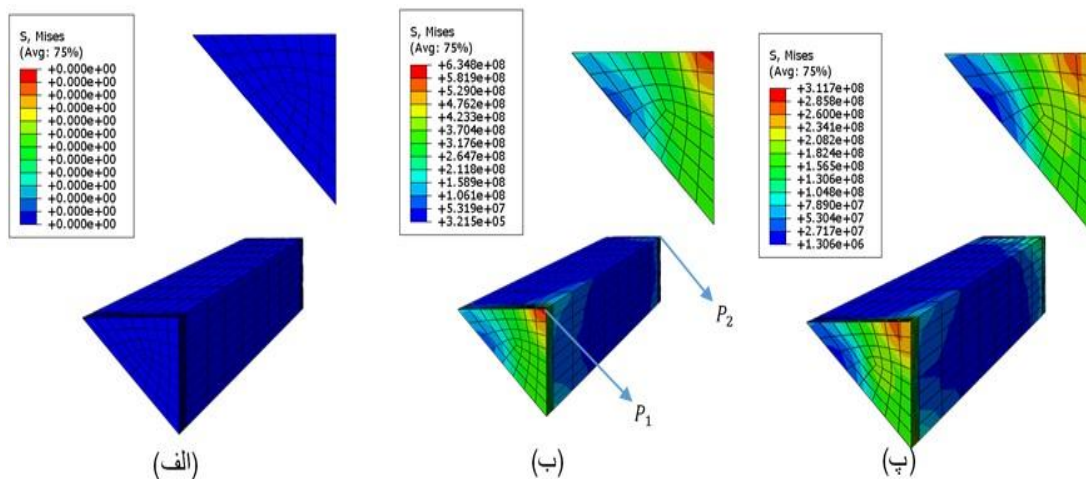
۴-۱- توزیع تنش در جوش

پس از اعمال سرعت به چکش، ضربه بر روی صفحه جاذب انجام و تا برگشت به محل اولیه، تنش‌های ایجاد شده در جوش محاسبه می‌شوند. تأثیر ضربه بر توزیع تنش ون مایسز اتصال جوش پروازنده در شکل ۱۲ برای نقاط ابتدایی و انتهایی جوش نشان داده شده است.

اندرکنش بین چکش ضربه زننده، صفحه جاذب، پین متصل به چکش و رینگ چکش‌خوار به صورت تماس عمودی^۱ بدون اصطکاک^۲ با استفاده از شرایط تماس صفحه به صفحه^۳ مدل‌سازی می‌شود. همچنین اتصالات جوشی بین پروازنده و پوسته با استفاده از قید گره‌زدن^۴ شبیه‌سازی می‌گردد. ضمناً اندرکنش بین رینگ چکش‌خوار و پوسته هم از نوع قید گره‌زدن می‌باشد. درجات آزادی لبه‌های طولی پوسته، رینگ چکش‌خوار و دو طرف صفحه جاذب با استفاده از قید اینکستر^۵ محدود می‌شود و چکش با سرعت زاویه‌ای ثابت ۹ رادیان بر ثانیه به صفحه جاذب برخورد می‌کند.

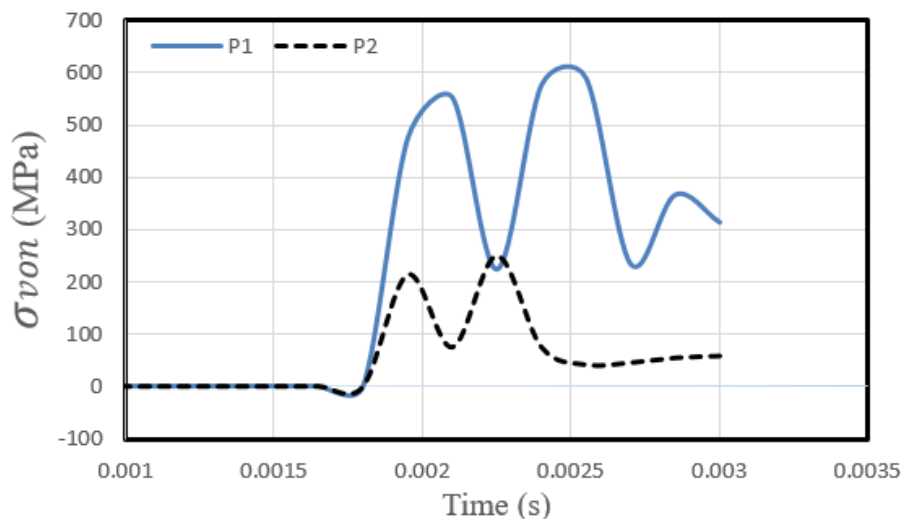
از تحلیل دینامیکی^۶ برخورد چکش با مجموعه خشک‌کن برای همگرایی نتایج در محیط نرم‌افزار استفاده شده است. یکی از پارامترهای مؤثر در همگرایی نتایج، ایجاد شبکه‌بندی متناسب با هندسه مسأله است. اگرچه افزایش تعداد المان‌ها می‌تواند دقت جواب را افزایش دهد ولیکن در مقابل هزینه‌های محاسباتی نیز بالا می‌رود. در مسأله اخیر، تغییرات مقدار ماکزیمم تنش ون مایسز در ناحیه اتصال جوش بر حسب تعداد کل المان‌های به کار رفته به عنوان معیار همگرایی جواب استفاده می‌شود. از آنجا که تمرکز تنش

- 1 Normal contact
- 2 Frictionless
- 3 Surface-to-Surface contact
- 4 Tie
- 5 Encafter
- 6 Daynamic explicit



شکل ۱۲. توزیع تنش ون مایسز برای نقاط ابتدایی و انتهایی جوش (P_1 و P_2)

Fig. 12. The von Mises stress distribution for the welding joint corner points (P_1 and P_2)

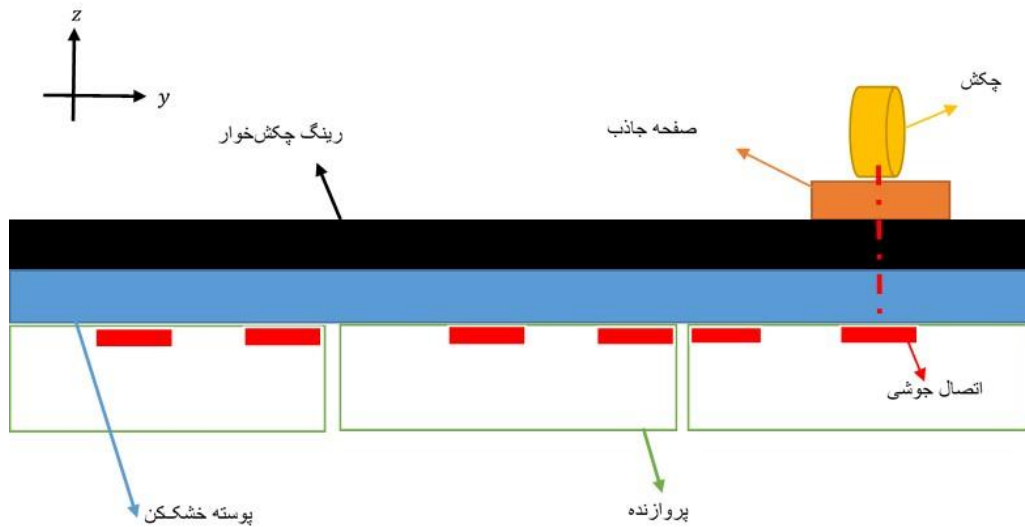


شکل ۱۳. تغییرات تنش ون مایسز بر حسب زمان در نقاط P_1 و P_2

Fig. 13. The vonMises stress distribution versus time increment for the points P_1 and P_2

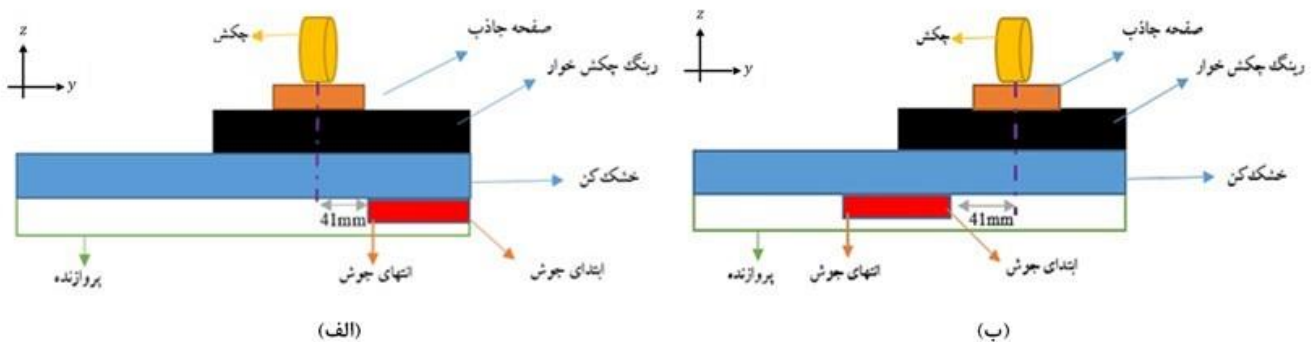
تغییرات تنش در نقاط مذکور به صورت تابعی از زمان تحلیل در شکل ۱۳ آمده است. حداکثر تنش ون مایسز در نقاط P_1 و P_2 به ترتیب حدود ۵۹۰ و ۳۴۰ مگاپاسکال خواهد بود بنابراین برای این نقاط مقدار تنش ون مایسز فراتر از تنش تسلیم ماده خواهد بود. بدین ترتیب وقوع کرنش پلاستیک و تشکیل ترک میکروسکوپی در این نقاط محتمل است. با اعمال ضربات مکرر چکش، ترکها به تدریج رشد می کنند و در نهایت کل اتصال جوش از پوسته خشک کن جدا می شود.

با توجه به توزیع تنش ون مایسز بیشترین تنش اعمالی در نقاط ابتدایی (P_1) و انتهایی (P_2) ریشه جوش تولید می گردد. شکل ۱۲ (الف)، (ب) و (پ) به ترتیب معرف وضعیت تنش قبل از برخورد چکش، انتهای فرآیند ضربه چکش و انتهای فرآیند تحلیل ضربه می باشد. همانطور که ملاحظه می شود قبل از برخورد چکش در شکل ۱۲ (الف) سطح تنشها صفر است. در ادامه با اعمال ضربه مقدار تنشها افزایش می یابد تا اینکه در انتهای فرآیند ضربه در شکل ۱۲ (ب) به حداکثر خود می رسد. با اتمام فرآیند ضربه و برگشت چکش به محل اولیه خود در شکل ۱۲ (پ) سطح تنشها به صفر میل می کند



شکل ۱۴. موقعیت طولی خط مرکزی جوش نسبت به مرکز ضربه چکش در مدل اولیه

Fig. 14. Longitudinal location of the welding joints with respect to the impact center



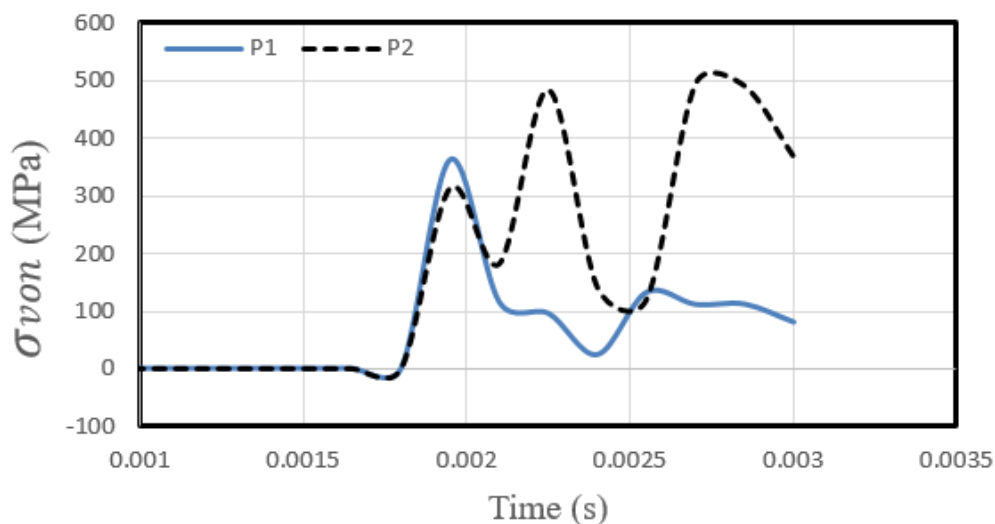
شکل ۱۵. (الف) تغییر موقعیت طولی جوش به سمت ابتدای پروازنده (ب) تغییر موقعیت طولی جوش به سمت انتهای پروازنده

Fig. 15. (a) Forward replacement (b) Backward replacement of the welded joint

شکل ۱۶ وضعیت تنش متناظر با تغییر فاصله طولی جوش متناظر با شکل ۱۵(الف) را ارائه می‌کند. نتایج حاکی از آن است که با جابجایی طولی جوش به ابتدای پروازنده مقدار حداکثر تنش ون مایسز در ابتدای جوش حدود ۱۸٪ نسبت به مدل اولیه کاهش می‌یابد. در مقابل جابجایی طولی جوش به انتهای پروازنده (شکل ۱۵(ب)) منجر به افزایش سطح تنش نسبت به مدل اولیه خواهد شد که نتایج حاکی از این تغییر در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

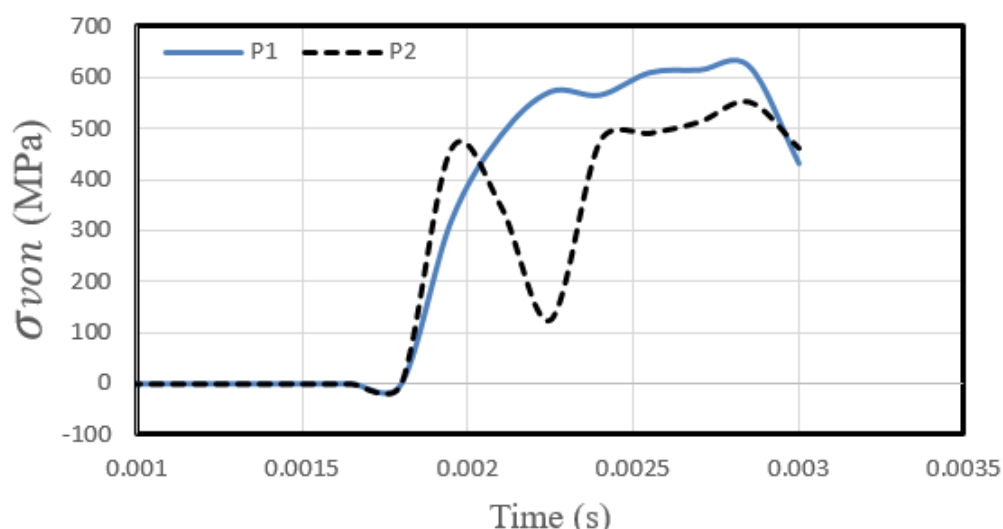
۴-۲- راهکارهای بهبود مقاومت اتصال جوش

تغییر موقعیت طولی اتصال جوش به عنوان یک عامل تأثیرگذار مورد بررسی قرار گرفت. در مدل اولیه خط مرکزی جوش همانند شکل ۱۴ منطبق بر نقطه ضربه چکش می‌باشد در ادامه، موقعیت طولی اتصال جوش نسبت به مرکز ضربه همانند شکل ۱۵ به سمت ابتدا و انتهای پروازنده حرکت داده شده می‌شود.



شکل ۱۶. تغییرات تنش بر حسب زمان برای تغییر فاصله جوش به سمت ابتدای پروازنده

Fig. 16. The von Mises stress distribution versus time increment for the forward replacement

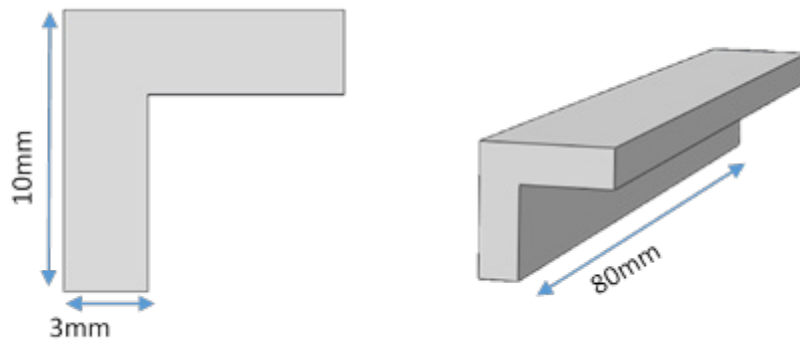


شکل ۱۷. تغییرات تنش بر حسب زمان برای تغییر فاصله جوش به انتهای پروازنده

Fig. 17. The von Mises stress distribution versus time increment for the backward replacement

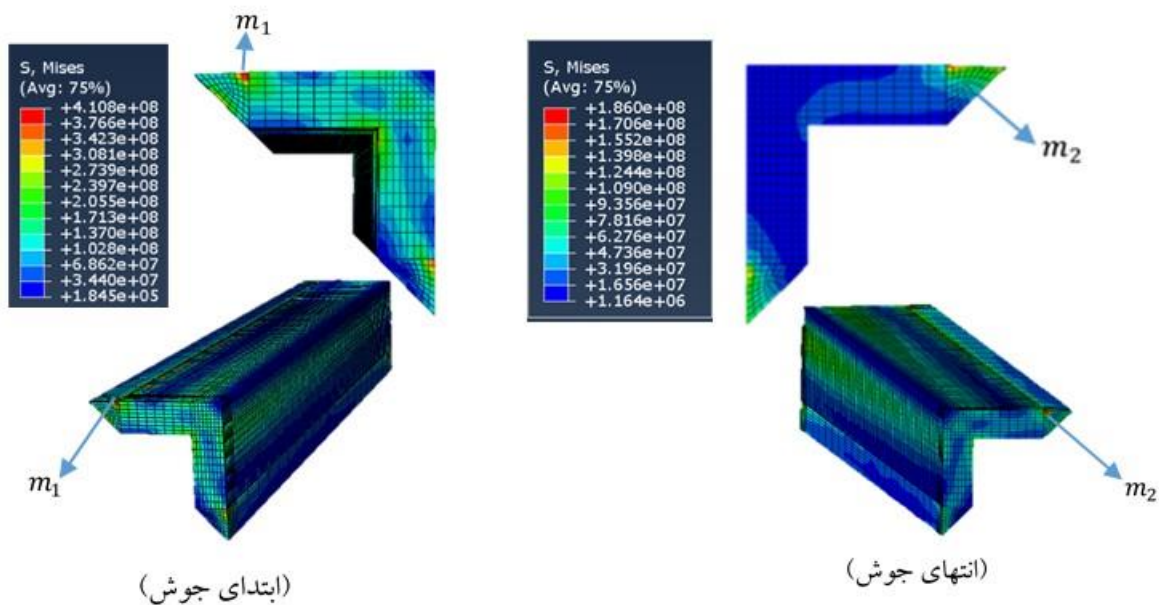
می‌گیرد که ابعاد هندسی آن در شکل ۱۸ آمده است. توزیع تنش ون‌مایسز برای اتصال نبشی در شکل ۱۹ آمده است و تمرکز تنش همانند مدل‌سازی اولیه در ریشه جوش می‌باشد. نقاط دارای حداکثر تنش ون‌مایسز با حروف m_1 و m_2 مشخص شده‌اند. نتایج حاکی از کاهش قابل توجه تنش در ریشه‌های جوش در صورت استفاده از نبشی است.

با توجه به نتایج بدست آمده در قسمت‌های قبل، یکی از روش‌های پیشنهادی برای کاهش سطح تنش اعمالی به اتصال جوش استفاده از نبشی تقویت کننده جهت اتصال پروازنده به پوسته می‌باشد. استفاده از نبشی موجب افزایش صلابت خمشی مجموعه و همچنین دور شدن ناحیه جوش از منطقه تأثیر ضربه چکش می‌شود. با توجه به کاهش تنش‌ها با تغییر موقعیت طولی جوش به سمت ابتدای پروازنده، نبشی تقویتی نیز در این ناحیه قرار



شکل ۱۸. ابعاد هندسی نبشی تقویت کننده

Fig. 18. The stiffening angle dimensions

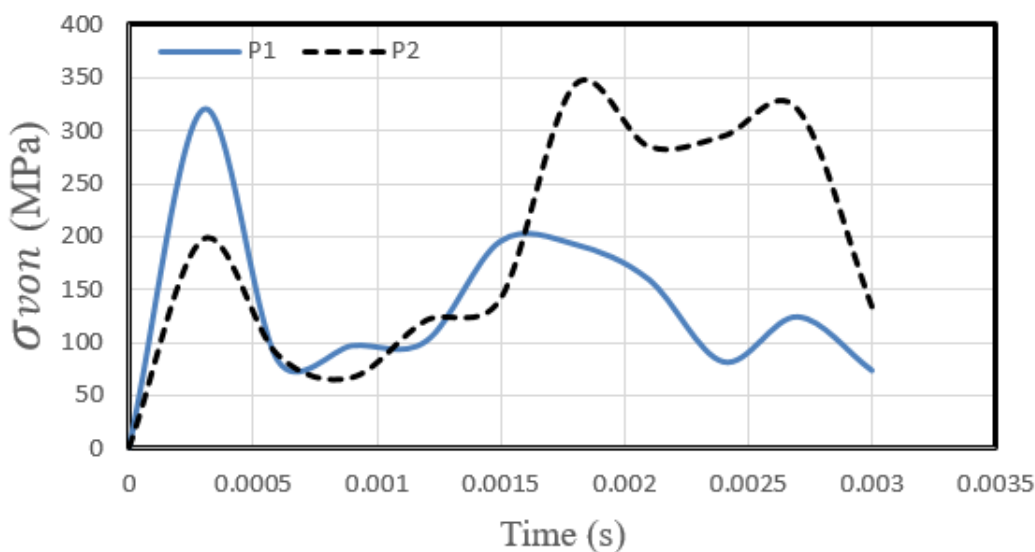


شکل ۱۹. توزیع تنش ون مایسز در اتصال نبشی

Fig. 19. The von Mises stress distribution for the stiffening angle

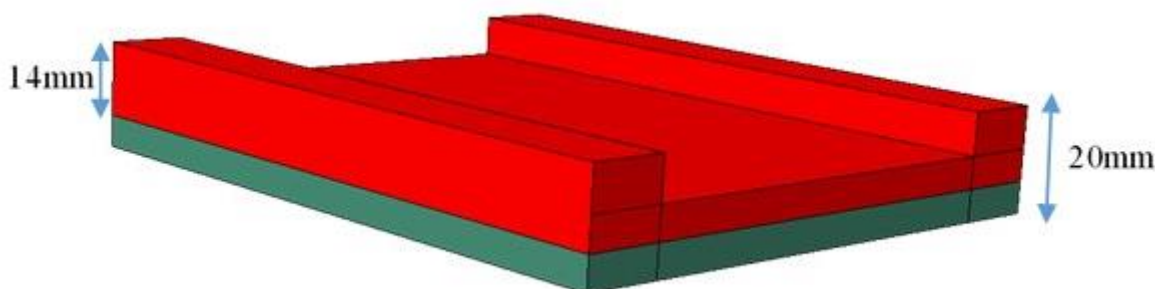
گام بعدی بررسی تأثیر تغییر ضخامت صفحه جاذب بر سطح تنش‌های اعمالی به جوش است لذا ضخامت صفحه جاذب از ۱۲ میلی‌متر به ۲۴ میلی‌متر افزایش یافت. بر اساس نتایج بدست آمده کاهش اندکی در مقدار تنش حدود ۴۰ تا ۷۰ مگاپاسکال ملاحظه گردید لذا افزایش ضخامت صفحه جاذب راه حل موثری نخواهد بود. به عنوان رویکرد دوم، فرض می‌شود همانند شکل ۲۱ یک صفحه جاذب دولایه متشکل از لایه بالایی با مشخصات SS-۳۰۴ و لایه زیرین Al-۶۰۶۱ با مشخصات

همچنین تغییرات تنش ون مایسز برای نقاط ابتدا و انتهای ریشه جوش اتصال نبشی در شکل ۲۰ آمده است. همان طور که ملاحظه می‌شود نسبت به مدل اولیه، حداکثر تنش ون مایسز در المان ریشه جوش از ۵۹۰ مگاپاسکال به ۳۴۰ مگاپاسکال می‌رسد. به عبارت دیگر، استفاده از نبشی تقویتی سطح تنش ماکزیمم را حدود ۴۳٪ کاهش می‌دهد. به همین دلیل استفاده از نبشی یکی از پیشنهادات مناسب جهت جلوگیری از جدایش مکرر پروازنده‌ها از محل قرارگیری خود می‌باشد.



شکل ۲۰. تأثیر نبشی تقویتی بر ماکزیمم تنش ون مایسز

Fig. 20. The effect of stiffening angle on the maximum von Mises stress



شکل ۲۱. صفحه جاذب دولایه

Fig. 21. Bi-layer absorbing pad

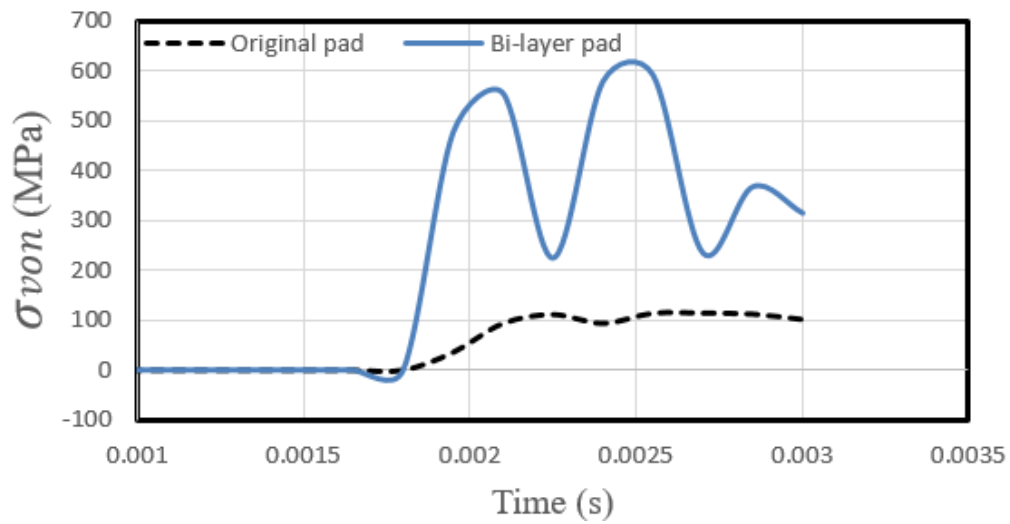
جوش بر ماکزیمم تنش به وجود آمده پرداخته می‌شود. در قدم اول طول^۱ جوش به میزان ۵۰٪ و سپس کلفتی^۲ جوش به مقدار ۵۰٪ درصد نسبت به حالت اولیه افزایش داده شد. نتایج بدست آمده در شکل ۲۳ حاکی از آن است که افزایش طول (L) و کلفتی (W) جوش به ترتیب موجب کاهش مقدار ماکزیمم تنش ون مایسز به میزان ۶٪ و ۱۴٪ نسبت به وضعیت اولیه خواهد شد.

-
- 1 Length (L)
 - 2 Leg (W)

Al-۶۰۶۱ باشد. لازم به ذکر است که خواص مکانیکی ماده در جدول ۴ آمده است.

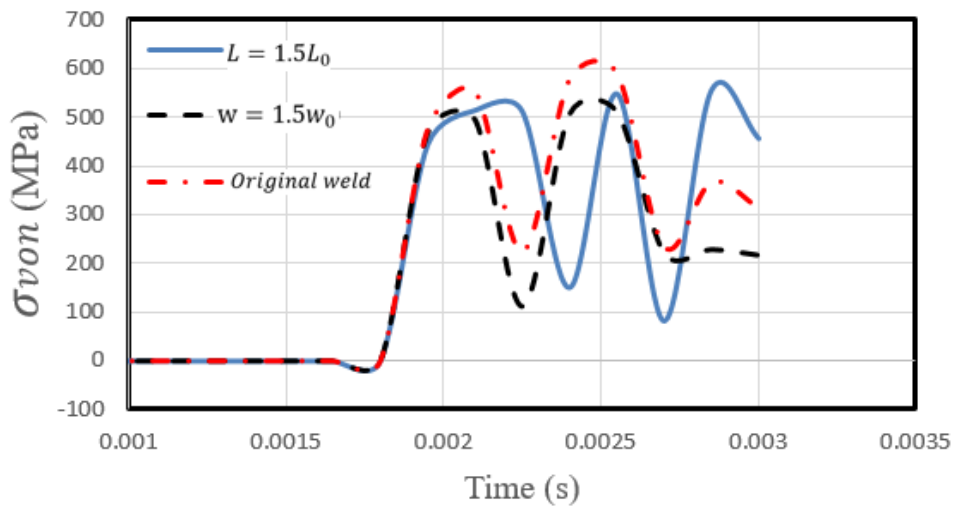
تغییرات تنش ون مایسز حاصل از به کارگیری صفحه جاذب مرکب در مقایسه با مدل اولیه مسأله در شکل ۲۲ آمده است. نتایج حاکی از آن است که سطح تنش ون مایسز در صورت استفاده از صفحه جاذب دولایه حدود ۸۰٪ نسبت به حالت اولیه کاهش می‌یابد.

در نهایت، به بررسی میزان تأثیر دو پارامتر هندسی طول و کلفتی اتصال



شکل ۲۲. تأثیر صفحه جاذب دولایه بر ماکزیمم تنش ون مایسز

Fig. 22. The effect of bi-layer absorbing pad on the maximum von Mises stress



شکل ۲۳. تأثیر اندازه طول و کلفتی اتصال جوش بر ماکزیمم تنش ون مایسز

Fig. 23. The effect of weld leg and length size on the maximum von Mises stress

جدول ۴. خواص مکانیکی Al-6061

Table 4. Mechanical properties of Al-6061

چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون	مدول یانگ (MPa)
۲۰۷۰	۰/۳۳	۷۰

۵- جمع بندی و پیشنهادات

در این مطالعه، پدیده خرابی اتصال جوش و جدایش پروازنده‌های یک خشک‌کن صنعتی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، میدان تنش حاصل از بارگذاری ضربه‌ای به کمک مدل‌سازی اجزای محدود در محیط نرم‌افزار استخراج گردید. مدل اجزای محدود مشتمل بر مکانیزم ضربه زننده، پوسته، پروازنده و اتصال جوشی آن می‌باشد. فرآیند برخورد چکش ثقیل در قالب ضربه با سرعت زاویه‌ای ثابت به صفحه جاذب مدل‌سازی شد. با توجه به نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی مشخص گردید که علت اصلی جدایش پروازنده، تنش‌های القا شده در اتصال جوش ناشی از ضربات چکش بر روی بدنه خارجی خشک‌کن می‌باشد. این ضربات منجر به تمرکز تنش و گسترش ترک‌های میکروسکوپی در ریشه اتصال جوش‌های پروازنده می‌گردد. به منظور کاهش تنش‌های ایجاد شده در مواضع تمرکز تنش، پیشنهادهایی به منظور بهبود مقاومت اتصال ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد تغییر موقعیت اتصال جوش به سمت ابتدای پروازنده و کاربرد نبشی تقویت کننده می‌تواند به ترتیب ۱۸٪ و ۴۳٪ سطح تنش ون‌میسز را کاهش دهد. علاوه بر این، افزایش ضخامت صفحه جاذب تأثیر محسوسی بر توزیع تنش اتصال جوش ندارد. در مقابل، تغییر ساختار صفحه جاذب به یک صفحه مرکب دولایه می‌تواند مقدار تمرکز تنش در اتصال جوش را به میزان ۸۰٪ کاهش دهد. به عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی می‌توان موارد زیر را مورد بررسی قرار داد:

- بررسی فرآیند رشد ترک در خط جوش به منظور تخمین عمر اتصال جوش پروازنده،
- تخمین حداقل بار ضربه‌ای لازم برای جدایش ملامین به منظور کاهش وزن چکش و باز طراحی صفحه جاذب،
- بررسی میزان تأثیر پوشش‌های نانویی نچسب به منظور کاهش بارگذاری ضربه‌ای.

منابع

- [1] B. Langrand, E. Markiewicz, Strain-rate dependence in spot welds: Non-linear behaviour and failure in pure and combined modes I/II, *International Journal of Impact Engineering*, 37(7) (2010) 792-805.
- [2] A. Tyas, J.A. Warren, E.P. Stoddart, J.B. Davison, S.J. Tait, Y. Huang, A Methodology for Combined Rotation-Extension Testing of Simple Steel Beam to Column Joints at High Rates of Loading, *Experimental Mechanics*, 52(8) (2012) 1097-1109.
- [3] H. Qu, J. Huo, C. Xu, F. Fu, Numerical studies on dynamic behavior of tubular T-joint subjected to impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 67 (2014) 12-26.
- [4] H. Qu, Y. Hu, J. Huo, Y. Liu, Y. Jiang, Experimental study on tubular K-joints under impact loadings, *Journal of Constructional Steel Research*, 112 (2015) 22-29.
- [5] J. Ribeiro, A. Santiago, C. Rigueiro, P. Barata, M. Veljkovic, Numerical assessment of T-stub component subjected to impact loading, *Engineering Structures*, 106 (2016) 450-460.
- [6] P. Cui, Y. Liu, F. Chen, J. Huo, Dynamic behaviour of square tubular T-joints under impact loadings, *Journal of Constructional Steel Research*, 143 (2018) 208-222.
- [7] T. Björk, A. Ahola, N. Tuominen, On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel, *Welding in the World*, 62(5) (2018) 985-995.
- [8] F.-F. Sun, M.-M. Ran, G.-Q. Li, Y.-B. Wang, Mechanical behavior of transverse fillet welded joints of high strength steel using digital image correlation techniques, *Journal*

- Catenary Action of Axially-restrained Steel Beam Under Impact Loading, Structures, 11 (2017) 84-96.
- [13] K. Chen, Y. Zhang, K.H. Tan, Behaviour of steel beam-column joints subjected to quasi-static and impact loads, Journal of Constructional Steel Research, 183 (2021).
- [14] E.O. Ogundimu, E.T. Akinlabi, M.F. Erinosh, Study on Microstructure and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Joints by Tig-Mig Hybrid Welding, Surface Review and Letters, 25(01) (2018).
- [15] K.K. M. Shariati, B. Jahangiri, A. Saber, Experimental study on ratcheting and softening behavior of stainless steel 304L thin-walled shells under cyclic pure bending load., Modares Mechanical Engineering, 16 (2016) 324-332. (In Persian)
- of Constructional Steel Research, 162 (2019).
- [9] T. Shiozaki, N. Yamaguchi, Y. Tamai, J. Hiramoto, K. Ogawa, Effect of weld toe geometry on fatigue life of lap fillet welded ultra-high strength steel joints, International Journal of Fatigue, 116 (2018) 409-420.
- [10] T. Skriko, T. Björk, T. Nykänen, Effects of weaving technique on the fatigue strength of transverse loaded fillet welds made of ultra-high-strength steel, Welding in the World, 58(3) (2014) 377-387.
- [11] E.L. Grimsmo, A.H. Clausen, M. Langseth, A. Aalberg, An experimental study of static and dynamic behaviour of bolted end-plate joints of steel, International Journal of Impact Engineering, 85 (2015) 132-145.
- [12] J. Huo, J. Zhang, Y. Liu, F. Fu, Dynamic Behaviour and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

I. Bari, Y. Alinia, Impact Stress Analysis for the Welding Joint in a Rotary Dryer, Amirkabir J. Mech Eng., 54(12) (2023) 2843-2860.

DOI: 10.22060/mej.2023.21657.7488

