

بررسی مشخصات مکانیکی و ظاهری کامپوزیت زمینه پلیمری جوشکاری شده توسط فرآیند التراسونیک

رضا نیکوی*

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

نصرالله بنی مصطفی عرب

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

علی اکبر قادری

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق از جوشکاری التراسونیک برای اتصال لبه روی هم نمونه‌های استاندارد کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد. استحکام کشش - برش اتصالات در شرایط گوناگون از جمله زمان، فشار، دامنه ارتعاش شیپورک و مقدار الیاف شیشه موجود در کامپوزیت، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها در بررسی اثر متغیرهای ورودی بر ظاهر جوش‌ها و خواص مکانیکی، روش طراحی آزمایش سطح پاسخ با در نظر گرفتن چهار فاکتور سه سطحی استفاده شد. بر اساس مشاهدات آزمایشی، تأثیر تغییر پارامترها بر ظاهر جوش‌ها به روشنی مقایسه شد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که دامنه و فشار به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر استحکام جوش دارند. بهترین وضعیت ظاهری جوش‌ها (کمترین مقدار عیوب در جوش‌ها)، در دامنه ارتعاش سی‌وسه میکرون، زمان جوشکاری چهاردهم ثانیه، فشار نگهداری یک و نیم بار و مقدار الیاف شیشه ده درصد وزنی به دست می‌آید. افزایش فشار، زمان جوشکاری و مقدار الیاف شیشه موجود در کامپوزیت بر وضعیت ظاهری جوش‌ها اثر منفی می‌گذارد و باعث افزایش میزان عیوب موجود در جوش‌ها می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ظاهر جوش، استحکام کشش - برش، کامپوزیت پلی‌پروپیلن، الیاف شیشه، طراحی آزمایش.

Investigation of Mechanical and Weld Appearance Properties of Poly Based Composites in Ultrasonic Welding Process

R. Nikoi

Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

N. Bani Mostafa Arab

Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

A. A. Ghaderi

Faculty of Material Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, ultrasonic lap welding process has been used for welding of standard specimens of polypropylene composites reinforced with glass fiber with 4 mm thickness. The tensile-shear strength and appearance properties of welds under was used different conditions of time, pressure and vibration amplitude and glass fiber content were investigated. To investigation the relationship between input variables and appearance properties of welds and weld strength, the response surface method to decrease the number of experiments and costs considering four factors at three levels. Based on experimental observations, effects of input parameters on appearance of welds were clearly evaluated. The results indicated that amplitude and pressure had the most and the least significant effect on the tensile-shear strength of these composites respectively. Best appearance condition of welds (which has least weld defects) was resulted at an amplitude of 33 μm , welding time of 0.4s, pressure of 1.5 bar and glass fiber content of 10%. Increase of welding pressure, time and glass fiber content in composites has negative effects on welds appearance status and causes weld defects increase.

Keywords: Appearance of welds, Tensile-shear strength, Polypropylene composite, Glass fiber, Design of experiment.

۱- مقدمه

بسیاری از کاربردها می‌باشند [۲]. در خانواده‌ی رزین‌ها، سه گروه وجود دارند که عبارت‌اند از: ترموست‌ها، ترموپلاستیک‌ها و الاستومرها. می‌توان گفت که کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به سه دسته‌ی کامپوزیت‌های ترموست، ترموپلاستیک و الاستومر تقسیم می‌شوند [۳]. از جمله رزین‌های ترموپلاستیک می‌توان به پلی‌پروپیلن (PP) اشاره نمود که جز مهم‌ترین پلاستیک‌های مهندسی است [۴]. به همین دلیل در این تحقیق از این ماده به‌عنوان زمینه کامپوزیت استفاده گردید. همچنین از مهم‌ترین الیاف مورد استفاده در صنعت می‌توان الیاف شیشه، کربن و آرامید را نام برد. در این پژوهش به دلیل کاربرد فراوان و قیمت نسبتاً ارزان الیاف شیشه، از آن به‌عنوان ماده تقویت‌کننده در کامپوزیت استفاده شد. همچنین امروزه به دلیل کاربرد فراوان کامپوزیت‌های

امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی، به تلفیق خواص مواد نیاز است و امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص مورد نظر را برآورده سازد، وجود ندارد. از آنجاکه نمی‌توان ماده‌ای یافت که همه خواص فوق را دارا باشد، باید به دنبال روشی برای ترکیب خواص مواد بود. کامپوزیت‌ها خواص مکانیکی برجسته‌ای داشته و از انعطاف‌پذیری مناسبی در طراحی برخوردارند و روش‌های ساخت آن‌ها نسبتاً آسان است [۱]. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری امروزه در صنعت از اهمیت خاصی برخوردار هستند و روزبه‌روز بر کاربردهای مختلف آن‌ها افزوده می‌شود. همچنین به دلیل خواص مکانیکی بالا، سبکی، مقاومت عالی در برابر خوردگی و راحتی کار با آن‌ها، جایگزین مناسبی برای فلزات در

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: reza2292@gmail.com

پلیمری در صنایع مختلف، اتصال این کامپوزیت‌ها از اهمیت زیادی برخوردار گشته و روش‌های متنوعی برای اتصال این مواد توسعه یافته‌اند [۵].

X.Y.Dai و همکارانش [۶]، به بررسی خواص مکانیکی اتصال نمونه‌های پلی پروپیلنی تقویت شده با الیاف کوتاه و بلند شیشه ای که به روش ارتعاشی جوشکاری شدند، پرداختند و آنها دریافتند که اتصالات کامپوزیت حاوی ۳۰ درصد وزنی الیاف شیشه بهتر از کامپوزیت حاوی ۴۰ درصد الیاف شیشه است. G.H.Payeganeh و همکارانش [۷]، استحکام و ظاهر اتصال ایجاد شده به شکل لب به لب به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این کامپوزیت‌ها را مورد تحلیل تجربی قرار دادند و دریافتند که پارامتر سرعت دورانی اثر بیشتری نسبت به سرعت خطی و زاویه گلگی بر استحکام اتصالات می‌گذارد. و همچنین هیدی احمدی [۸]، به روش تاگوجی استحکام و ظاهر اتصال لبه روی هم نمونه های کامپوزیتی پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه و الیاف کربن را که به روش اصطکاکی اغتشاشی اتصال یافته بودند، به طور تجربی بررسی کرد. او هندسه ی پین مورد استفاده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را نیز به همراه پارامترهای سرعت دوران پین، سرعت خطی و زاویه گلگی بررسی کرد.

روش‌های جوشکاری کامپوزیت‌ها بر اساس مکانیزم تولید گرما در خط اتصال به سه دسته جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری گرمایی و جوشکاری الکترومغناطیسی تقسیم‌بندی می‌شود که جوشکاری التراسونیک در دسته جوشکاری اصطکاکی قرار دارد [۹]. با توجه به مزایای بسیار جوشکاری التراسونیک در اتصال کامپوزیت‌ها از جمله؛ بالا بودن سرعت فرایند، کوچک بودن منطقه متأثر از گرما، بهره‌وری بالا و... از این فرایند برای اتصال کامپوزیت مورد تحقیق استفاده شد [۱۰]. هدف از این پژوهش، یافتن نحوه اثر پارامترهای فرایند جوشکاری التراسونیک بر کیفیت ظاهری و نیز خواص مکانیکی جوش‌های به وجود آمده در اتصال پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه است. برای رسیدن به این هدف، ورق‌های کامپوزیتی پس از فرایند ساخت، طبق روش طراحی آزمایش سطح پاسخ^۱ به صورت لبه روی هم توسط فرایند جوشکاری التراسونیک، به هم اتصال یافتند. در طراحی آزمایش، پارامترهای اصلی فرایند جوشکاری التراسونیک شامل فشار نگهداری قطعات، دامنه ارتعاش شیپورک و زمان جوشکاری به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شد. علاوه بر پارامترهای فرایند، مقدار الیاف شیشه نیز به دلیل تأثیرگذاری فراوانش بر خواص جوش به وجود آمده، به عنوان یکی دیگر از پارامترهای ورودی در طراحی آزمایش وارد شدند. کیفیت ظاهری و اندازه نیروی شکست جوش‌ها نیز به عنوان متغیر خروجی، بررسی گردیدند.

۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- خصوصیات مواد اولیه

ماده زمینه‌ی کامپوزیت مورد استفاده در این تحقیق پلی پروپیلن انتخاب گردید. پلی پروپیلن یک الفین ترموپلاستیک بلوری است که مجموعه‌ای از خواص فوق العاده را باقیمت نسبتاً کمی دارا است. این

پلیمر پایین‌ترین چگالی (حدود 0.914 gr/cm^3) را در بین تمام انواع پلاستیک‌های مهندسی دارد. پلی پروپیلن ضمناً از مقاومت خوب در برابر گرما، ترک خوردگی در اثر اعمال تنش، خواص الکتریکی و استحکام ضربه‌ی خوب برخوردار است [۱۱].

پلی پروپیلن را می‌توان به منظور دستیابی به خواص بهتر، از طریق آمیزه کاری با الیاف‌های تقویت کننده مانند الیاف شیشه، الیاف کربن، ... اصلاح کرد. الیاف شیشه رایج‌ترین و پرمصرف‌ترین الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت است. برحسب نوع و ترکیب مواد بکار رفته در تهیه آن‌ها، الیاف شیشه به انواع مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. ماده اصلی تشکیل دهنده الیاف شیشه همانند شیشه‌های معمولی^۲، سیلیکا است. الیاف شیشه قیمت پایین، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی بالا و خواص عایقی عالی (گرمایی و الکتریکی) دارد. در این پژوهش از رایج‌ترین نوع الیاف شیشه (نوع E) استفاده شده است.

ساخت کامپوزیت ترموپلاستیک در دو مرحله اکستروژن - پرس داغ تحقق می‌یابد. توسط دستگاه اکستروژن پلی پروپیلن با الیاف کوتاه از جنس شیشه با درصدهای وزنی متفاوت مخلوط گردید و ۳ نوع گرانول از ترکیب پلی پروپیلن با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی الیاف شیشه حاصل شد. گرانول‌های مذکور به صورت آماده از شرکت کیمیا فروز بانام‌های تجاری Forolen PP1045GB PP3045GB, P2045GB خریداری شد. سپس این گرانول‌ها به کمک دستگاه پرس داغ به ورق‌هایی به ابعاد $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 4\text{mm}$ تبدیل گردید.

پس از اجرای مراحل ساخت ورق‌ها، برای یافتن خواص مکانیکی، نمونه‌هایی طبق استاندارد ASTM-D638 [۱۲]، به کمک دستگاه فرز CNC از ورق‌ها جدا گردید و توسط دستگاه کشش (ساخت) Zuker (آلمان) با سرعت 5mm/min تحت کشش قرار گرفت. در جدول ۱ خواص مکانیکی ورق‌های ساخته شده ارائه شده است.

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در جوشکاری مطابق با استاندارد ASTM D5868 [۱۳] که در شکل ۱ نشان داده شده با استفاده از دستگاه فرز CNC از ورق‌های کامپوزیتی جدا شدند و برای فرایند جوشکاری التراسونیک آماده گردیدند. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود این نمونه شامل دو قسمت است که هر کدام به‌طور جداگانه به ابعاد $101\text{mm} \times 25\text{mm} \times 4\text{mm}$ از ورق‌های ساخته شدند جدا شدند. این دو قسمت در مرحله جوشکاری به صورت لبه روی هم متصل می‌شود.

۲-۳- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها به کمک DOE و به روش RSM (سطح پاسخ) و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری Minitab انجام شده است. برای یافتن تأثیر پارامترها بر استحکام و مشخصات ظاهری جوش‌ها از طرح آزمایش Boxbehnen با

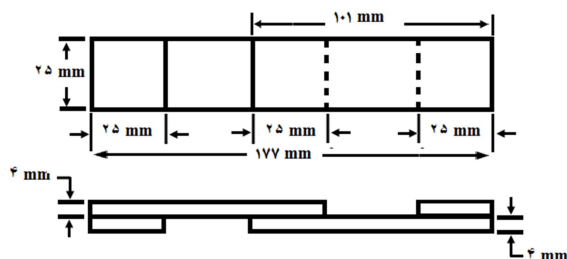
² Sodalime Glass

¹ Response Surface Method

۲ فیکسچر و نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها درون فیکسچر را نشان می‌دهد. هورن نیز از نوع افزایشنده دامنه و از جنس آلومینیوم آلیاژی ساخته شد.

۲-۵- انجام جوشکاری و آزمون کشش-برش

پارامترهای فرایند جوشکاری التراسونیک طبق جدول طراحی آزمایش بر روی دستگاه جوشکاری (Maxwhite) ساخت کشور تایوان تنظیم گردید و نمونه‌ها تحت شرایط موجود در جدول ۳، تحت عملیات جوشکاری التراسونیک قرار گرفتند. در شکل ۳ دستگاه جوشکاری، شیپورک و فیکسچر مورد استفاده در این تحقیق دیده می‌شود. در شکل ۴ تا ۷ تصاویر جوش‌های به وجود آمده در شرایط مختلف به نمایش گذاشته شده است. برای به دست آوردن نتایج علمی از تأثیر پارامترها بر کیفیت جوش‌ها به شکل ظاهری نمونه‌ها اکتفا نکرده و نمونه‌ها برای بررسی خواص مکانیکی آماده گردیدند. نمونه‌های جوشکاری شده، به کمک دستگاه آزمون کشش (Zuker-آلمان) در دمای اتاق و با سرعت کشش 5mm/min تحت آزمون کشش-برش قرار گرفتند و نیروی شکست آن‌ها به عنوان پاسخ آزمایش‌ها ثبت گردید و در جدول ۳ با عنوان نتیجه آزمایش وارد شده است. از نیروی به دست آمده از شکست نمونه‌ها، برای مدل‌سازی رابطه تجربی نیروی شکست جوش‌ها، استفاده شد.



شکل ۱- ابعاد و شکل هندسی نمونه‌های آزمایش کشش - برش [۱۳]

در نظر گرفتن چهار پارامتر فشار، زمان، دامنه ارتعاش و مقدار الیاف شیشه موجود در کامپوزیت در سه سطح، استفاده شد.

جدول ۲ پارامترهای ورودی و سطوح هریک از آنها را نشان می‌دهد. در جدول ۲، کد ۱ بیانگر کمترین مقدار، کد ۲ بیانگر مقدار متوسط و کد ۳ بیانگر بیشترین مقدار برای چهار فاکتور مورد نظر است.

جدول ۳، آرایه آزمایش‌های مورد استفاده در این تحقیق را به صورت کد شده نشان می‌دهد. ۲۷ آزمایش مطابق با جدول ۳ و به طور درهم و نامرتب انجام شدند تا از بروز خطای سیستمی جلوگیری شود. به دلیل بالا بودن هزینه آزمایشات این آزمایشات تنها ۲ بار تکرار گردید.

۲-۴- ساخت فیکسچر و هورن

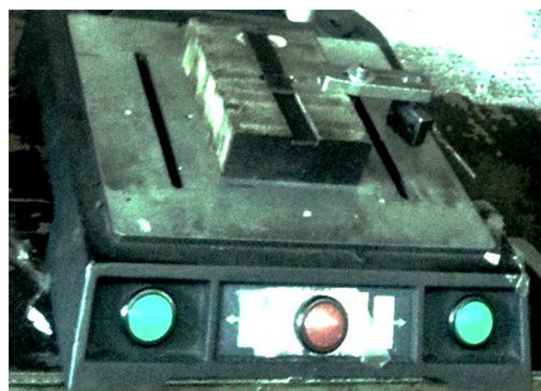
برای انجام فرایند جوشکاری باید تمهیداتی در نظر گرفته شود تا قطعه کار در حین فرایند کاملاً ثابت باشد و تغییر موقعیت ندهد. برای این منظور فیکسچری از جنس فیبر استخوانی تهیه و ساخته شد. شکل

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده

نوع ماده	مدول الاستیک (MPa)	تنش کششی در شکست (MPa)	ازدیاد طول در شکست (%)
کامپوزیت پلی پروپیلن با ۳۰٪ الیاف شیشه	۳۴۵۱	۲۵/۳	۱۳/۲
کامپوزیت پلی پروپیلن با ۲۰٪ الیاف شیشه	۴۷۲۹	۴۳/۹	۱۵/۹
کامپوزیت پلی پروپیلن با ۱۰٪ الیاف شیشه	۲۷۰۷	۳۲/۸	۱۶/۳



شکل ۳- شیپورک و دستگاه جوشکاری التراسونیک



شکل ۲- فیکسچر نمونه‌ها برای جوشکاری

۳- تحلیل نتایج و مدل سازی

در ابتدا نتایج به دست آمده از آزمایش کشش برش یعنی بیشینه نیرویی که اتصالات تحمل کردند به عنوان پاسخ، به محیط نرم افزار وارد گردید. سپس داده ها به کمک نرم افزار، مورد دو مرحله آنالیز قرار گرفت. در مرحله اول یک رابطه ریاضی (چندجمله ای درجه ۲) برای پیش بینی نیروی شکست جوش ها به دست آمد که این رابطه همه پارامترهای فشار نگهداری، زمان جوشکاری، دامنه ارتعاش شیپورک و مقدار الیاف موجود در کامپوزیت ها و نیز همه مربعات و اثرات متقابل پارامترها را شامل می شود و در مرحله دوم عامل های بی تأثیر پس از تشخیص در مرحله قبل، از لیست عامل های تأثیرگذار حذف و مدل نهایی نیروی شکست جوش ها (به کمک رگرسیون) حاصل شد. جدول آنالیز واریانس نهایی برای بررسی میزان اثر پارامترها و نیز نمودار T-Student برای تشخیص کفایت مدل مورد استفاده واقع شدند.

جدول ۲- پارامترهای موثر و سطوح آنها

مقدار کدها	فشار نگهداری (bar)	دامنه امواج التراسونیک (μm)	زمان جوشکاری (s)	مقدار الیاف شیشه (%)
۱	۱/۵	۲۷	۰/۴	۱۰
۲	۲	۳۰	۰/۸	۲۰
۳	۲/۵	۳۳	۱/۲	۳۰

جدول ۳- آرایه آزمایش ها

شماره آزمایش	فشار (bar)	فاکتورها			پاسخ
		دامنه ارتعاش (μm)	زمان جوشکاری (s)	مقدار الیاف شیشه (%)	
۱	۱	۱	۲	۲	۲۰۷۰
۲	۳	۱	۲	۲	۱۷۶۵
۳	۱	۳	۲	۲	۱۸۳۰
۴	۳	۳	۲	۲	۱۷۹۵
۵	۲	۲	۱	۱	۱۳۵۴
۶	۲	۲	۳	۱	۱۶۴۲
۷	۲	۲	۱	۳	۱۴۰۴
۸	۲	۲	۳	۳	۱۳۷۶
۹	۱	۲	۲	۱	۱۹۲۹
۱۰	۳	۲	۲	۱	۱۸۹۱
۱۱	۱	۲	۲	۳	۱۴۵۰
۱۲	۳	۲	۲	۳	۱۳۹۵
۱۳	۲	۱	۱	۲	۱۷۰۹
۱۴	۲	۳	۱	۲	۱۹۹۳
۱۵	۲	۱	۳	۲	۱۶۰۶
۱۶	۲	۳	۳	۲	۱۸۱۲
۱۷	۱	۲	۱	۲	۲۱۰۱
۱۸	۳	۲	۱	۲	۱۸۶۷
۱۹	۱	۲	۳	۲	۱۵۹۷
۲۰	۳	۲	۳	۲	۱۸۶۴
۲۱	۲	۱	۲	۱	۱۷۲۰
۲۲	۲	۳	۲	۱	۱۶۳۸
۲۳	۲	۱	۲	۳	۱۵۵۵
۲۴	۲	۳	۲	۳	۱۰۶۹
۲۵	۲	۲	۲	۲	۱۹۲۱
۲۶	۲	۲	۲	۲	۲۰۱۷
۲۷	۲	۲	۲	۲	۱۹۸۰

الف



ب

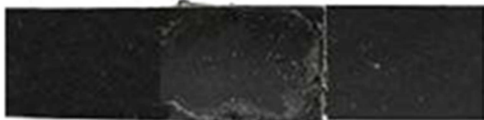


شکل ۴- جوش ایجاد شده بر روی (الف) نمونه شماره ۱۱ (ب) نمونه شماره ۱۲

الف



ب



شکل ۵- تصاویر جوش ایجاد شده بر روی (الف) نمونه شماره ۱۴ (ب) نمونه شماره ۱۳

الف

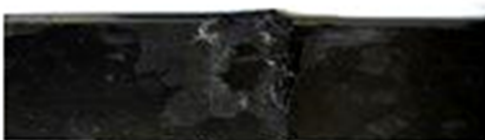


ب



شکل ۶- تصاویر جوش ایجاد شده بر روی (الف) نمونه شماره ۱۵ (ب) نمونه شماره ۱۳

الف



ب



شکل ۷- تصاویر جوش ایجاد شده بر روی (الف) نمونه شماره ۲۱ (ب) نمونه شماره ۲۳

۳-۱- بررسی ظاهر جوش‌ها

همانطور که از جدول طراحی آزمایش می‌توان فهمید فقط بعضی از آزمایش‌ها برای تشخیص اثر تغییر درسطوح هر پارامتر در نظر گرفته شده است که فقط تصویر این نمونه‌ها برای بررسی اثر تغییر هر پارامتر بر ظاهر جوش‌ها قابل استفاده است (مثلاً در شرایط آزمایش نمونه‌های ۱۱ و ۱۲ فقط پارامتر فشار تغییر کرده است که تصویر آنها برای مقایسه عیوب ظاهری در اثر تغییر فشار استفاده شده است) و بقیه آزمایشات برای تشخیص رابطه رگرسیون استحکام لازم الاجرا هستند.

تصاویر ۴ تا ۷ برای بررسی ظاهر جوش‌ها و تأثیر تغییر هر پارامتر از سطح جوش‌ها توسط دوربین عکاسی دیجیتال با رزولوشن ۱۱ مگا پیکسل به دست آمده است. با مشاهده تصویر ۴ می‌توان اثر تغییر فشار را بر شکل جوش‌های ایجاد شده دریافت. تصویر ۴الف و ۴ب به ترتیب نمونه‌های جوشکاری شده در فشار یک و نیم بار و دو و نیم بار را نمایش می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهد که افزایش فشار باعث بهبود وضعیت جوش نشده است و برعکس باعث افزایش مقدار بیرون زدگی مذاب و در نتیجه کاهش استحکام شده است. در تصویر ۵ اثر تغییر دامنه ارتعاش شیپورک بر ظاهر جوش مشخص است. تصویر ۵الف و ۵ب به ترتیب نمونه‌های جوشکاری شده در دامنه سی و سه میکرون و بیست و هفت میکرون را نمایش می‌دهد. طبق تصویر ۵، افزایش دامنه باعث افزایش نفوذ شده در حالی که بیرون زدگی مذاب اتفاق نیفتاده است. در تصویر ۶ ظاهر نمونه‌هایی با هم مقایسه شده‌اند که تنها مقدار پارامتر زمان جوشکاری در جوشکاری آن‌ها متفاوت بوده است. تصویر ۶الف و ۶ب به ترتیب نمونه‌های جوشکاری شده در زمان یک و دو دهم ثانیه و چهار دهم ثانیه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از تصویر ۶ پیداست افزایش زمان نیز مانند افزایش فشار اثر منفی بر ظاهر جوش‌ها گذاشته و علاوه بر بیرون زدگی مذاب باعث چسبیدن مقداری از مواد موجود در حوضچه مذاب به سطح فیکسچر شده است. تصویر ۷ برای مشاهده اثر مقدار الیاف شیشه بر ظاهر جوش به نمایش گذاشته شده است تصویر ۷الف و ۷ب به ترتیب نمونه‌های جوشکاری شده دارای ده درصد و سی درصد الیاف شیشه را نمایش می‌دهد. و همان‌طور که در تصاویر مشخص است هرچه مقدار الیاف کمتری در منطقه حوضچه موجود باشد نفوذ پلی‌پروپیلن افزایش یافته و سطح بیشتری برای اتصال پلی‌پروپیلن-پلی‌پروپیلن وجود دارد و نیز به دلیل چسبندگی ضعیف الیاف شیشه به پلی‌پروپیلن، افزایش مقدار الیاف شیشه نه تنها اثر مثبتی بر استحکام جوش‌ها ندارد بلکه از استحکام جوش‌ها کم می‌کند. همان‌طور که از ظاهر جوش‌ها می‌توان نتیجه گرفت برای رسیدن به بهترین نوع جوش‌ها باید فشار و زمان را در کمترین سطح محدوده و دامنه را در بالاترین مقدار محدوده تنظیم کرد در حالی که مقدار الیاف شیشه نزدیک به مقدار ۱۰ درصد باشد. برای تأیید موارد ادعا شده در این بخش، نتایج آزمون‌های مکانیکی در جدول ۳ ارائه گردیده است.

۳-۲- آنالیز واریانس (ANOVA)

در جدول آنالیز واریانس^۱، مقادیر مجموع مربعات^۲، میانگین مربعات^۳، درجه آزادی^۴، مقادیر P^۵ و F^۶ مربوط به هر عامل نشان داده

^۱ Analysis Of Variance

^۲ Sum of Squares

می‌شود. با مشاهده مقادیر P و F جدول آنالیز واریانس، می‌توان میزان اثر عوامل مختلف روی پاسخ را فهمید. مقدار P هرچه کمتر و مقدار F هرچه بیشتر باشد، تأثیر آن عامل بر پاسخ بیشتر خواهد بود. با در نظر گرفتن ضریب آلفا (α) برابر ۰/۰۵ (سطح اطمینان ۹۵ درصد)^۷، مقادیر P هر عامل که بیشتر از ۰/۰۵ باشد آن عامل تأثیر به سزایی بر پاسخ نخواهد داشت، و می‌توان با در نظر گرفتن تقریب در نوشتن رابطه رگرسیون جدید، واژه مربوط به آن عامل را حذف نمود و از تأثیر آن صرف‌نظر کرد [۱۴، ۱۵]. از جدول ANOVA می‌توان درباره میزان اثرگذاری پارامترهای فرایند جوشکاری التراسونیک روی استحکام نتایج زیر را دریافت. در مورد فاکتورهای خطی^۸ می‌توان دریافت که؛ اثر دامنه ارتعاش شیپورک بر استحکام از سه پارامتر دیگر بیشتر بوده است. کمترین تأثیر بر استحکام را، در بین پارامترهای جوشکاری، فشار پرس بر عهده خواهد داشت. اما درباره تأثیر کنش-واکنش‌ها (اثرات متقابل)^۹، می‌توان فهمید که؛ تأثیر کنش-واکنش دامنه-زمان نسبت به بقیه کنش-واکنش‌ها بیشتر است. همچنین کنش-واکنش فشار-الیاف و نیز عامل مجذور فشار و مجذور زمان در مرحله تحلیل اولیه به دلیل داشتن مقدار P بیشتر از ۰/۰۵ به عنوان ترم‌های بی‌تأثیر شناخته شدند، و در مرحله تحلیل نهایی از لیست واژه‌ها حذف شدند. جدول آنالیز واریانس که از تحلیل نهایی به دست آمده است (پس از حذف ترم‌های بی‌تأثیر) به صورت جدول ۴ ارائه شده است. که رابطه رگرسیون حاصل از این تحلیل (مدل نهایی پاسخ) دارای ۱۱ درجه آزادی است.

۳-۳- نمودار Residual و نمودار T-Student

از نمودار مانده‌ها^{۱۰} که در شکل ۸ نشان داده شده است می‌توان دریافت که مانده‌های به دست آمده از نتایج دارای توزیع مناسبی هستند و تغییرات مانده‌ها برحسب شماره آزمایش‌ها، ریتم خاصی ندارد و همچنین نمودار هیستوگرام موجود نشان می‌دهد که توزیع مانده‌ها، دارای منحنی نرمال است و در نمودار احتمال نرمال درصد بالایی از مانده‌ها روی خط نرمال قرار دارند و یا خیلی از آن انحراف ندارند. در شکل ۹ مقادیر مانده‌های استاندارد برحسب شماره آزمایش‌ها به صورت نمودار T-Student آورده شده است.

۳-۴- مدل نهایی

با توجه به مقدار P مربوط به هر واژه موجود در جدول آنالیز واریانس اولیه، برای به دست آوردن رابطه رگرسیون جدید و ساده‌تر، از نوشتن واژه‌های مجذور فشار (A^2) و مجذور زمان (C^2)، حاصل ضرب فشار در درصد الیاف (AD) در رابطه نهایی نیرو، به دلیل دارا بودن مقدار P کمتر از ۰.۰۵ (سطح اطمینان ۹۵ درصد)، خودداری شد.

^۳ Mean Squares

^۴ Degree of Freedom

^۵ P-Value

^۶ F-test

^۷ Confidence Level

^۸ Main Effect

^۹ Interaction

^{۱۰} Residual

در این مرحله، رابطه رگرسیونی نهایی به دست آمده است که به صورت رابطه (۱) بیان می شود.

$$F_{max} = -15021 - 2404A + 1103.5B + 5332.8C + 152.4D - 16.7B^2 - 2.7D^2 + 66.7AB + 427.8AC - 249BC - 3.7BD + 54.8CD \quad (1)$$

که در رابطه (۱)؛ F_{max} : نیروی گسیختگی پیش بینی شده (نیوتن)، A: فشار (بار)، B: دامنه (میکرون)، C: زمان (ثانیه)، D: مقدار الیاف شیشه (درصد وزنی) است. رابطه (۱) مدل نهایی پیش بینی نیروی گسیختگی اتصالات نمونه های کامپوزیتی است که به روش التراسونیک جوشکاری شده اند. با داشتن پارامترهای فشار، دامنه، زمان، مقدار الیاف شیشه؛ می توان مقدار نیروی گسیختگی اتصال ایجاد شده را با این مدل با دقت بسیار خوبی تخمین زد. بر اساس این رابطه اگر مقدار الیاف ۱۰ درصد، دامنه ارتعاش ۳۳ میکرون، فشار و زمان به ترتیب ۱/۵ بار و ۰/۴ ثانیه انتخاب شود ماکزیمم مقدار نیروی گسیختگی جوش ها به دست

خواهد آمد (مقدار پهنه که به کمک نرم افزار تشخیص داده شد). همچنین با توجه به تصاویر ارائه شده در شکل های ۴ تا ۷ می توان به همین نتیجه رسید.

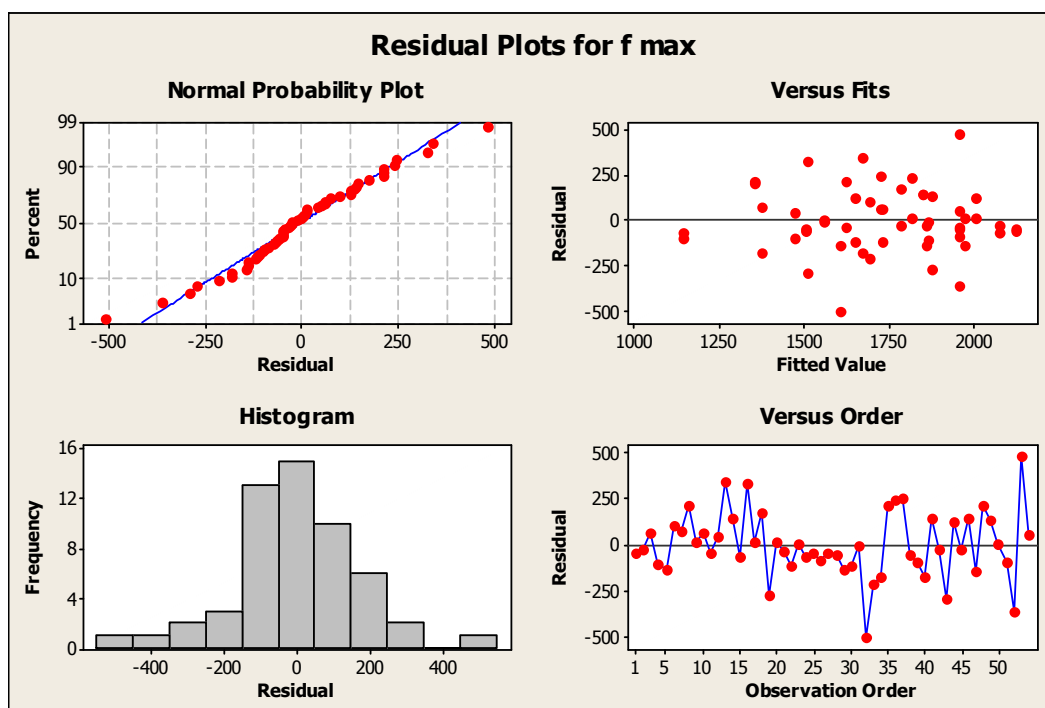
۳-۵- بررسی مقدار خطای مدل نهایی

با انجام ۵ آزمایش اضافه که در جدول ۵ نشان داده شده است مقدار نیروی گسیختگی به دست آمده از طریق آزمایش با مقدار نیروی تخمینی که از رابطه تجربی (۱) به دست آمد، مقایسه شد و مقدار خطای مدل تجربی محاسبه شد. همان طور که از جدول ۵ پیداست حداکثر خطای رابطه (۱) به اندازه ۶/۴۱٪ بوده است و این نشان می دهد که رابطه تجربی حاصل از این تحقیق دارای دقت قابل توجهی است.

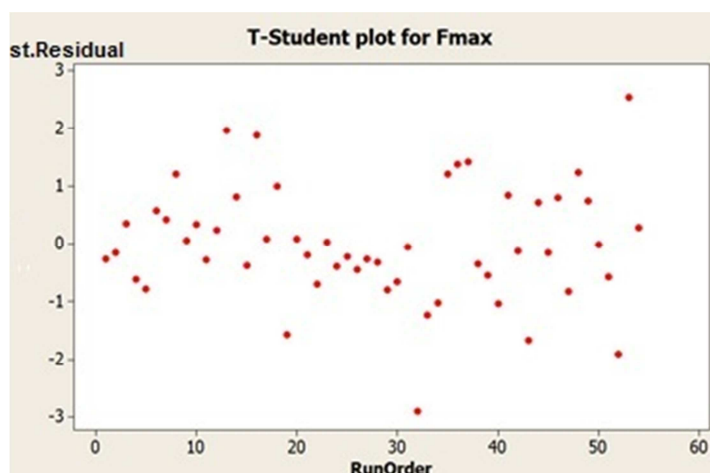
جدول ۴- آنالیز واریانس نیروی گسیختگی جوش (پس از حذف جملات نامؤثر)

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P value prob.	Significance
Regression	3128294	11	284390	26.16	0.000	*
Linear	1124265	4	169177	15.56	0.000	*
Pressure	15656	1	109078	10.04	0.003	*
amplitude	209616	1	250447	23.04	0.000	*
Time	29410	1	208173	19.15	0.000	*
%GF	869583	1	148869	13.70	0.001	*
Square	1097543	2	392997	36.16	0.000	*
Amplitude * Amplitude	51514	1	227734	20.95	0.000	*
%GF*%GF	1046029	1	693607	63.81	0.000	*
Interaction	906487	5	181297	16.68	0.000	*
Pressure*Amplitude	80120	1	80120	7.37	0.010	*
Pressure*Time	19317	1	36915	3.40	0.074	*
Amplitude*Time	506367	1	514768	47.36	0.000	*
Amplitude*%GF	96657	1	96657	8.89	0.005	*
Time*%GF	204025	1	204025	18.77	0.000	*
Residual error	358692	33	10869			
Pure error	225614	22	10255			
Total	3486986	44				

S = 104.257 PRESS = 727787
R-Sq = 89.71% R-Sq(pred) = 79.13%
R-SQ(ADJ) = 86.28%



شکل ۸- نمودار مانده های به دست آمده از تحلیل نیروی گسیختگی جوش



شکل ۹- نمودار T-Student به دست آمده از تحلیل نیرو

جدول ۵- آزمایش های ارزیابی مدل

خطا (%)	نیروی تخمینی (N)	(نیروی واقعی (N)	الیاف شیشه (%)	زمان جوشکاری (s)	دامنه ارتعاش (μm)	فشار (bar)	آزمایش
۴/۶	۱۱۹۷/۷۵	۱۲۵۵/۶۲	۳۰	۰/۴	۲۷	۱/۵	۱
۶/۴۱	۱۸۱۷/۱۴	۱۹۴۱/۷۵	۲۰	۰/۸	۳۰	۲/۵	۲
۵/۲۶	۱۰۵۴/۰۵	۱۱۱۲/۶۳	۲۰	۱/۲	۳۳	۱/۵	۳
۵/۰۶	۱۸۰۵/۱۲	۱۹۰۱/۴۹	۱۰	۰/۸	۳۰	۲	۴
۶/۲۵	۱۲۱۳/۹۱	۱۲۹۴/۸۴	۱۰	۱/۲	۳۳	۲/۵	۵

[3] Mazumdar S.K., Composites manufacturing, Materials, Product, and Process Engineering, by CRC Press LLC, 2002.

[۴] مسعود اسماعیلی، کامپوزیت ها، نشر طراح، ویرایش سوم، سال ۱۳۸۵.

[5] Taylor N.S., and Watson M.N., Welding techniques for plastics and composites, Joining and Materials, pp. 70-73, 1988.

[6] Dai X.Y., Bates P.J., Mechanical properties of vibration welded short- and long-glass-fiber-reinforced polypropylene, Composites, Part A, 39, pp. 1159-1166, 2008.

[7] Payeganeh G.H., Mostafa Arab N.B., Dadgar Asl, Y., Ghasemi F.A., and Saeidi Boroujeni M., Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds, International Journal of the Physical Science, Vol.6(19), pp.4595-4601, 2011.

[۸] احمدی، هیدی، تحلیل تجربی تاثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی

اغتشاشی بر خواص مکانیکی جوش لبه روی هم کامپوزیت پلی پروپیلن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۳۹۱.

[9] Yousef pour A., Hoojati M., Immarigeon J.P, Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. J. Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol 17(4), pp. 303-41, 2004.

[10] Benatar A., and Gutowski T.G. Ultrasonic welding of PEEK graphite APC-2 composites, Polymer Engineering and Science, Vol. 29(23), pp. 1705-1721, 1989.

[۱۱] باقرپور ابراهیم، جوشکاری پلاستیک ها، رجا تهران، جلد اول، سال ۱۳۸۴.

[12] Standard test method for tensile strength of Plastic, Annual book of ASTM standard, D 638, 2002.

[13] Standard test method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP), Annual book of ASTM standard, D 5868, 2002.

[14] S. Montgomery D. C., Design and analysis of experiments, Wiley, J, & Sons, 2ed Edition, New York, 1984.

[15] Nikoi R., Sheikhi M. M., Bani Mostafa Arab, N., Experimental Analysis of Effects of Ultrasonic Welding on Weld Strength of Polypropylene Composite Samples, IJE TRANSACTIONS C: Aspects, Vol. 28, No. 3 pp. 447-453, 2015.

۵- نتیجه گیری

با توجه به بررسی های انجام شده بر روی خواص مکانیکی و ظاهر جوش ها در اتصال کامپوزیت پلی پروپیلن در حالت لبه روی هم و تحلیل داده ها به کمک DOE و روش سطح پاسخ نتایج زیر حاصل شد:

۱- از جدول آنالیز ارائه شده می توان دریافت که دامنه ارتعاش هورن بیشترین اثر را بر استحکام جوش می گذارد و پس از آن، زمان، مقدار الیاف شیشه و فشار به ترتیب در رتبه های بعدی از نقطه نظر میزان اثرگذاری قرار دارند.

۲- از بین کنش و-واکنش ها، دامنه-زمان دارای بیشترین تأثیر بر استحکام است.

۳- افزایش پارامترهای فشار، زمان جوشکاری التراسونیک و نیز مقدار الیاف شیشه بر کیفیت ظاهری جوش ها اثر منفی می گذارد و میزان عیوب جوش ها را افزایش می دهد.

۴- براساس بررسی ظاهری جوش ها و نیز آزمایشات مکانیکی انجام شده در این تحقیق، اگر زمان جوشکاری ۰/۴ ثانیه، دامنه ارتعاش هورن ۳۳ میکرون، فشار نگهداری ۱/۵ بار و مقدار الیاف شیشه ۱۰ درصد انتخاب شود، نمونه های کامپوزیتی جوشکاری شده توسط روش التراسونیک کمترین میزان عیوب ظاهری و بیشترین استحکام کششی-برشی را خواهند داشت.

۶- مراجع

[1] Beheshti, M.H., Rezadoost, A.M., Rainforced Plastics (Composits), Iran polymer & petrochemical Institute, 2005.

[2] Chawla K.K., Composite materials, Springer-Verlag, New York, pp. 58-66, 1986.