

## بررسی تجربی اثر پارامترهای جوشکاری صفحه داغ بر چقرمگی شکست و استحکام کششی درز جوش قطعات ترموپلاستیکی

امیر هوشمندپور<sup>۱</sup> سیدعبدالمحمد رضاوند<sup>۲\*</sup> مهدی نظری مرویان<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: rezavand@iaud.ac.ir

### چکیده

هدف این تحقیق، بررسی استحکام کششی و چقرمگی شکست قطعاتی از جنس پلی اتیلن چگالی بالا است که در دما، فشار و زمان های مختلف و با روش جوشکاری صفحه داغ به یکدیگر جوشکاری شده اند. نمونه های استاندارد طبق استاندارد به کمک دستگاه برش لیزر از نمونه های جوش داده شده جدا شده اند و نمودار تنش - کرنش توسط دستگاه کشش تهیه شده است. حداکثر استحکام کششی و چقرمگی شکست از نمودارهای حاصل استخراج شده اند. نتایج نشان می دهد که استحکام کششی قطعات جوشکاری شده کمتر و چقرمگی شکست آنها بیشتر از قطعات جوشکاری نشده است. همچنین با افزایش زمان و دمای نگهداری، استحکام کششی و چقرمگی شکست بیشتر شده است ولی افزایش فشار باعث خروج ماده ذوب شده پرکننده بین درز جوش دو قطعه و ریزش ماده نرم شده در لبه های قطعه شده است که موجب کاهش استحکام کششی و چقرمگی شکست درز جوش می شود.

**واژه های کلیدی:** جوشکاری صفحه داغ ترموپلاستیک، پلی اتیلن چگالی بالا، استحکام کششی، چقرمگی شکست.

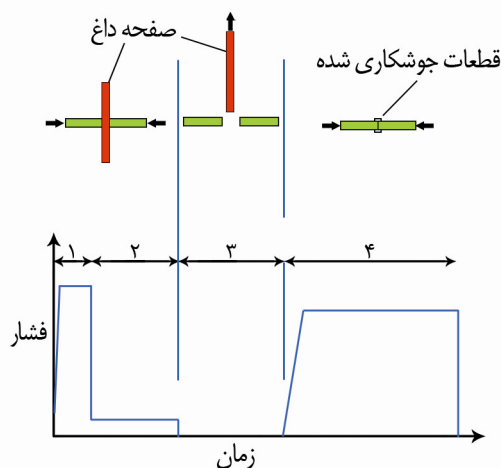
۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

۲- استادیار، دانشکده تحصیلات تکمیلی، گروه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

۳- مربی، دانشکده مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع).

## ۱- مقدمه

قطعات مختلف ترموپلاستیکی از روشهایی مانند قالبگیری تزریقی، اکستروژن، قالبگیری بادی، شکل دهی گرمایی و روشهای دیگر قابل تولیدند. انتخاب روش مناسب برای ساخت، به عوامل مختلف مانند هندسه قطعه، جنس، خواص مورد انتظار و امکانات موجود بستگی دارد. در صورت پیچیده بودن شکل هندسی قطعه، قالبهای مورد نیاز برای نصب بر روی دستگاه و تولید قطعات پیچیده، گران قیمت یا سنگین خواهند شد. یکی از راه حل های موجود، تقسیم بندی شکل هندسی قطعه به قطعات ساده تر، تولید آنها با هزینه کمتر و استفاده از روش جوشکاری پلاستیک ها جهت متصل و یکپارچه نمودن قطعات است. روش های متنوعی برای جوشکاری ترموپلاستیک ها بر اساس اشکال و نوع ترموپلاستیک وجود دارند که یکی از آنها جوشکاری صفحه داغ است که به دلیل سادگی و ارزان بودن از روش های پر کاربرد جوشکاری ترموپلاستیک ها است [۲۰]. مراحل انجام این جوشکاری در شکل (۱) نشان داده شده است [۳-۵].



شکل (۱) مراحل انجام جوشکاری صفحه داغ [۲].

در مرحله گرم اول، قطعات به صفحه داغ متصل شده و با در نظر گرفتن زمان مناسب، لایه ذوب لازم برای اتصال

ایجاد می شود. پدیده انجام شده در این مرحله انتقال گرما و جریان ذوب است. سپس قطعات از صفحه داغ جدا شده و با فشار مشخص به یکدیگر فشرده می شوند. با نگهداری فشار در زمان مشخص و سرد شدن قطعات، اتصال مورد نظر ایجاد می شود [۶]. بسیاری از محققان عوامل تأثیر گذار بر استحکام اتصالات جوش صفحه داغ را مورد بررسی قرار داده اند. باکنل [۷] نشان داد که چگونه جابه جایی جوش، مدت زمان گرمایش و دمای صفحه داغ باعث افزایش استحکام کششی و نقطه تسلیم اتصال می شود. پوتنه [۸] روشی با بازده بهبود یافته را به وسیله جوش صفحه داغ با دمای بسیار بالا پیشنهاد داد. جان [۹] و لیاشنکو [۱۰] جوش صفحه داغ را در دمای پایین و محدود مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که دمای پایین باعث کاهش استحکام مکانیکی درز جوش می شود.

پویات و همکارانش [۱۱] آزمایشهایی بر روی فرایند بهینه سازی جوشکاری صفحه داغ قطعات پلی اتیلنی انجام دادند. در این آزمایشها به بررسی پارامترهای بهینه از جمله میزان فرورفتگی دو قطعه، ضخامت لایه مذاب و نسبت فشردگی به خروج (مقدار نیروی وارده به میزان خروج ماده نرم شده در لبه) در فشار ثابت که از پارامترهای کنترل جوشکاری صفحه داغ است، پرداخته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ماکزیمم استحکام درز جوش ممکن است تا به استحکام مواد بدون درز جوش برسد. حداقل ضخامت مناسب لایه مذاب در هر دو طرف  $2/5 \text{ mm}$ ، حداقل جابه جایی جوشکاری از هر دو طرف  $0/7 \text{ mm}$  و نسبت فشردگی به خروج برای یک جوش با کیفیت بالا  $0/3$  است.

همچنین یانچن و همکارانش [۱۲] آزمایشاتی بر روی دو نمونه پلی پروپیلن خالص و پلی پروپیلن پر شده با تالک انجام دادند. در این روش از پارامترهایی همچون جابه جایی جوشکاری، ضخامت لایه مذاب و نسبت بین جابه جایی و ضخامت لایه مذاب در یک فشار ثابت برای کنترل جوشکاری استفاده شده است. نتایج این آزمایشها نشان داد که ماکزیمم

## ۲- مواد و روشها

در ادامه مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و روش آزمایش توضیح داده می‌شود.

### ۲-۱- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام عملیات جوشکاری ابتدا یک ورق پلی‌اتیلنی با مشخصات فنی جدول (۱) به ابعاد  $20 \times 10 \times 3$  متر توسط دستگاه برش به ۸۱ نمونه به ابعاد  $20 \times 10 \times 3$  سانتی‌متری بریده شد. به منظور اطمینان از عدم تأثیر منفی بر روی منطقه جوش داده‌شده و برای جلوگیری از خم شدن نمونه‌ها در اثر فشار دستگاه جوش صفحه داغ و بالا بردن دقت و همراستایی، در تمامی سطوح برش خورده از فیبرهای چوبی فشرده در بین پلیمرها استفاده شده است.

جدول (۱) مشخصات مکانیکی پلی‌اتیلن چگالی بالا [۲].

پارامتر	مقدار
چگالی	$0.92 \text{ g/cm}^3$
مدول یانگ	$258 \text{ MPa}$
استحکام کششی	$18 \text{ MPa}$
حد تسلیم	$14 \text{ MPa}$
دمای ذوب	$90^\circ \text{C}$
سختی	$40 \text{ Vickers}$
مقاومت به ضربه	$74 \text{ J/m}$
ضریب انبساط حرارتی	$0.0002 \text{ (Cm/Cm}^\circ\text{C)}$

در این روش سه نمونه بریده شده در بین ۴ فیبر چوبی به ابعاد  $10 \times 9 \times 3$  سانتی‌متری قرار داده شد و توسط چسب و اعمال فشار، اتصال موقتی ایجاد شد. سپس تمامی نمونه‌ها از وسط بریده شده، و پس از کدگذاری آماده جوشکاری می‌شوند. شکل (۲) یک مجموعه از قطعات و فیبرها را نشان می‌دهد.

استحکام برای پلی‌پروپیلن پر شده با ۰٪ تا ۴۰٪ پرکننده تالک به ترتیب برابر ۹۷٪ و ۵۴٪ استحکام مواد است.

اولیور و همکارانش [۱۳] به بررسی استحکام مکانیکی دو نوع پلی‌پروپیلن با ۲۰٪ تقویت کننده با مونومتریال<sup>۱</sup> و بیمتریال<sup>۲</sup> که با روش قالبگیری تزریقی تهیه شده بودند، پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که مواد تقویت کننده باعث افزایش استحکام کششی پلی‌پروپیلن، کاهش استحکام کششی و نقطه تسلیم در جوشکاری صفحه داغ می‌شود. همچنین استحکام مکانیکی پلی‌پروپیلن بیمتریال از مونومتریال بیشتر است.

کاگان [۱۴] آزمایشهایی در مورد تأثیر تقویت کننده‌ها بر استحکام کششی قطعات جوش داده شده و بدون درز جوش جوشکاری شده به روش صفحه داغ، در قطعاتی از جنس پلی‌آمید که به روش قالبگیری تزریقی تهیه شده بودند، انجام داد. نتایج به دست آمده نشان داد که تقویت کننده‌ها باعث افزایش استحکام کششی پلاستیک می‌شوند، ولی استحکام کششی درز جوش به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

مختارزاده و آوراها [۱۵] به بررسی استحکام کششی محل جوش در جوشکاری صفحه داغ ماده نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن با درصد‌های مختلف نانورس<sup>۳</sup> پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از درصد‌های مختلف ۰٪، ۳٪ و ۶٪ نانورس باعث کاهش استحکام درز جوش به ترتیب برابر ۹۴٪، ۷۹٪ و ۶۲٪ می‌شود.

خواص مکانیکی قطعه جوش داده شده متأثر از پارامترهای فرآیند بوده و برای تولید قطعات مناسب، اثر این پارامترها باید به درستی شناخته شوند. هدف این تحقیق بررسی تجربی اثر پارامترهای جوشکاری صفحه داغ بر خواص مکانیکی درز جوش قطعات ترموپلاستیکی است.

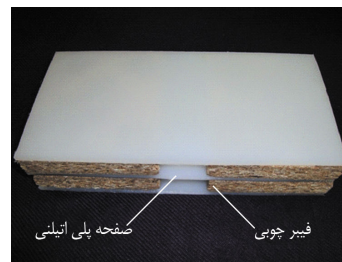
۱- GRPP

۲- PP/GRPP

۳- Nanoclay

جدول (۳) شماره گذاری قطعات براساس پارامترهای متغیر.

شماره	فشار نگهداری (psi)	دمای صفحه داغ (°C)	زمان نگهداری (s)
۱	۲۰	۱۸۰	۱۵
۲	۲۰	۱۸۰	۳۰
۳	۲۰	۱۸۰	۴۵
۴	۲۰	۲۰۵	۱۵
۵	۲۰	۲۰۵	۳۰
۶	۲۰	۲۰۵	۴۵
۷	۲۰	۲۳۰	۱۵
۸	۲۰	۲۳۰	۳۰
۹	۲۰	۲۳۰	۴۵
۱۰	۲۴	۱۸۰	۱۵
۱۱	۲۴	۱۸۰	۳۰
۱۲	۲۴	۱۸۰	۴۵
۱۳	۲۴	۲۰۵	۱۵
۱۴	۲۴	۲۰۵	۳۰
۱۵	۲۴	۲۰۵	۴۵
۱۶	۲۴	۲۳۰	۱۵
۱۷	۲۴	۲۳۰	۳۰
۱۸	۲۴	۲۳۰	۴۵
۱۹	۲۸	۱۸۰	۱۵
۲۰	۲۸	۱۸۰	۳۰
۲۱	۲۸	۱۸۰	۴۵
۲۲	۲۸	۲۰۵	۱۵
۲۳	۲۸	۲۰۵	۳۰
۲۴	۲۸	۲۰۵	۴۵
۲۵	۲۸	۲۳۰	۱۵
۲۶	۲۸	۲۳۰	۳۰
۲۷	۲۸	۲۳۰	۴۵



شکل (۲) نمونه‌هایی از پلیمرهای چسب شده بین فیبرهای چوبی.

## ۲-۲- جوشکاری نمونه‌ها

نمونه‌های آماده شده در شرایط مختلف دما، فشار و زمان نگهداری، طبق شرایط جدول (۲) توسط دستگاه جوش صفحه داغ<sup>۱</sup> جوشکاری شدند.

جدول (۲) پارامترهای متغیر در سطوح مختلف.

فشار نگهداری (psi)	دمای صفحه داغ (°C)	زمان نگهداری (s)
۲۰	۱۸۰	۱۵
۲۴	۲۰۵	۳۰
۲۸	۲۳۰	۴۵

جدول (۳) نحوه شماره گذاری قطعات براساس پارامترهای متغیر تعریف شده را نشان می‌دهد. به منظور کاهش خطاهای احتمالی، حداقل سه قطعه در هر کدام از شرایط جوشکاری شدند. در مجموع در این آزمایش ۸۱ نمونه به یکدیگر جوش داده شده‌اند (در ۲۷ بار جوشکاری هر بار ۳ قطعه به هم جوشکاری شده‌اند).

در هنگام جوشکاری، دو قطعه روی صفحه فلزی دستگاه قرار داده شدند. پس از اطمینان از هم راستایی، توسط جک‌های دستگاه، نمونه‌ها در محل خود تثبیت شدند. با تنظیم پارامترهای متغیر فرایند مطابق جدول (۳)، عملیات جوشکاری شروع شد. دو نمونه توسط فک‌های عرضی دستگاه به سمت صفحه داغ هدایت شد و به مدت زمان مشخص با آن در تماس قرار گرفت. در ادامه قطعات از صفحه داغ جدا شده و با خارج شدن صفحه داغ از بین دو قطعه، قطعات در مدت زمان و فشار مشخص به یکدیگر فشرده شدند. پس از سرد شدن، اتصال موردنظر بین دو قطعه ایجاد شد.

## ۲-۳- انجام آزمایش استحکام کششی و چقرمگی شکست

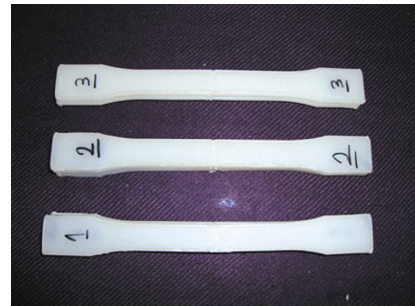
پس از اتمام عملیات جوشکاری، نمونه‌های جوش خورده از فیبرهای چوبی جدا شدند و پلیسه‌های اضافی آنها توسط دستگاه پلیسه بر جدا شد. نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM-D638-I ساخته شدند. این نمونه‌های دمبلی شکل توسط دستگاه برش لیزر از قطعات جدا شدند و در دستگاه آزمایش کشش قرار گرفتند. شکل‌های (۳) و (۴)

جدول (۴) نتایج استحکام کششی و چقرمگی شکست.

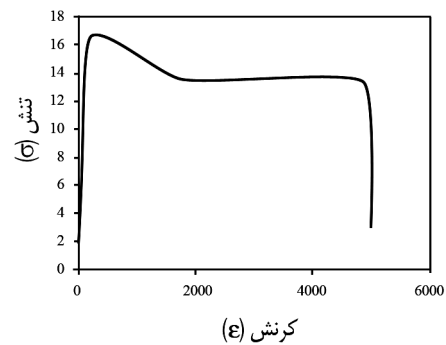
شماره	استحکام کششی (MPa)	چقرمگی شکست (J/m <sup>3</sup> )
۱	۳٫۷	۱۲۸۲۰٫۵
۲	۱۰٫۹	۴۸۷۱۷۹٫۵
۳	۱۱٫۶	۶۲۸۲۰۵٫۱
۴	۱۳٫۵	۳۰۷۶۹۲٫۳
۵	۱۵٫۲	۴۶۶۶۶۶٫۶
۶	۱۶٫۸	۱۳۹۷۴۳۵٫۸
۷	۱۶٫۲	۵۵۳۸۴۶٫۱
۸	۱۶٫۶	۷۶۶۶۶۶٫۶
۹	۱۷	۱۹۸۲۰۵۱٫۲
۱۰	۲٫۳	۱۵۳۸۴٫۶
۱۱	۶٫۷	۴۳۵۸۹٫۷
۱۲	۱۰٫۳	۶۴۱۰۲٫۵
۱۳	۸٫۷	۱۳۵۸۹۷٫۴
۱۴	۸٫۹	۱۵۶۴۱۰٫۲
۱۵	۱۴٫۷	۲۱۷۹۴۸٫۷
۱۶	۱۳٫۶	۱۲۵۶۴۱
۱۷	۱۴٫۸	۱۴۸۷۱۷٫۹
۱۸	۱۵٫۴	۲۵۳۸۴۶٫۱
۱۹	۲٫۲	۱۵۳۸۴٫۶
۲۰	۴٫۹	۴۳۵۸۹٫۷
۲۱	۵٫۶	۴۱۰۲۵٫۶
۲۲	۶٫۳	۲۵۶۴۱
۲۳	۷٫۴	۴۶۱۵۳٫۸
۲۴	۷٫۹	۴۸۷۱۷٫۹
۲۵	۸٫۳	۱۲۸۲۰٫۵
۲۶	۱۲٫۶	۴۱۰۲۵٫۶
۲۷	۱۳٫۸	۴۶۱۵۳٫۸
جوشکاری نشده	۱۷٫۵	۴۴۱۰۲۵٫۶

با مقایسه نمونه‌های جوشکاری شده و جوشکاری نشده مشاهده شد که در قطعه شماره ۹، اختلاف بین استحکام کششی دو نمونه جوشکاری شده و جوشکاری نشده کم است ولی اختلاف چقرمگی شکست بین این دو نمونه زیاد است. اتصال این قطعه به صورت دائمی و غیر قابل نفوذ انجام گرفته است، به طوری که در هنگام تست از خط جوش پاره نشد.

به ترتیب نمونه‌های استاندارد تست کشش را بعد از برش و نمونه‌ای از نمودار تنش - کرنش قطعات را نشان می‌دهند.



شکل (۳) نمونه استاندارد تست کشش ASTM-D638-I.



شکل (۴) نمودار تنش - کرنش نمونه شماره ۹.

برای صاف کردن لبه‌های قطعات و جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش، تمامی نمونه‌ها توسط سمباده نرم ۱۲۰۰ صاف و صیقلی شده‌اند.

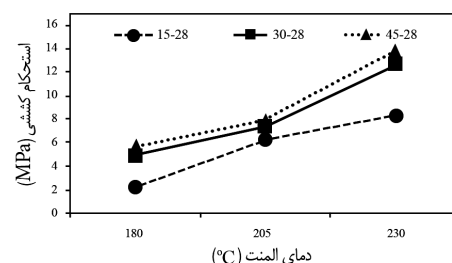
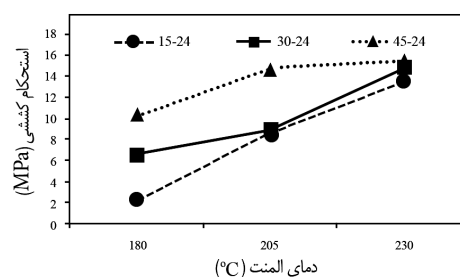
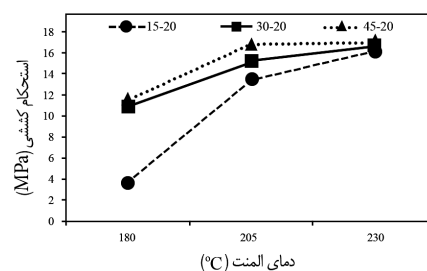
آزمایش کشش قطعات توسط دستگاه کوننگ مدل (۷۰۰۰ AI - LA ۱۰ Ton) و با نرخ ۵ mm/min انجام شد. نمودار تنش - کرنش نمونه‌ها در شرایط مختلف ثبت شده و با استفاده از این نمودارها، مقادیر استحکام کششی، کرنش در لحظه شکست و چقرمگی شکست (سطح زیر نمودار منحنی تنش - کرنش تا لحظه شکست) تعیین شد.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که استحکام درز جوش در فرایند جوشکاری صفحه داغ به هر سه پارامتر دما، فشار و زمان نگهداری بستگی دارد. میزان حداکثر استحکام کششی و چقرمگی شکست قطعات در جدول (۴) نشان داده شده است.

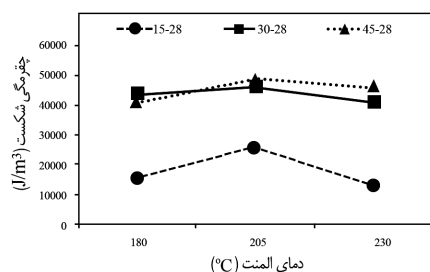
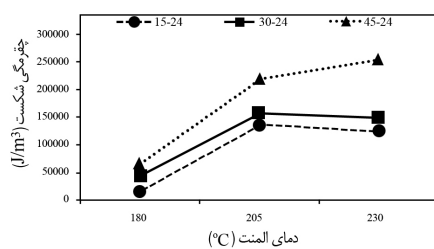
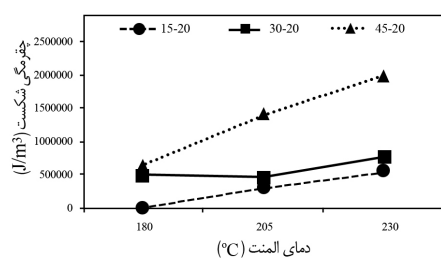
## ۳-۱- اثر دمای صفحه داغ

تأثیر دمای المنت بر استحکام کششی و چقرمگی شکست درز جوش، در فشارها و زمان‌های نگهداری متفاوت در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند. برای وضوح بهتر، نتایج در هر مورد بر روی سه نمودار که دارای محور افقی و عمودی یکسان‌اند، نشان داده شده‌اند. این مورد در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نیز انجام شده‌است. افزایش دمای صفحه داغ موجب ذوب شدن لایه ضخیم تری از قطعات شده است به طوری که در هنگام اتصال قطعات به یکدیگر، نفوذ لایه‌های مذاب دو قطعه در یکدیگر بیشتر شده است و در نهایت به افزایش استحکام کششی و چقرمگی شکست قطعات منجر شده است.



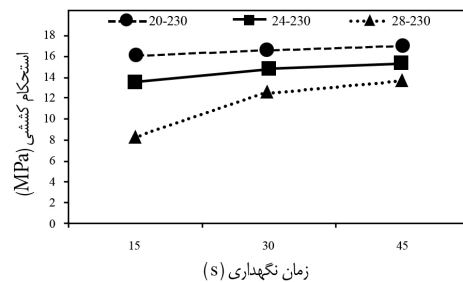
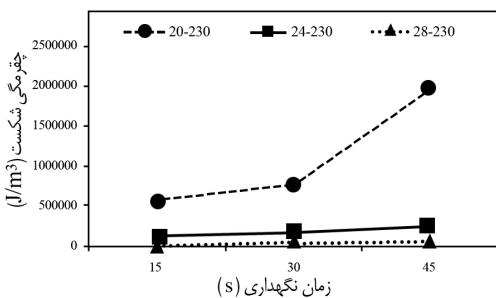
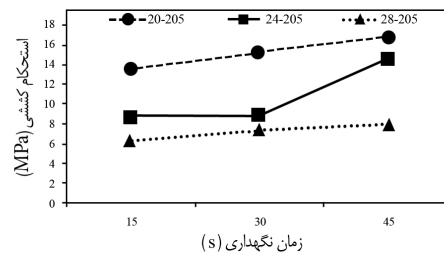
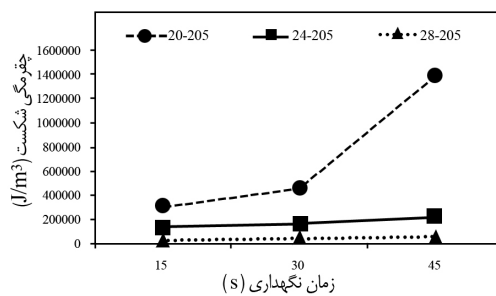
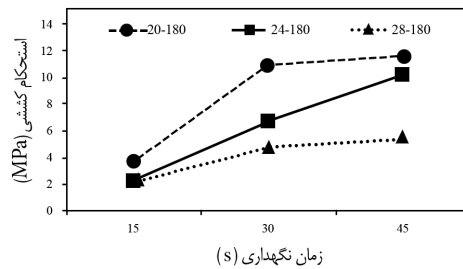
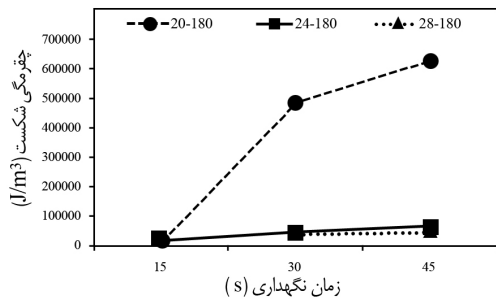
## ۳-۲- اثر زمان نگهداری

تأثیر زمان نگهداری بر استحکام کششی و چقرمگی شکست درز جوش در دمای صفحه داغ و فشارهای مختلف در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. افزایش زمان نگهداری قطعات بر روی صفحه داغ باعث افزایش برآمدگی در سطح داخلی و خارجی اتصال شده است که حاصل جابه‌جایی پلیمر نرم شده از منطقه جوش به اطراف است. این امر باعث نفوذ بهتر لبه‌های دو قطعه در هم شده و در نهایت منجر به افزایش استحکام کششی و چقرمگی شکست قطعات می‌شود. علت کم بودن چقرمگی شکست در فشارهای نگهداری بالا در شکل (۸) را می‌توان در ضعیف بودن و شکست سریع نمونه‌ها از خط جوش دانست. می‌توان به این نکته اشاره کرد که در قطعاتی با چقرمگی شکست کم هیچگونه اتصال جوشکاری صورت نگرفته است.



شکل (۶) تأثیر دمای المنت بر چقرمگی شکست درز جوش (به‌عنوان مثال نمودار 15-20 نمایانگر زمان نگهداری ۱۵ ثانیه در فشار 20 psi است).

شکل (۵) تأثیر دمای المنت بر استحکام کششی درز جوش (به‌عنوان مثال نمودار 15-20 نمایانگر زمان نگهداری ۱۵ ثانیه در فشار 20 psi است).



شکل (۸) تأثیر زمان نگهداری بر چقرمگی شکست درز جوش (به عنوان مثال نمودار 20-180 نمایانگر فشار 20 psi و دمای 180 °C است).

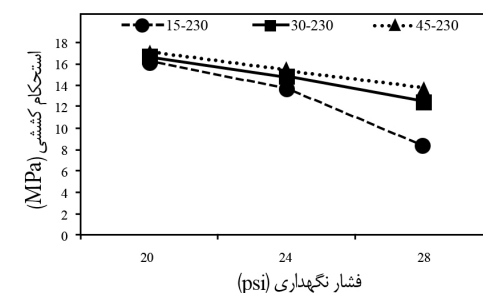
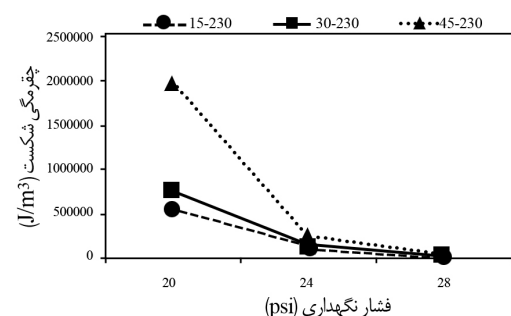
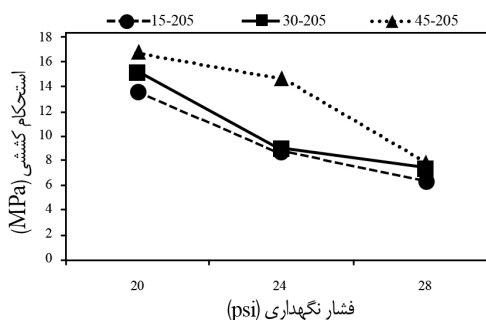
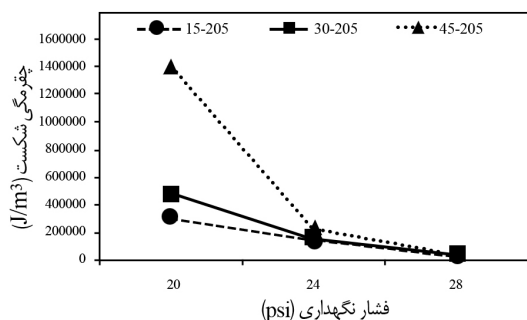
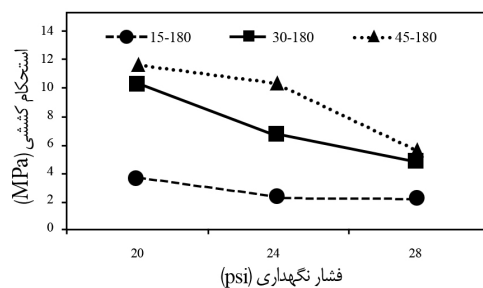
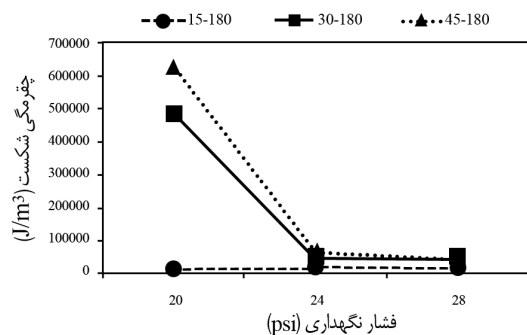
شکل (۷) تأثیر زمان نگهداری بر استحکام کششی درز جوش (به عنوان مثال نمودار 20-180 نمایانگر فشار 20 psi و دمای 180 °C است).

### ۳-۴- بررسی ساختار شکست خط جوش

شکست پلیمرها به دو شکل، ترد یا نرم صورت می‌گیرد. در این مقاله، در تمامی نمودارهای نشان داده شده مربوط به قطعات جوشکاری شده، شکست از محل درز جوش انجام نشده است. این بدین معنی است که استحکام خط جوش از ترموپلاستیک پایه بیشتر بوده است. زمانی که شکست از محل خط جوش نباشد، شکست حالت نرم و زمانی که شکست از محل خط جوش باشد، شکست ترد اتفاق می‌افتد.

### ۳-۳- اثر فشار نگهداری

تأثیر میزان فشار نگهداری بر استحکام کششی و چقرمگی شکست درز جوش در دمای صفحه داغ و زمان نگهداری مختلف در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. افزایش فشار باعث خارج شدن ماده مذاب پرکننده بین دو قطعه و لغزیدن قطعات بر روی هم شده است. این امر باعث می‌شود که لبه‌های دو قطعه دقیقاً رویه‌روی هم جوش نخورند. همچنین این امر در فشارهای بالاتر باعث ریزش ماده نرم شده در لبه‌های قطعه، و خم شدن نمونه‌ها می‌شود. به طوری که با خروج ماده مذاب نرم شده بین دو قطعه هیچگونه اتصالی بین مواد نرم شده ایجاد نمی‌شود و در نهایت استحکام کششی و چقرمگی شکست کاهش می‌یابد.



شکل (۱۰) تأثیر فشار نگهداری بر چقرمگی شکست درز جوش (به عنوان مثال نمودار 15-180 نمایانگر زمان نگهداری 15 ثانیه و دمای 180 °C است).

شکل (۹) تأثیر فشار نگهداری بر استحکام کششی درز جوش (به عنوان مثال نمودار 15-180 نمایانگر زمان نگهداری 15 ثانیه و دمای 180 °C است).

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر پارامترهای فشار نگهداری، دمای صفحه داغ و زمان نگهداری بر استحکام کششی و چقرمگی شکست قطعات پلی اتیلنی جوشکاری شده به روش صفحه داغ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج و مشاهدات مهم این تحقیق عبارت اند از:

- افزایش فشار باعث از بین رفتن ماده مذاب پرکننده بین دو قطعه می شود. همچنین در فشارهای بالاتر افزایش فشار باعث ریزش ماده نرم شده در لبه های قطعه و خم شدن نمونه ها می شود. همه این عوامل تأثیر بسیار زیادی در کاهش استحکام کششی و چقرمگی شکست درز جوش دارند.

با توجه به ساختار ماکرومولکولی ترموپلاستیکها، علت وقوع انواع شکست انعطاف پذیر یا ترد، نحوه لغزش و جابه جایی زنجیره های پلیمری است. در صورت پیدایش ترکچه و موضعی بودن نفوذ آن (عدم گسترش زیاد)، شکست نرم اتفاق می افتد. در صورت لغزش زنجیره ها در مقیاس ماکروسکوپی، شکست ترد ایجاد می شود. بنابراین در شکست ترد نیز نوعی تسلیم در ابعاد میکروسکوپی صورت می گیرد [۱۶].

انرژی مصرفی برای تغییر شکل موضعی (شکست ترد)، نخست زنجیره های درز جوش را کشیده و در مرحله بعد، یا آنها را از لابه لای زنجیره های سطح مقابل که با آنها گره خورده اند، رها می کند یا به پارگی زنجیره ها می انجامد [۱۶].



- [6] Yousefpour Ali, Hojjati Mehdi, Pierre Immarigeon - Jean., Fusion bonding/welding of thermoplastic composites., *SAGE Journal of Thermoplastics Composites Materials*, Vol. 17, 2004, pp. 303-341.
- [7] Bucknell, C., Hot plate welding of plastics: factor affecting weld strength, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 20, 1980, pp. 653-660.
- [8] Potente H., Improved efficiency by high temperature heated tool welding, *Welding in the World*, Vol. 17, 1979, pp. 456-461.
- [9] John P., Heated plate welding of HDPE pipes at low ambient temperature, *Welding in the world*, Vol. 20, 1982, pp. 1251-1258.
- [10] Lyashenko V., The butt fusion welding of thermoplastics tubes in winter conditions, *welding Production*, Vol. 12, 1975, pp. 325-332.
- [11] Poopat Bovornchok, Yuan Chung, Benatar Avraham, Optimization of Contact Hot Plate Welding of HDPE, *Society of Plastics Engineering*, 1999, pp. 1386-1390.
- [12] Yuan Chun, Poopat Bovornchok and Benatar Avraham, Hot plate welding of polypropylene and talc reinforced polypropylene composites, *Society of Plastics Engineering*, 1999, pp 1396-1402.
- [13] Oliver MJ, Duarte FM, Tchalamov and Cunho Am, Hot plate welding of Glass Reinforced Polypropylenem, *Society of Plastics Engineering*, 2001, pp. 396-340.
- [14] Kagan VAL. Optimized Mechanical Performance of and Molded Butt Joints- Part II – Weld and Knit Lines Integrity., *SAGE Journal of Reinforced plastic and Composites*, Vol. 22, 2003, pp. 867-879.
- [15] Mokhtarzadeh Abbass, Benatar Avraham, Experiments in Hot Plate Welding of Polypropylene Nanocomposites, *Society of Plastics Engineering*, 2004, pp. 1168-1172.

[۱۶] باقری، ر.، مبانی خواص مکانیکی پلاستیک‌ها، جهاد

دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۴، صص

۱۱۵ - ۱۲۰.

- افزایش دمای صفحه داغ باعث نفوذ دو قطعه در هم می‌شود که در شرایط اشاره شده باعث افزایش استحکام کششی و چقرمگی شکست می‌شود.
- افزایش زمان نگهداری قطعات بر روی صفحه داغ باعث ذوب شدن بیشتر لبه‌ها، نفوذ بهتر قطعات، افزایش استحکام کششی و چقرمگی شکست می‌شود.
- استحکام کششی قطعات جوشکاری شده به روش صفحه داغ کمتر از قطعات جوشکاری نشده است.
- چقرمگی شکست قطعات جوشکاری شده به روش صفحه داغ بیشتر از قطعات جوشکاری نشده است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌بینند که از مسئولان شرکت بهینه‌سازان سوشیانت دزفول، آقایان مهندس علی ژیان و صادق هدایت و همچنین آقای مهندس حسین فراوش و خانم پریسا نوری‌نژاد صوفی برای همکاری در انجام آزمایشها تشکر و قدردانی نمایند.

### مراجع

- [1] Astoks V., Toward weld strength data base for hot tool welding of Thermoplastics, *Society of Plastics Engineering*, 2000, pp. 1058-1063.
- [2] Troughton Michael, Handbook of Plastic Joining, United States of America, 2008, pp. 3-8.
- [3] Lin T.T. , Benatar. *A Effect of hot plate welding parameters on the weld strength of polypropylene*, ANTEC, 12, Society of Plastics Engineering conference proceedings, 1993, pp. 961-966.
- [4] Potente H. , Tappe P., Scale- up laws in heated tool butt welding of HDPE , *Polymer Engineering and Science*, Vol. 29, 1989, pp. 876-881.
- [5] Stokes V.K., Joining methods for plastics and plastics composites: an overview, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 29, 1989, pp. 546-551.