



Effect of Process Parameters of Laser Welding on Tensile Strength of PP/EPDM/Clay Nanocomposite Welds Using Response Surface Methodology

Mohammad Reza Nakhaei Amrudi^{1*}, Ali Ahmadi², Nasrallah Bani Mostafa Arab³

¹Assistant Professor, Faculty of Mechanics and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

²MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

³Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.10.2022

Revised: 04.08.2022

Accepted: 04.16.2022

Keyword:

PP/EPDM/ Clay

Laser welding

Weld strength

Response surface methodology (RSM)

Nanocomposite

***Corresponding Author:**

Mohammad Reza Nakhaei

Amrudi

Email: m_nakhaei@sbu.ac.ir

ABSTRACT

Polypropylene/ ethylene-propylene-diene monomer/ Nanoclay (PP/EPDM/ Nanoclay) nanocomposite with different loadings of clay content is used in many industries because of balance on the tensile and impact strengths. Laser welding, as a fabrication method, is applied to the butt-welding of these nanocomposites. The input parameters (clay content, laser power, scan velocity, and stand-off-distance) were varied to achieve the best responses (tensile strength of welds). Response surface methodology (RSM) was utilized to relate the input parameters and the response. The effects of all input parameters on the responses were investigated. Results demonstrated that increasing the clay content from 0 to 6 wt% and increasing stand-off-distance from 5 to 8 mm decreased the tensile strength from 9.6 MPa to 6.1 MPa and 9.19 MPa to 8.36 MPa, respectively. The models showed that laser power of 100 W, traverse speed of 400–750 mm min⁻¹, and stand-off-distance of 5 – 6.5 mm, led to weld strength from 8 to 9.9 MPa.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Polypropylene/ethylene – propylene – diene monomer/nanoclay (PP/EPDM/nanoclay) nanocomposites with different loadings of clay content are used in many industries because of balancing on the tensile and impact strengths. Morphology, physical, mechanical, and other properties of these nanocomposites have been investigated in several studies. The widespread application of these nanocomposites shows that the investigation of their welding is important and necessary. On the other hand, there are various methods for welding composite or nanocomposites-based polymers. The novel method of vibration welding is used to welding of nylon polymers. Friction stir welding is applied to the welding of polyamide 6 polymers (PA6). The hot plate welding method is another novel way that can be utilized for welding polymer-based composites. Recently, laser welding has been considered an attractive method for welding different materials including thermoplastics and metals. Laser welding because of its outstanding advantages such as high quality, non-contact, high speed, and flexibility can be selected for welding nanocomposites among various novel methods. The key parameters of laser welding (i.e.; laser power, speed, and focal distance) in mechanical properties of laser welding of PP/clay nanocomposite have been investigated by various researchers. Based on the above discussion, the aim of this study was to investigate the effect of clay content and key laser welding parameters on the tensile strength of PP/EPDM/clay nanocomposites.

Methodology

Response surface methodology (RSM), a well-known method, was utilized in the present research. It is a collection of mathematical and statistical techniques that relates the input parameters to the output responses. RSM develops an appropriate mathematical model with the nearest fit to response that causes the prediction of the best input parameters in which the optimal response is achieved. The experiments were designed based on four factors at three levels. The nanocomposites were prepared in an internal mixer. The amount of PP/EPDM was fixed at 80/20 (wt/wt). The input parameters and their levels are shown in Table1.

Table 1. Input parameters and their levels

Input parameters	Units	Notations	Levels		
Clay	wt%	C	0	3	6
power	Watt	P	80	100	120
Welding speed	mm/min	V	400	750	1100
Stand-off distance	mm	S	5	6.5	8

Tensile strength of the welded samples was carried out at a cross head speed of 1mm/min according to ASTM D638. Scan electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) were utilized to evaluate the dispersion of nanoclay in the fracture surface of PP/EPDM welded samples.

Results and discussion

The design-Expert software suggests a quadratic model that has the best fit with responses. The F-test, lack-of-fit test, and analysis-of-variance (ANOVA) technique were utilized for the adequacy of the model. Validation of the developed model was evaluated with three confirmation experiments under new conditions of process parameters. The response of these new experiments was in good agreement with the predicted responses of the mathematical model. The results showed all of the input parameters to be effective in the tensile responses as shown in Figure 1.

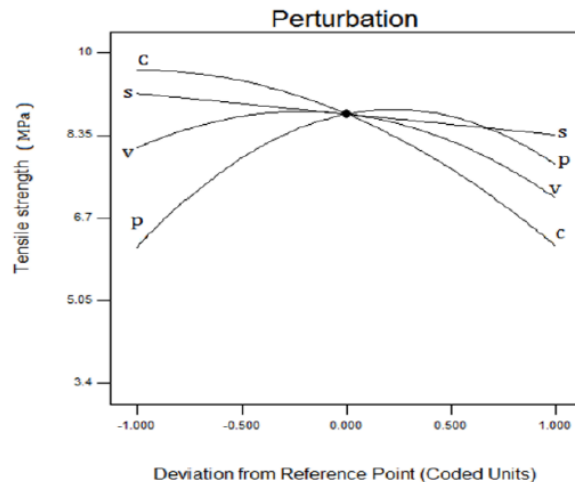


Figure 1. Effect of input parameters on response

Increasing clay content and stand-off distance led to a decrease in tensile strength. In addition, the effect of clay content on decreasing the responses was greater than the stand-off distance. TEM micrograph of fracture samples showed the dispersion of the clay content at higher loading of clay was weak. 1wt% of the clay caused good dispersion of the nanoparticles in PP/EPDM matrix. In the case of the stand-off distance, increasing this factor from 5 to 8 mm led to increasing of the beam diameter on the welding surface from 0.9 to 1.2 mm. Therefore, the power density at high levels of stand-off distance decreased resulting in low heat input, poor penetration, and weak tensile strengths. Regarding the laser power, an optimum laser power of 105 W led to the maximum tensile strength of the welds. The increase in laser welding had a negative effect on the tensile strength of the welds. This behavior was related to line energy (the ratio of laser power per welding speed). The best tensile welds were obtained when the line energy was at its optimum. Increasing laser power led to increasing line energy which caused better responses. Furthermore, increasing the line energy caused partial decomposition of the welds, as SEM of the surface of welds emphasized these phenomena. Increasing the welding speed decreased the line energy, thus the heat input to the base material and volume of melt decreased. Consequently, it led to a decrease in tensile strength at a high level of welding speed. The combination of laser power of 105W and the speed welding of 700 mm/min and the stand-off distance of 6.5mm is recommended to achieve a higher level of tensile strength.

Conclusion

In the present research, the effect of key process parameters of the laser welding and clay content on PP/EPDM nanocomposites were investigated and the following conclusions drawn:

- All input parameters had a major impact on the tensile strength of welds. The impact of stand-off distance was less than the other parameters.
- The mathematical model achieved from RSM methods could predict response at a higher 90% confidence level in comparison to the experimental test.
- Strength of laser welding of TPO, TPO3, and TPO6 nanocomposites was approximately 90%, 55%, and 35% of the tensile strength of the base nanocomposites, respectively.
- Increasing the clay content from 0 to 6 wt% and the stand-off distance from 5 to 8mm caused a decrease in tensile strength of welds by approximately 36% and 9%, respectively.
- The interaction of $P \times V$, $P \times S$ and $V \times S$, the combination of laser power of 100W, welding speed of 400-750 mm/min, and stand-off distance of 5mm were the optimal process parameters leading to the tensile strength of the weld joint of 10 MPa.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری لیزری بر استحکام کششی جوش نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن / اتیلن‌پروپیلن‌دی‌ان‌مونومر / خاک رس با استفاده از روش پاسخ سطح

محمد رضا نخعی امرودی^{۱*}، علی احمدی^۲، نصرالله بنی مصطفی عرب^۳

- ۱- استادیار، دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
- ۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

چکیده

نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن / اتیلن-پروپیلن-دی‌ان‌مونومر / خاک رس به دلیل تعادل در خواص مکانیکی استحکام کشش و ضربه، به‌طور گسترده در صنعت مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین مطالعه جوش‌پذیری آنها ضروری است. جوشکاری لیزری به‌عنوان یک روش اتصال، برای جوشکاری لب‌به‌لب این نانوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه تأثیر متغیرهای ورودی مثل مقدار نانوذرات خاک رس، توان لیزر، سرعت جوشکاری و فاصله کانونی برای دستیابی به بهترین پاسخ‌ها (بهترین استحکام کششی جوش‌ها) در چند سطح بررسی شد. روش پاسخ‌سطح برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر استحکام کششی جوش‌ها به‌کار گرفته شده است. نتایج نشان داد که افزایش مقدار نانوذره رس از مقدار ۰ تا ۶ درصد وزنی و افزایش فاصله کانونی از ۵ تا ۸ میلی‌متر به ترتیب باعث کاهش استحکام کششی از ۹/۶ به ۶/۱ و ۹/۱۹ به ۸/۳۶ تا ۷۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و فاصله کانونی ۵ تا ۶/۵ میلی‌متر جوش‌هایی با استحکام ۸ تا ۹/۹ مگاپاسکال به‌دست می‌آید.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

کلید واژگان:

پلی‌پروپیلن / اتیلن-پروپیلن-دی‌ان‌مونومر /
خاک رس
جوش لیزر
استحکام جوش
روش پاسخ‌سطح
نانوکامپوزیت

*نویسنده مسئول: محمد رضا نخعی

امرودی

پست الکترونیکی:

m_nakhaei@sbu.ac.ir



مقدمه

در سال‌های اخیر، نانوکامپوزیت‌های با پایه پلی‌پروپیلن^۱ در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۱؛ ۲]. در میان این نانوکامپوزیت‌ها به نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن/خاک رس^۲ توجه ویژه شده است که علت آن تغییرات قابل توجه در خصوصیات مکانیکی و حرارتی این مواد به‌ازای مقادیر کمی از نانوذره رس است [۳-۵]. از سوی دیگر افزودن نانورس به ماتریس پلی‌پروپیلن معمولاً از ضربه‌پذیری این مواد می‌کاهد [۶؛ ۷]. از آنجا که تعادل بهینه سفتی و ضربه‌پذیری در بعضی کاربردهای این مواد حائز اهمیت است؛ به این نانوکامپوزیت‌ها اصلاح‌کننده‌های ضربه اضافه می‌کنند. اتیلن-پروپیلن-دی‌ان مونومر^۳ به‌عنوان یک اصلاح‌کننده به دلیل ارتقای استحکام ضربه در بازه‌های مختلف دمایی نسبت به بقیه اصلاح‌کننده‌ها، به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود [۸؛ ۹]. بنابراین در نانوکامپوزیت‌های پروپیلن/اتیلن-پروپیلن-دی‌ان مونومر/خاک رس، خصوصیات مکانیکی به تعادل می‌رسد و برای همین کاربرد آنها در صنایع حمل‌ونقل و هوافضا و دیگر صنایع ارتقا یافته است [۹]. تا به امروز ریزساختار، خواص مکانیکی و فیزیکی این نانوکامپوزیت در مقادیر وزنی مختلف از پروپیلن، اتیلن-پروپیلن-دی‌ان مونومر و خاک رس بررسی شده است [۱۰؛ ۱۱]. کاربرد وسیع این نانوکامپوزیت اهمیت مطالعه روش‌های جوشکاری آنها را نشان می‌دهد. تا به حال، نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری با روش‌های مختلف، جوشکاری شده‌اند. بیت^۴ و همکارانش [۱۲] جوشکاری ارتعاشی نانوکامپوزیت پروپیلن/خاک رس در سطوح مختلف وزنی رس را بررسی کرده‌اند. آنها گزارش کردند که افزودن ۰ تا ۳ درصد وزنی از ذره خاک رس به نانوکامپوزیت باعث کاهش ۲۵ درصدی استحکام جوش می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر مختارزاده و همکارانش [۱۳] جوشکاری نانوکامپوزیت‌ها با روش صفحات داغ را بررسی کردند. تأثیرات پارامترهای اصلی جوشکاری با صفحات داغ و نیز تأثیرات سطوح متفاوت از مقادیر وزنی ذره خاک رس بر استحکام جوش را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که افزایش ذرات خاک رس استحکام کشش جوش را کاهش می‌دهد. اخیراً، پژوهشگران از جوشکاری لیزری کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها استفاده کرده‌اند. علت استفاده از این روش امتیازاتی مثل کیفیت و سرعت بالا، نبود تماس و انعطاف‌پذیری فرایند، آلودگی پایین و حرارت ورودی پایین به محل جوش است [۱۴-۱۶]. نخعی و همکاران، جوشکاری لیزری نانوکامپوزیت پروپیلن/خاک رس را بررسی کردند [۱۷؛ ۱۸]. آنها افزایش استحکام جوش‌ها را در سطوح بالای توان لیزر ۵۰ تا ۶۰ وات گزارش دادند. نتایج آنها نشان داد که افزایش نانوذره رس از ۰ تا ۶ درصد وزنی و افزایش سرعت جوشکاری از ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه به‌ترتیب باعث کاهش ۴۷ و ۱۹ درصدی در استحکام جوش شده است. آنها همچنین با توانی در سطوح ۴۵ تا ۶۰ وات و سرعت جوشکاری در سطوح ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه به جوش‌هایی با استحکام بهینه دست یافتند. همان‌طور که از پژوهش‌ها و مقالات استنباط می‌شود، مقدار نانوذرات رس و پارامترهای جوش لیزری تأثیرات قابل توجهی در استحکام جوش دارد و یافتن پارامترها با مقادیر بهینه در فرایند جوشکاری برای دستیابی به جوش‌هایی با استحکام مناسب، ضروری است.

در این مقاله، تأثیر مقدار نانوذره خاک رس و تأثیرات پارامترهای جوشکاری لیزری (توان لیزر، سرعت جوشکاری و فاصله کانونی) بر استحکام کشش جوش‌های لب‌به‌لب در نانوکامپوزیت پروپیلن/اتیلن-پروپیلن-دی‌ان مونومر/خاک رس بررسی شده است. همچنین، روش پاسخ سطح به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های بهینه‌سازی برای تحلیل و پیش‌بینی

¹ Polypropylene (PP)

² Nanoclay

³ Ethylene-propylene-diene monomer (EPDM)

⁴ Bates

تأثیرات پارامترهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی مورد استفاده قرار گرفته است تا جوش‌هایی با کیفیت مطلوب به دست آید.

مواد و روش انجام آزمایش

مواد

پلی‌پروپیلن (PP) Z30s، اتیلن-پروپیلن-دی‌ان‌مونومر (EPDM) KEP270، نانوذره خاک رس (Nanoclay) و کربن سیاه ۳۳۰ که به ترتیب از تولیدات شرکت پتروشیمی اراک، شرکت کمهو^۱ کره، شرکت سورتن^۲ آمریکا و شرکت بایر^۳ آلمان تهیه شدند. جدول ۱ مشخصات مواد خام مورد استفاده در تولید نانوکامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصه‌های مواد خام مورد استفاده در نانوکامپوزیت‌ها

ماده	گرید	شرکت سازنده	خصوصیات
PP	HP502N	Arak Petrochemical (Iran)	Density = 0.91 g/cm ³ and MFI at 230°C, 2.16 kg = 12 g/10 min
EPDM	KEP 270	Kumho polychem (Korea)	Mooney viscosity ML (1+8 min) 120°C = 48 M (64% ethylene and 8.7% ENB content), Density = 0.82 g/cm ³
Nanoclay	Cloisite 15A	Southern clay (USA)	specific gravity = 1.66 g/cc

روش پاسخ سطح^۴

روش پاسخ سطح مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که متغیر پاسخ را به مجموعه متغیرهای قابل کنترل ورودی مرتبط می‌کند. این روش تعداد محدودی آزمایش را براساس متغیرهای ورودی و سطوح مختلف آنها ارائه می‌کند. پس از انجام این آزمایش‌های تجربی و مشخص شدن پاسخ آن‌ها، روش پاسخ سطح، یک مدل ریاضی مناسب را ارائه و گسترش می‌دهد که منطبق با نزدیک‌ترین پاسخ‌ها برای مجموعه متغیرهای ورودی تعیین شده است. بنابراین این مدل می‌تواند برای هر ترکیبی از مقادیر مختلف پارامترهای ورودی (در محدوده متغیرهای ورودی انتخاب شده)، مقادیر پاسخ را پیش‌بینی کند. همچنین این مدل می‌تواند متغیرهای ورودی مناسب که منجر به پاسخ‌های بهینه می‌شوند را مشخص کند. معمولاً، در روش پاسخ سطح از یک چندجمله‌ای درجه دو مطابق معادله (۱) استفاده می‌شود [۱۸-۲۰].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن k بیانگر تعداد متغیرها و x_i و x_j متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد. همچنین، β_i و β_{ii} و β_{ij} ضریب رگرسیون معادله هستند. β_0 یک مقدار ثابت است و ε مقدار خطا را نشان می‌دهد.

¹ Kumho

² Southern

³ Bayer

⁴ Response surface methodology (RSM)

فرایند و طراحی آزمایش‌های تجربی

آزمایش‌ها براساس طرح باکس‌بنکن^۱ با چهار فاکتور ورودی در سه سطح مختلف طراحی شدند. پارامترهای متغیر ورودی، توان لیزر (P)، سرعت جوشکاری (V)، فاصله کانونی (S) و مقدار نانوذره رس (C) هستند. چند آزمایش اولیه برای یافتن محدوده پارامترهای جوش‌لیزر که با آن‌ها بتوان جوشکاری کرد، انجام شد. این کار با تغییر یک عامل و با ثابت نگه‌داشتن بقیه عوامل انجام شد. معیارهای انتخاب محدوده کاری هر پارامتر عبارت بودند از: نبود هرگونه عیوب چشمی در جوش مثل حرارت بالا و تخریب خط جوش و میزان عمق جوش. مقادیر سطوح رس در سه سطح ۰ و ۳ و ۶ درصد وزنی انتخاب شدند. سطوح متغیرهای ورودی، محدوده آن‌ها و نماد هر کدام در جدول ۲ ارائه شده است. نرم‌افزار Design expert v7 برای استخراج ماتریس طراحی آزمایش به کار گرفته شد. روش پاسخ سطح به منظور تحلیل داده‌های تجربی برای ارائه بهترین مدل منطبق با داده‌های پاسخ تجربی با استفاده از همان نرم‌افزار استفاده شد. میزان اهمیت آماری جملات مدل ارائه شده به وسیله F-test، Lack-of-fit و دیگر روش‌های اندازه‌گیری به کمک همان نرم‌افزار به منظور دستیابی به بهترین مدل مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲. متغیرهای ورودی انتخاب شده به همراه محدوده و نماد هر متغیر

پارامترها	واحد	علامت اختصاری	محدوده		
			۱	۰	-۱
خاک رس	wt%	C	۰	۳	۶
توان لیزر	Watt	P	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
سرعت جوشکاری	mm/min	V	۴۰۰	۷۵۰	۱۱۰۰
فاصله کانونی	mm	S	۵	۶.۵	۸

آماده‌سازی نانوکامپوزیت

نانوکامپوزیت‌ها، پس از مخلوط کردن پلی‌پروپیلن و اتیلن-پروپیلن-دی‌ان‌مونومر و ۰/۰۵ وزنی کربن سیاه برای جذب بهتر نور لیزر در یک دستگاه مخلوط‌کن داخلی^۲ آلمانی به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت روتور ۶۰ دور بر دقیقه آماده شدند (شکل ۱ الف) [۸؛ ۹]. ترکیب PP/EPDM بدون نانوذره و نانوکامپوزیت‌های PP/EPDM با ۳ و ۶ درصد وزنی از نانوذرات خاک رس به ترتیب با کدهای TPO، TPO3 و TPO6 نامگذاری شدند. مقدار پلی‌پروپیلن و اتیلن-پروپیلن-دی‌ان‌مونومر در تمام نمونه‌ها با درصد وزنی ثابت ۸۰ و ۲۰ درصد نگه داشته شده‌اند. سپس مواد به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۲۰ درجه با صفحات داغ دستگاه پرس Mini Test Press زیر فشار ۲۲ مگاپاسکال برای دستیابی به قطعه کار با ابعاد ۳/۲×۱۶×۲۰ میلی‌متر پرس شدند (شکل ۱ ب).

¹ Box Behnken

² Internal Mixer



شکل ۱. الف) دستگاه مغلوط کن داخلی، ب) دستگاه پرس داغ

جوشکاری لیزری

دستگاه جوش لیزر CO_2 با حداکثر توان ۱۲۰ وات و طول موج ۱۰۶۴۰ نانومتر استفاده شد (شکل ۲ الف). قطر پرتو لیزر روی قطعه کار در فاصله‌های کانونی ۵ و ۶/۵ و ۸ میلی‌متر به ترتیب ۰/۹ و ۱/۲ و ۱/۵ میلی‌متر بود. مطابق (شکل ۲ ب) از یک فیکسچر به منظور تماس صفحات قطعه کار و ایجاد فشار بین آنها در حین فرایند جوش لب‌به‌لب استفاده شد.



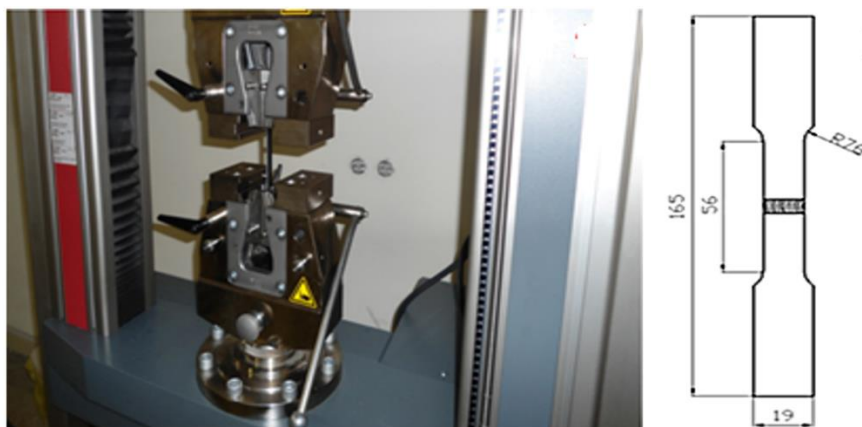
شکل ۲. الف) دستگاه جوش لیزر CO_2 ، ب) فیکسچر مورد استفاده در جوشکاری

آزمایش‌های مکانیکی

استحکام کشش نمونه‌ها به کمک دستگاه آزمایش کشش آلمانی ساخت شرکت زیویک مطابق با استاندارد ASTM D638 انجام شد. سرعت کشش فک‌ها ۱ میلی‌متر بر دقیقه بود که در شکل ۳ ابعاد نمونه‌ها و دستگاه آزمایش کشش نشان داده شده است. استحکام کشش نمونه‌های اولیه مطابق با همان استاندارد اندازه‌گیری شده و در جدول ۳ ارائه شده‌اند. همچنین پاسخ‌های اندازه‌گیری شده (استحکام جوش) میانگینی از ۳ آزمون انجام شده هستند که در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. استحکام کششی نمونه‌های اولیه ترکیب PP/EPDM و نانوکامپوزیت‌ها

نمونه‌ها	TPO	TPO3	TPO6
استحکام کششی (MPa)	۱۱.۰۵	۱۶.۳۵	۱۸.۰۰



شکل ۳. دستگاه و ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش

جدول ۴. ماتریس طراحی آزمایش همراه با متغیرهای ورودی و پاسخ‌های اندازه‌گیری شده

شماره آزمایش	C (wt%)	P (watt)	V (mm/min)	S (mm)	استحکام کششی (MPa)
۱	۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۵.۰۰	۹.۹۵
۲	۳.۰۰	۸۰.۰۰	۱۱۰۰.۰۰	۶.۵۰	۵.۲۶
۳	۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۱۰۰.۰۰	۶.۵۰	۷.۶۱
۴	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۸.۷۱
۵	۳.۰۰	۱۲۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۵.۰۰	۷.۵۲
۶	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۸.۸۶
۷	۳.۰۰	۱۲۰.۰۰	۱۱۰۰.۰۰	۶.۵۰	۵.۳۳
۸	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۸.۸
۹	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۱۰۰.۰۰	۸.۰۰	۷.۴۵
۱۰	۳.۰۰	۸۰.۰۰	۴۰۰.۰۰	۶.۵۰	۴.۴۵
۱۱	۳.۰۰	۱۲۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۸.۰۰	۷.۸۶
۱۲	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۹.۰۰
۱۳	۳.۰۰	۸۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۸.۰۰	۴.۹۳
۱۴	۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۴۰۰.۰۰	۶.۵۰	۹.۵
۱۵	۳.۰۰	۱۲۰.۰۰	۴۰۰.۰۰	۶.۵۰	۷.۹۶

شماره آزمایش	C (wt%)	P (watt)	V (mm/min)	S (mm)	استحکام کششی (MPa)
۱۶	۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۸.۰۰	۹.۰۴
۱۷	۳.۰۰	۸۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۵.۰۰	۷.۴۹
۱۸	۰.۰۰	۸۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۷.۰۵
۱۹	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۱۰۰.۰۰	۵.۰۰	۷.۰۰
۲۰	۶.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۸.۰۰	۶.۰۸
۲۱	۶.۰۰	۸۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۳.۴
۲۲	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۴۰۰.۰۰	۸.۰۰	۶.۸۴
۲۳	۶.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۱۰۰.۰۰	۶.۵۰	۴.۴۹
۲۴	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۸.۷
۲۵	۶.۰۰	۱۰۰.۰۰	۴۰۰.۰۰	۶.۵۰	۵.۵
۲۶	۰.۰۰	۱۲۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۸.۷۷
۲۷	۶.۰۰	۱۰۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۵.۰۰	۶.۳۱
۲۸	۳.۰۰	۱۰۰.۰۰	۴۰۰.۰۰	۵.۰۰	۸.۹۱
۲۹	۶.۰۰	۱۲۰.۰۰	۷۵۰.۰۰	۶.۵۰	۴.۹۹

بررسی ریزساختار و سطح جوش

سطح شکست و سطح جوش با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱، Tescan Vegall XMU ساخت شرکت سطح شکست و سطح جوش (چک) بررسی شد. برای مشخص شدن نحوه پخش نانوذرات خاک رس درون فاز ماتریس از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲ TFR430 ساخت کشور آلمان استفاده شد که آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از یک تیغه الماسی انجام شد که یک لایه نازک از نمونه با ضخامت ۷۰ تا ۸۰ نانومتر را جدا می‌کند. بعد از آن لایه برداشته‌شده درون دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری قرار داده شد و فازهای مختلف درون و نحوه پخش آنها مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج و بحث

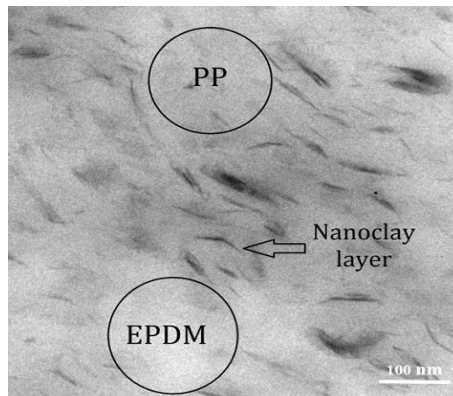
پخش نانوذرات در فاز پایه

نحوه پخش نانوذرات خاک رس درون فاز پایه نانوکامپوزیت TPO6 با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری بررسی شده است (شکل ۴). در این تصویر مناطق خاکستری نشان‌دهنده فاز PP و قسمت روشن‌تر فاز لاستیک EPDM را نشان می‌دهد. خطوط سیاه‌رنگ و تیره نشان‌دهنده ذرات خاک رس است و همان‌طور که دیده می‌شود لایه‌های خاک رس به‌خوبی در فاز پایه پخش شده و پدیده کلوخه شدن اتفاق نیفتاده است و باعث افزایش خواص

¹ Scanning electron microscopy (SEM)

² Transmission electron microscopy (TEM)

مکانیکی مثل استحکام کششی در ماده پایه شده است. نتایج به دست آمده از بررسی ریزساختار و نتایج استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها (جدول ۳) با هم مطابقت دارد.



شکل ۴. تصویر TEM از سطوح شکست نانوکامپوزیت PP/EPDM/6% Clay

توسعه و انتخاب مدل پاسخ

نرم افزار Design expert v7 برای تحلیل داده‌های تجربی و انطباق آن‌ها با بهترین مدل پاسخ به کار گرفته شده‌اند. طبق نتایج به دست آمده، چند جمله‌ای با بزرگ‌ترین درجه همراه با جمله‌های با اهمیت مدل را نشان می‌دهد و مدل‌های فاقد اعتبار حذف می‌شود (جدول ۵). همچنین (جدول ۶) مدلی با بیشترین ضریب همبستگی را توصیه می‌کند؛ بنابراین یک مدل درجه ۲ برای منطبق شدن با پاسخ‌های تجربی و تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول آنالیز واریانس مدل درجه ۲ در جدول ۷ نشان داده شده است. براساس این جدول، مقدار ضریب F در مدل استحکام کشش ۱۲۹/۹۴ است که نشان‌دهنده اعتبار مدل است (۱۵،۱۸). زمانی که مقدار ضریب P کمتر از ۰/۰۵ باشد، جمله‌های مدل، با اهمیت محسوب می‌شوند. همان‌طور که از جدول ۷ مشاهده می‌شود در این مدل، تمام پارامترهای ورودی و برهم‌کنش‌های $P \times V$ ، $P \times S$ ، P^2 ، C^2 ، $V \times S$ و V^2 از ضرایب مهم مدل هستند. بقیه جمله‌ها که مقادیر بزرگ‌تری از ۰/۰۵ دارند فاقد اهمیت هستند و از مدل حذف شدند. تمام ضرایب همبستگی^۱ در مقادیر بالاتر از ۹۰ درصد هستند و مطابقت خوبی با هم دارند. در نهایت، رابطه ریاضی برای پیش‌بینی استحکام کششی جوش در محدوده طراحی مشخص شده در زیر ارائه شده است. در حالت کدبندی به جای مؤلفه‌ها در سه سطح پایینی، میانی و بالایی به ترتیب از مقادیر ۱-، ۰ و ۱ استفاده خواهد شد در حالی که در حالت واقعی، مقادیر واقعی مؤلفه‌ها (برای مثال مقادیر ۰، ۳ و ۶ درصد برای نانوذرات خاک رس) در رابطه قرار خواهد گرفت.

برحسب مؤلفه‌های کدبندی:

$$\begin{aligned} \text{Tensile strength (MPa)} = & +8.78 - 1.76 \times C + 0.82 \times P - 0.50 \times V - 0.42 \times S + 0.22 \times C \\ & \times V - 0.86 \times P \times V + 0.73 \times P \times S + 0.63 \times V \times S - 0.88 \times C^2 - 1.84 \times P^2 - 1.18 \times V^2 \end{aligned} \quad (2)$$

¹ R-Squared

برحسب مؤلفه‌های واقعی:

$$\begin{aligned} \text{Tensile strength (MPa)} = & -30.19088 - 0.15746 \times C + 0.89649 \times P + 0.016867 \times V \\ & - 3.59333 \times S + 2.09524 \times 10^{-4} \times C \times V - 1.22857 \times 10^{-4} \times P \times V + 0.024167 \times P \times S \\ & + 1.2 \times 10^{-3} \times V \times S - 0.097864 \times C^2 - 4.60194 \times 10^{-3} \times P^2 - 9.62879 \times 10^{-6} \times V^2 \end{aligned} \quad (3)$$

جدول ۵. روش مجموع مربعات برای انواع مدل‌های چند جمله‌ای

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربعات اصلی	آزمون فیشر	ضریب پی
Mean vs Total	۱۴۸۸.۴۲	۱	۱۴۸۸.۴۲		
Linear vs Mean	۵۰.۴۵	۴	۱۲.۶۱	۸.۰۹	۰.۰۰۰۳
2FI vs Linear	۶.۹۶	۶	۱.۱۶	۰.۶۹	۰.۶۶۳۸
<u>Quadratic vs 2FI</u>	<u>۲۹.۷۷</u>	<u>۴</u>	<u>۷.۴۴</u>	<u>۱۴۹.۳۳</u>	<u><۰.۰۰۰۱</u>
Cubic vs Quadratic	۰.۶۲	۸	۰.۰۷۷	۵.۶۳	۰.۰۲۴۷
Residual	۰.۰۸۲	۶	۰.۰۱۴		
Total	۱۵۷۶.۳۰	۲۹	۵۴.۳۶		

جدول ۶. مدل پیشنهاد شده در نرم‌افزار با بیشترین ضریب همبستگی

مدل	انحراف معیار	ضریب همبستگی	ضریب همبستگی تعدیل یافته ^۱	ضریب پیش‌بینی	PRESS
Linear	۱.۲۵	۰.۵۷۴۱	۰.۵۰۳۱	۰.۴۰۹۵	۵۱.۸۹
2FI	۱.۳۰	۰.۶۵۲۳	۰.۴۶۰۷	۰.۱۹۸۶	۷۰.۴۲
<u>Quadratic</u>	<u>۰.۲۲</u>	<u>۰.۹۹۲۱</u>	<u>۰.۹۸۴۱</u>	<u>۰.۹۵۷۲</u>	<u>۳.۷۶</u>
Cubic	۰.۱۲	۰.۹۹۹۱	۰.۹۹۵۶	۰.۹۶۴۰	۳.۱۶

PRESS; Predicted Residual Error Sum of Squares

جدول ۷. آنالیز واریانس مدل استحکام جوش

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربعات اصلی	تست فیشر	ضریب پی
مدل	۸۷.۱۸	۱۴	۶.۲۳	۱۲۴.۹۴	<۰.۰۰۰۱
خاک رس (wt%)	۳۷.۲۸	۱	۳۷.۲۸	۷۴۷.۹۳	<۰.۰۰۰۱
توان لیزر (W)	۸.۰۹	۱	۸.۰۹	۱۶۲.۲۲	<۰.۰۰۰۱
سرعت جوشکاری (mm/min)	۳.۰۲	۱	۳.۰۲	۶۰.۵۹	<۰.۰۰۰۱
فاصله کانونی (mm)	۲.۰۷	۱	۲.۰۷	۴۱.۴۷	<۰.۰۰۰۱
C × P	۴.۲ × ۱۰ ^{-۳}	۱	۴.۲ × ۱۰ ^{-۳}	۰.۰۸۵	۰.۷۷۵۲
C × V	۰.۱۹	۱	۰.۱۹	۳.۸۸	۰.۰۶۸۸

¹ Adjusted R-Square

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربعات اصلی	تست فیشر	ضریب پی
$C \times S$	۰.۱۲	۱	۰.۱۲	۲.۳۲	۰.۱۵۰۰
$P \times V$	۲.۹۶	۱	۲.۹۶	۵۹.۳۶	<۰.۰۰۰۱
$P \times S$	۲.۱۰	۱	۲.۱۰	۴۲.۱۸	<۰.۰۰۰۱
$V \times S$	۱.۵۹	۱	۱.۵۹	۳۱.۸۵	<۰.۰۰۰۱
C^2	۵.۱۵	۱	۵.۱۵	۱۰۳.۳۶	<۰.۰۰۰۱
P^2	۲۲.۲۳	۱	۲۲.۲۳	۴۴۵.۹۹	<۰.۰۰۰۱
V^2	۹.۱۸	۱	۹.۱۸	۱۸۴.۲۷	<۰.۰۰۰۱
S^2	۰.۰۲۰	۱	۰.۰۲۰	۰.۳۹	۰.۵۴۱۱
باقیمانده ^۱	۰.۷۰	۱۴	۰.۰۵۰		
عدم تناسب ^۲	۰.۶۴	۱۰	۰.۰۶۴	۴.۲۰	۰.۰۸۹۷
ضریب همبستگی تعدیل یافته = ۰.۹۸۴۱		ضریب همبستگی = ۰.۹۹۲۱			
ضریب همبستگی پیش‌بینی = ۰.۹۵۶۲					

ارزیابی مدل

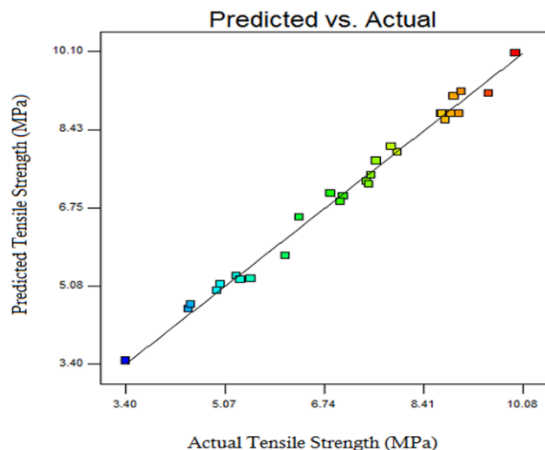
سه آزمایش تجربی در محدوده طراحی و متفاوت از ماتریس، طراحی شدند و به صورت تصادفی انتخاب گشتند تا اعتبار مدل، ارزیابی شود. پاسخ‌های آزمایش تجربی از اندازه‌گیری میانگین سه بار آزمایش به دست آمدند. پاسخ‌های مدل نیز با جای‌گذاری مقادیر ورودی در مدل محاسبه شدند. در جدول ۸ مقادیر پارامترهای ورودی جدید، پاسخ‌های تجربی، پاسخ‌های مدل و همچنین درصد خطای پاسخ مدل آمده است. شکل ۵ نمودار پاسخ‌های استحکام جوش واقعی در برابر پاسخ‌های پیش‌بینی شده از روابط را نشان می‌دهد؛ طوری که نقاط نزدیک به خط ۴۵ درجه هستند. شکل ۵ و جدول ۸ نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته نسبتاً دقیق است، همان‌طور که درصد خطای مقادیر آزمایش تجربی و مدل توسعه‌یافته کوچک هستند.

جدول ۸. اعتبارسنجی روابط تجربی استحکام جوش

C %	P W	V mm/s	F mm	استحکام کششی (MPa)	استحکام کششی پیش‌بینی شده (MPa)	مقدار خطا %
۰	۱۲۰	۴۰۰	۸	۹۰.۵	۸.۷۲	۳.۶۴
۳	۸۰	۷۵۰	۶.۵	۵.۸۶	۶.۱۲	۴.۴۳
۶	۱۰۰	۱۱۰۰	۵	۴.۶۱	۴.۴۷	۳.۰۳

¹ Residual

² Lack of Fit

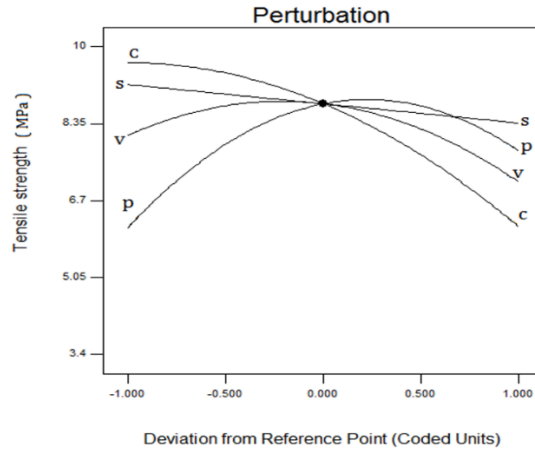


شکل ۵. پاسخ های استحکام جوش واقعی در برابر پاسخ های پیش‌بینی مدل

تأثیر پارامترهای فرایند بر استحکام جوش

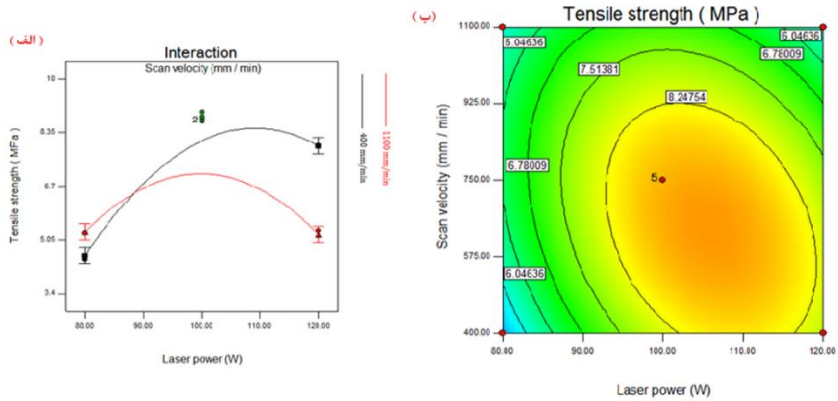
شکل ۶ نموداری را نشان می‌دهد که تأثیر همه فاکتورهای ورودی در محدوده طراحی را در نقاط میانی نشان می‌دهد. پاسخ‌های ترسیم‌شده در نمودار با تغییر یکی از پارامترهای ورودی و با تثبیت بقیه پارامترها مشخص شده‌اند. براساس شکل ۶ تغییرات موجود در نمودار چهار فاکتور ورودی نشان می‌دهد که استحکام جوش به همه فاکتورهای ورودی حساس است. براساس این شکل ماکزیمم استحکام کششی جوش‌ها در توان لیزری ۱۰۵ وات است. همچنین افزایش بیش‌ازحد سرعت جوشکاری، تأثیر منفی بر استحکام کششی جوش دارد. علت این رفتار به شرح زیر است: استحکام کششی جوش‌ها به شدت به انرژی خط بستگی دارد. انرژی خط نسبت توان لیزر به سرعت جوشکاری است که به صورت انرژی ورودی لیزر در واحد طول تعریف می‌شود [۱۶]. در مقادیر توان ۱۰۵ وات و سرعت جوشکاری ۷۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، مقدار خط انرژی بهینه است که مطلوب است؛ زیرا حجم بیشتری از مواد پایه ذوب شده‌اند که این موضوع منجر به افزایش استحکام جوش می‌شود و با نتایج قبل مطابقت دارد [۱۰؛ ۱۵]. در سطوح پایین‌تر از سرعت جوشکاری یا هنگامی که توان لیزری از مقادیر اشاره شده بیشتر می‌شود، انرژی خط بسیار بالا می‌رود که باعث سوختن جوش و تخریب خط جوش می‌شود و در نتیجه استحکام جوش را کاهش می‌دهد. همچنین توان لیزری کمتر یا سرعت جوشکاری بسیار بالا از انرژی خط می‌کاهد و میزان حرارت ورودی به قطعه کار کاهش می‌یابد و از حجم مذاب می‌کاهد که منجر به کاهش استحکام جوش می‌شود.

شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد که افزایش فاصله کانونی بر استحکام جوش تأثیر منفی دارد. همان‌طور که فاصله کانونی از مقادیر ۵ تا ۸ میلی‌متر افزایش می‌یابد، قطر پرتو در سطح جوشکاری از ۰/۹ به ۱/۲ میلی‌متر افزایش می‌یابد؛ بنابراین چگالی توان پایین‌تر، منجر به حرارت ورودی کمتر و عمق نفوذ ضعیف‌تر می‌شود که باعث کاهش استحکام کششی جوش می‌شود. در مورد نانوذره خاک رس، مشاهده می‌شود که افزایش مقدار آن در نانوکامپوزیت منجر به کاهش استحکام جوش می‌شود. این پدیده ممکن است به دلیل کاهش نفوذ پلی‌پروپیلن در بین لایه‌های نانوذره رس باشد که باعث کاهش استحکام جوش می‌شود [۱۴؛ ۱۷]. شایان ذکر است که پراکنندگی مناسب ذرات خاک رس در ماتریس، منجر به بهبود استحکام کششی می‌شود.

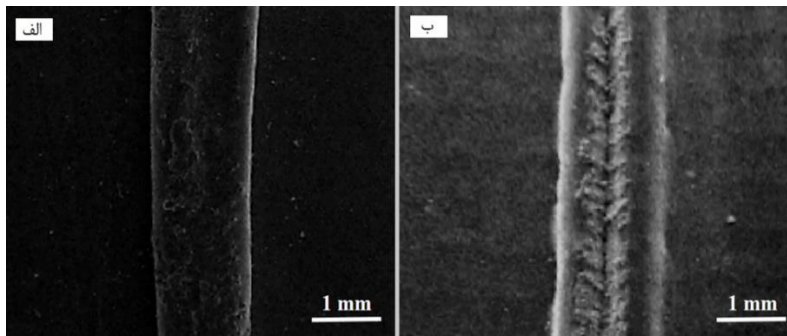


شکل ۶. تأثیر پارامترهای فرایند بر استحکام جوش

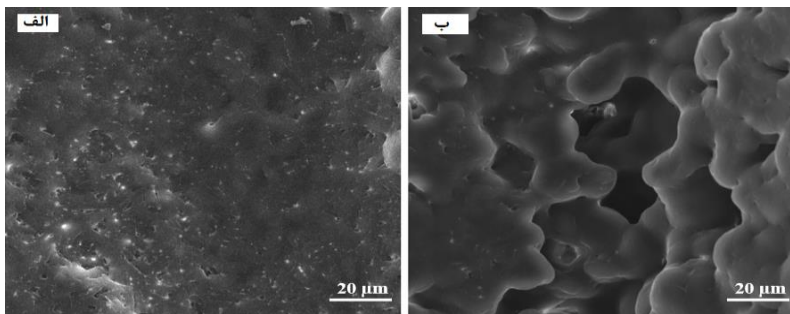
شکل ۷ تأثیر برهم کنش P و V را در مقادیر ثابت از بقیه پارامترها نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در توان ۸۰ وات، با تغییر سطوح سرعت جوشکاری، تغییر مهمی در استحکام جوش ایجاد نمی‌شود. همچنین در سرعت جوشکاری ۱۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در تمام سطوح توان لیزر، استحکام جوش پایین می‌ماند. در توان ۱۲۰ وات، افزایش سرعت موجب کاهش استحکام جوش می‌گردد. این رفتار مربوط به تغییرات خط انرژی است. در خط انرژی پایین، حجم کمی از ماده پایه ذوب می‌شود و بنابراین استحکام جوش کاهش می‌یابد. در خط انرژی بالا، ماده پایه ممکن است بسوزد و به صورت جزئی دچار تخریب شود و در نتیجه استحکام جوش کاهش یابد. در حالی که انرژی خط مناسب و بهینه باعث بالاترین استحکام جوش می‌شود؛ بنابراین توان لیزر و سرعت جوش بهینه‌ای که موجب خط انرژی بهینه شود، مطلوب است. جوشکاری در توان پایین و در سرعت‌های بالای جوشکاری، منجر به خط انرژی پایین می‌شود و نیز توان‌های بالا همراه با سرعت‌های پایین جوشکاری منجر به خط انرژی بالا می‌گردد؛ همان‌گونه که پیش‌تر در مورد آن بحث شده است. در توان ۱۰۰ تا ۱۲۰ وات، تأثیر سرعت جوشکاری کم است؛ زیرا مطابق جدول ۶ تأثیر توان لیزر (ضریب $F = 162/2$) بیشتر از سرعت جوشکاری (ضریب $F = 59/9$) است. براساس نتایج بالا، بهترین استحکام کششی جوش در مقادیر توان ۱۰۵ وات و سرعت ۷۰۰ میلی‌متر بر دقیقه به دست می‌آید. شکل‌های ۸ و ۹ (الف و ب) عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به جوش‌های با شرایط و بزرگنمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ الف نشان داده شده است جوش با توان ۱۰۵ وات، سرعت ۷۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و فاصله کانونی ۶/۵ میلی‌متر است که بهترین استحکام را دارند از لحاظ ظاهری مناسب است. شکل ۸ ب جوشی را نشان می‌دهد که در توان ۱۲۰ وات، سرعت ۴۴۰ میلی‌متر بر دقیقه و فاصله کانونی ۶/۵ میلی‌متر ایجاد شده است که به دلیل انرژی بالا باعث تخریب پلیمر و خط جوش شده است. همان‌طور که در شکل ۹ نیز دیده می‌شود زمانی که با بزرگنمایی بیشتر جوش‌ها بررسی می‌گردد انرژی بالای لیزر در جوشکاری باعث می‌شود تخریب پلیمر در سطح جوش حفره‌های ایجاد شود (شکل ۹ ب) که همین موضوع باعث کاهش شدید خواص مکانیکی می‌شود در حالی که در جوش با انرژی پایین‌تر، سطح جوش صاف و بدون عیب است (شکل ۹ الف).



شکل ۷. تأثیر برهم‌کنش توان (P) و سرعت جوشکاری (V) بر استحکام کشش جوش

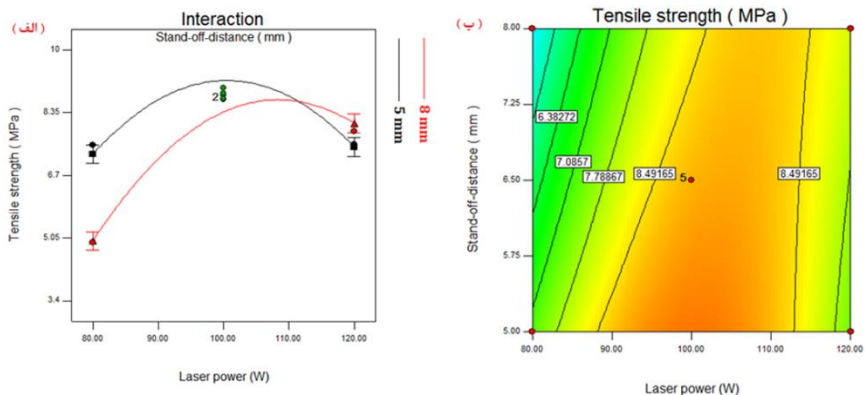


شکل ۸. عکس میکروسکوپ الکترونی مربوط به (الف) جوش با بیشترین استحکام و ظاهر مناسب (ب) جوش تخریب‌شده به دلیل انرژی زیاد.



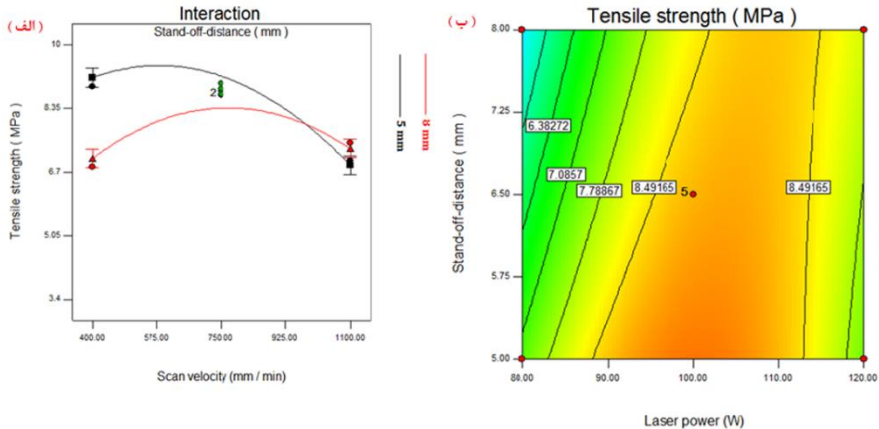
شکل ۹. عکس میکروسکوپ الکترونی با بزرگ‌نمایی بالاتر مربوط به (الف) جوش با بیشترین استحکام (ب) جوش تخریب‌شده

تأثیر برهم‌کنش P و S در شکل ۱۰ نشان داده شده است. واضح است که توان لیزر بهینه منجر به ایجاد بهترین استحکام می‌شود. در توان لیزر بالا، مواد پایه خواهد سوخت و دچار تخریب خواهد شد و چگالی توان پایین باعث کاهش عمق نفوذ جوش و جوش‌های ضعیف می‌شود. این شکل نشان می‌دهد در توان لیزر پایین، با افزایش فاصله کانونی، استحکام جوش پایین می‌آید. در توان‌های بالا، تأثیر فاصله کانونی بر استحکام کششی جوش پایین‌تر است. دلیل این پدیده این است که در توان لیزری پایین، کاهش فاصله کانونی باعث افزایش چگالی توان می‌شود اما در سطوح بالای توان لیزر، چگالی توان بالا است و تغییر فاصله کانونی تأثیر چندانی بر چگالی توان ندارد؛ زیرا تأثیر توان لیزر، بیشتر از فاصله کانونی است. مطابق با شکل، توان لیزری ۱۰۰ تا ۱۱۰ وات همراه با فاصله کانونی ۵ تا ۶/۵ میلی‌متر توصیه شده است.



شکل ۱۰. تأثیر برهم‌کنش توان (P) و فاصله کانونی (S) بر استحکام کششی جوش

در ارتباط با برهم‌کنش S و V که در شکل ۱۱ نشان داده شده است نتایج نشان داد در پایین‌ترین سرعت جوشکاری، با افزایش فاصله کانونی، استحکام کششی جوش کاهش می‌یابد که دلیل آن نبود تمرکز پرتو لیزر است که از چگالی توان می‌کاهد [۱۶؛ ۱۹]. در سرعت جوشکاری ۱۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، استفاده از پرتو متمرکز شده یا عدم تمرکز پرتو، تأثیر مهمی بر استحکام جوش ندارد. این امر به دلیل اثرگذاری بیشتر عامل سرعت جوشکاری بر استحکام کششی جوش نسبت به عامل فاصله کانونی است.



شکل ۱۱. تأثیر برهم کنش سرعت جوشکاری (V) و فاصله کانونی (S) بر استحکام کششی جوش

نتیجه گیری

در این تحقیق تجربی، تأثیر پارامترهای ماده و فرایند جوشکاری لیزری CO₂ بر نانوکامپوزیت پلی پروپیلن/ اتیلن- پروپیلن- دیان مونومر/ خاک رس مطالعه شده است و استحکام کششی جوشها در محدوده پارامترهای ورودی به کمک روش پاسخ سطح بهینه شده است. نتایج مهم زیر از این کار تجربی حاصل شد:

- ۱- همه پارامترهای ورودی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخها یا همان استحکام کششی جوشها دارند. مقدار ذره خاک رس، توان لیزر، سرعت جوشکاری و فاصله کانونی به ترتیب بیشترین تأثیر را روی پاسخها داشتند.
- ۲- مدل ریاضی به دست آمده از روش رویه پاسخ، با اطمینان بالای ۹۰ درصد می‌تواند پاسخهایی منطبق با آزمایش‌های تجربی را پیش‌بینی کند.
- ۳- بیشترین استحکام کششی جوش‌های نانوکامپوزیت‌های TPO، TPO3 و TPO6 به ترتیب در حدود ۹۰، ۵۵ و ۳۵ درصد استحکام مواد پایه بودند.
- ۴- افزایش مقدار نانوذره رس از صفر تا ۶ درصد وزنی و همچنین فاصله کانونی از ۵ تا ۸ میلی‌متر به ترتیب باعث کاهش در حدود ۳۶ و ۹ درصد استحکام کششی جوشها شدند.
- ۵- برحسب برهم کنش‌های P×V و P×S و V×S، ترکیبی از توان لیزری ۱۰۰ وات و سرعت جوشکاری ۴۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و فاصله کانونی ۵ میلی‌متر توصیه شده است که منجر به استحکام جوش در حدود ۱۰ مگاپاسکال می‌شود.

References

- [1] Asgari Aghdam, A., DadgarAsl, Y., & Sheikhi, M. (2021). Investigation of the effect of process variables on the mechanical properties of printed parts made of polyoxymethylene using a 3D printer by Fused Deposition Modeling (FDM). *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(1), 169-188. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.131056>
- [2] Nakhaei, M. R., Mostafapour, A., Dubois, C., Naderi, G., & Ghoreishy, M. H. R. (2019). Study of morphology and mechanical properties of PP/EPDM/clay nanocomposites

- prepared using twin-screw extruder and friction stir process. *Polymer Composites*, 40(8), 3306-3314. <https://doi.org/10.1002/pc.25188>
- [3] Ercan, N., Durmus, A., & Kaşgöz, A. (2017). Comparing of melt blending and solution mixing methods on the physical properties of thermoplastic polyurethane/organoclay nanocomposite films. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30(7), 950-970. <https://doi.org/10.1177/0892705715614068>
- [4] Haghnegahdar, M., Naderi, G., & Ghoreishy, M. H. R. (2017). Microstructure and Mechanical Properties of Nanocomposite Based on Polypropylene/Ethylene Propylene Diene Monomer/Graphene. *International Polymer Processing*, 32(1), 72-83. <https://doi.org/10.3139/217.3286>
- [5] Moghri, M., Zanjanijam, A. R., Seifi, L., & Ramezani, M. (2017). An Investigation on Rheological Behavior of the PVC/NBR/Nanoclay Nanocomposites by Torque Rheometry: The Effects of Formulation Variables Using Response Surface Approach. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 27(1), 264-273. <https://doi.org/10.1007/s10904-017-0682-x>
- [6] Izzati Zulkifli, N., Samat, N., Anuar, H., & Zainuddin, N. (2015). Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites. *Materials & Design*, 69, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.053>
- [7] Khodabandelou, M., Razavi Aghjeh, M. K., Khonakdar, H. A., & Mehrabi Mazidi, M. (2017). Effect of localization of carbon nanotubes on fracture behavior of un-vulcanized and dynamically vulcanized PP/EPDM/MWCNT blend-nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 149, 134-148. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.06.003>
- [8] Haghnegahdar, M., Naderi, G., & Ghoreishy, M. H. R. (2017). Fracture toughness and deformation mechanism of un-vulcanized and dynamically vulcanized polypropylene/ethylene propylene diene monomer/graphene nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 141, 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.01.015>
- [9] Mostafapour, A., Naderi, G., & Nakhaei, M. R. (2018). Effect of process parameters on fracture toughness of PP/EPDM/nanoclay nanocomposite fabricated by novel method of heat assisted Friction stir processing. *Polymer Composites*, 39(7), 2336-2346. <https://doi.org/10.1002/pc.24214>
- [10] Khosrokhavar, R., Naderi, G., Bakhshandeh, G., Hamid, M., & Ghoreishy, R. (2011). Effect of Processing Parameters on PP/EPDM/Organoclay Nanocomposites Using Taguchi Analysis Method. *Iranian Polymer Journal*, 20(1), 41-53. <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=188990>
- [11] Naderi, G., Lafleur, P. G., & Dubois, C. (2007). Microstructure-properties correlations in dynamically vulcanized nanocomposite thermoplastic elastomers based on PP/EPDM. *Polymer Engineering & Science*, 47(3), 207-217. <https://doi.org/10.1002/pen.20673>
- [12] Bates, P. J., Dyck, C., & Osti, M. (2004). Vibration welding of nylon 6 to nylon 66. *Polymer Engineering & Science*, 44(4), 760-771. <https://doi.org/10.1002/pen.20068>
- [13] Mokhtarzadeh, A., Benatar, A., & Wu, C-Y. (2004, May 16-20). *Experiments in hot plate welding of polypropylene nanocomposites*. Antec 2004 Plastics: Annual Technical Conference, Navy Pier, Chicago, Illinois . <https://tdl.libra.titech.ac.jp/journaldocs/en/recordID/article.bib-01/ZR000000269636?hit=-1&caller=xc-search>
- [14] Chen, M., Zak, G., & Bates, P. J. (2011). Effect of carbon black on light transmission in laser welding of thermoplastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(1), 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.017>

- [15] Liu, H. X., Yan, Z., Li, P., & Wang, X. (2014). Prediction of molten area in laser transmission welding of thermoplastic polymers. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(6), 487-492. <https://doi.org/10.1179/1362171814Y.0000000214>
- [16] Nakhaei, M. R., Mostafa Arab, N. B., Naderi, G., & Hoseinpour Gollo, M. (2013). Experimental study on optimization of CO2 laser welding parameters for polypropylene-clay nanocomposite welds. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(3), 843-848. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0109-8>
- [17] Acherjee, B., Kuar, A. S., Mitra, S., & Misra, D. (2012). Modeling and analysis of simultaneous laser transmission welding of polycarbonates using an FEM and RSM combined approach. *Optics & Laser Technology*, 44(4), 995-1006. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.10.018>
- [18] Nakhaei, M., Mostafa Arab, N., & Kordestani, F. (2012). Modeling of weld lap-shear strength for laser transmission welding of thermoplastic using artificial neural network. *Advanced Materials Research*, 445, 454-459. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.454>
- [19] Kumar, N., & Bandyopadhyay, A. (2017). Simulation of the Effects of Input Parameters on Weld Quality in Laser Transmission Welding (LTW) Using a Combined Response Surface Methodology (RSM)-Finite Element Method (FEM) Approach. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*, 36(4), 225-243. https://web.s.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jml=08981507&asa=Y&AN=121232956&h=f003G2cEpL_gw4LgnBSpeAQ2YyyvtdXJOWVkrPZd1uPQi8oNO3nE0RZrOlnSSEG5LIUzF1RlZr4BeeYa2qMh8w%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNotAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jml%3d08981507%26asa%3dY%26AN%3d121232956
- [20] Nakhaei, M. R., & Ghorbankhan, A. (2021). Experimental Investigation on Mechanical Properties of PA6/NBR/Graphene Nanocomposite by Response Surface Methodology. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(3), 327-341. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.275252.1405>