جوشکاری فراصوتی کامپوزیتهای گرماسخت تقویت شده با پارچه بافته شده شیشهای درحضور نانو ذرات

	دانشجوی دکترای، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه
شهيل ميرر الحمدي	تربیت مدرس، تهران، ایران، s.mirzaahmadi@modares.ac.ir
دامود اکب م	استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران،
فاووف الغبري	ايران، daakbari@modares.ac.ir
ارج احدزاده	استادیار، دانشکده شیمی، گروه شیمی فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
	ahadzadeh@tabrizu.ac.ir
سيد ابوالفضل حسيني بزدي	دانشیار، دانشکده شیمی، گروه شیمی معدنی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
	hosseiniyazdi@tabrizu.ac.ir

چکیدہ

آماده سازی کامپوزیتها قبل از جوشکاری و استفاده از پلیمر گرمانرم توام با نانوذرات از روشهای ایجاد اتصالات نوین میباشد. در این پژوهش استحکام مکانیکی اتصال کامپوزیتهای گرماسخت آماده سازی سطحی شده با H شیمیایی و با بکارگیری پلیمر پلی وینیل کلراید در حضور نانو ذره اکسید آلومینیوم بررسی شده است. آنالیز حرارتی پلی وینیل کلراید حاوی درصدهای وزنی مختلف نانو ذرات اکسید آلومینیوم بیانگر افزایش ۴۵ درصدی رسانایی گرمایی است. مدل رگراسیون براساس مدل سطح پاسخ با استفاده از پارامترهای موثر زمان جوشکاری، درصد وزنی نانو ذرات و رسانایی گرمایی بدست آمده از آنالیز واریانس جهت پیش بینی بیشینه نیرو و جابجایی شکست اتصال ارائه شده است. نتایج نشاندهنده بیشینه استحکام شکست ۵۹ مگاپاسکال و بیشینه کرنش شکست ۲۰٫۴ نمونه جوش داده شده در حضور ۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم میباشد. افزایش به ترتیب ۱۳ و ۱۲٫۸ برابری بیشینه استحکام کشک و کرنش شکست محل اتصال در قیاس با نمونههای پلی وینیل کلراید خالص بیانگر بهبود خواص مکانیکی میباشد. بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی نان میکست محل اتصال در قیاس با نمونههای پلی وینیل کلراید خالص بیانگر بهبود خواص مکانیکی میباشد. بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی نان

واژههای کلیدی: نانو ذرات، نانو کامپوزیت، جوشکاری فراصوتی، آماده سازی سطحی شیمیایی، مدل سطح پاسخ، مدل رگراسیون چندمتغیره.

Ultrasonic welding of thermosetting composites reinforced with glass woven fabric with the presence of nanoparticles

S. Mirzaahmadi	Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
D. Akbari	Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
I. Ahadzadeh	Department of Physical Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran
S. A. Hosseini-yazdi	Department of Inorganic Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Preparing composites before welding and using nanocomposites is one of the new methods of joining. In this research, the mechanical strength of thermosetting composites surface prepared by chemical etching using polyvinyl chloride (PVC) polymer in the presence of aluminum oxide nanoparticles has been investigated. Thermal analysis of PVC containing different weight percentages of aluminum oxide nanoparticles shows a 45% increase in thermal conductivity. A regression model based on the response surface methodology using the effective parameters of welding time, weight percentage of nanoparticles and thermal conductivity obtained from variance analysis was developed to predict the maximum force and displacement of joint failure. The results show the maximum breaking strength and strain of 59 MPa and 0.04 of the welded sample, respectively, in the presence of 1% by weight of aluminum oxide nanoparticles. The increase of 1.3 and 1.2 times of the maximum tensile strength and breaking strain of the joint, respectively, in comparison with pure PVC samples, indicates the improvement of mechanical properties. Examining the microstructure with SEM shows that a uniform connection has been established along the weld line. **Keywords:** Nanoparticles, Ultrasonic welding, Chemically pretreated surface, Response Surface Methodology, Multiple regression model.

امکان پذیرکرده است. در واقع جوش ذوبی کامپوزیتهای گرماسخت با بکارگیری لایه واسطهای از جنس گرمانرم بر روی سطح آماده سازی شده امکانپذیر میباشد[۱ و ۲]. ایجاد اتصال قوی بین پلیمر واسطه و کامپوزیتهای گرماسخت بعنوان نقطه بحرانی مطالعات بستگی به تعداد زیادی از زمینههای فیزیکی و شیمیایی دارد. درک درست از پارامترهای موثر در برقراری چسبندگی بین دو سطح کامپوزیتهای گرماسخت با پلیمرهای گرمانرم و ایجاد اتصالی کارامد مورد توجه این

۱– مقدمه

اتصال به روش جوشکاری ذوبی کامپوزیتهای گرماسخت بدلیل عدم ذوب و خمیری شدن ساختار مولکولی و وجود پیوند عرضی شدید امکان پذیر نمی باشد. لذا پژوهشهای اخیر صورت گرفته با ایجاد تمهیداتی، جوشکاری پلیمرهای گرماسخت را با استفاده از روش آماده سازی سطح قبل از جوشکاری ذوبی به روش مکانیکی و روش شیمیایی

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: daakbari@modares.ac.ir تاریخ دریافت: ۱۱/۱۱/۵۰ تاریخ پذیرش: ۲۱/۰۶/۲۰

مطالعه قرار گرفته است. مکانیزم اتصال کامپوزیتهای گرماسخت آماده سازی سطحی شده از طریق قفل شدن مکانیکی سطوح در هم بر اساس نظریه هنسن می اشد. سطوح مواد پلیمری در مقیاس میکرو همواره دارای پستی و بلندی هایی میباشند و کاملا صاف نمیباشند. با نفوذ لايه واسط بعنوان ماده چسبنده در داخل حفرات، خلل و فرج ها و ناپیوستگیهای سطحی کامپوزیتهای پایه پلیمری آماده سازی سطحی شده و با منجمد شدن تدریجی ماده چسبنده ذوب شده نوعی قفل شدگی مکانیکی بین ماده چسبنده و الیاف رخ خواهد داد. یکی از عوامل مهم در افزایش چسبندگی سطوح استفاده از روش های شیمیایی و مکانیکی جهت ایجاد سطوحی با زبری بالا می باشد. در مواردی که ماده چسبنده به دلیل زنجیرهای مولکولی طویل و ويسكوزيته بالا قادر به حركت و نفوذ سريع در اين حفرات نمى باشد از چنین روشهایی جهت افزایش تر شوندگی سطوح استفاده می شود[۳]. عملیات H کردن در مراحل بعدی جوشکاری بسیار موثر است. بنابراین، اگر نمونهها به صورت جزئی H شوند، پلیمر گرمانرم ذوب شده بهصورت موضعی جوش داده می شود و همچنین استحکام پیوند کاهش مییابد. رزین اپوکسی موجود در کامپوزیت گرماسخت غنی از عناصر اكسيژن و هيدروژن است، بنابراين با استفاده از محلول غليظ اسید سولفوریک به راحتی می توان آن را H کرد. در واقع اسید سولفوریک به دلیل خاصیت آب زدایی قوی، مولکولهای آب پلیمر را از بین می برد. علاوه بر این، در صورت نفوذ بیش از حد اسید و حذف ماتریس، پارچه شیشه لایه لایه شده و همچنین شکسته می شوند و در نتيجه استحكام مكانيكي كل نمونه كاهش مي يابد. بنابراين، فرآيند H كردن تنها تا رسيدن به مرحله حذف تنها يك لايه پارچه شيشه بدون اپوکسی انجام میشود. شکل ۱ چیدمان کلی دستگاه جوشکاری فراصوتي را نشان ميدهد [۴].



شکل ۱- چیدمان دستگاه جوشکاری فراصوتی

جوشکاری فراصوتی بدلیل ایجاد اتصال در دمایی پایینتر از دمای ذوب پليمرها و حذف احتمال تخريب حرارتي پليمرها مورد توجه صنایع در بکارگیری آن جهت اتصال کامپوزیتهای گرماسخت شده است. جوشکاری فراصوتی از نظر زمانی در ۳ مرحله به ترتیب، زمان تاخیر، زمان جوشکاری و زمان نگهداشت انجام می گیرد [۲، ۵ و ۶]. مرحله اول مدت زمانی است که از لحظه فشرده شدن دکمه start دستگاه تا ارتعاش هورن و شروع فرایند جوشکاری طول میکشد. اعمال میزان مطلوبی از فشار کاری موجب فراهم نمودن سطح تماس اولیه بین پلیمرها با هورن و پلیمرها با یکدیگر می شود. اعمال بیش از اندازه این نیرو سبب تغییر شکل نمونهها و کاهش آن نیز دلیل بر عدم ایجاد سطح تماس مناسب میباشد. در مرحله دوم با ثابت در نظر گرفتن میزان فرکانس و دامنه ارتعاش، مدت زمان جوشکاری بعنوان پارامتری مهم امکان ایجاد فرصت مناسب برای تبدیل انرژی فراصوتی به گرمای مورد نیاز جهت ذوب پلیمرها در محل اتصال را فراهم میکند. افزایش بیش از اندازه زمان جوشکاری باعث تخریب حرارتی پلیمرها و کاهش آن نیز مانع از ذوب کافی پلیمرها در محل اتصال خواهد شد. در مرحله سوم، مدت زمان نگهداشت هورن بر روی سطح نمونهها در غیاب اعمال ارتعاش بایستی به حد کافی باشد تا این امکان را جهت شکل گیری مناسب جوش توسط پلیمرهای ذوب شده را بدهد. در این مرحله نیز نمونهها در دمای محیط خنک می شوند. با توجه به اهمیت فشار اعمالی، زمان جوشکاری و زمان نگهداشت در جوشکاری فراصوتی، هر ۳ پارامتر بعنوان پارامترهای موثر فرآیند جوشکاری انتخاب شده و تستهای تجربی اولیه جهت مشخص نمودن محدوده تغییرات هر کدام از پارامترها انجام شده است. هراس و همکاران [۷] به مطالعه پارامترهای فرآیندی موثر چون فشار اعمالی و زمان جوشکاری در اتصال فراصوتی کامپوزیتهای گرماسخت تقویت شده با الیاف کربن و جفت شده با لایه ای از جنس پلیمر گرمانرم پلی اتر اتر کتون پرداخته-اند. نتایج بیانگر بکارگیری فشار اعمالی بهینه ۳٫۸ مگاپاسکال جهت اتصال با کیفیت بوده است. همچنین، مقدار بهینه زمان جوشکاری متناسب با نوع پیکربندی فیزیکی اتصال بوده است. علاوه براین اتصال بهینه با بکارگیری انرژی ورودی فراصوتی با مقدار ۶٬۸ ژول بر میلیمتر مربع بدست آمده است. طبق مطالعات صورت گرفته افزودن نانو ذرات تا سطح استاندارد مشخصی از درصد وزنی با توزیع همگن و بدون كلوخهاى شدن باعث افزايش سطح موثر براى انتشار امواج فراصوتي شده است. افزایش سرعت انتشار موج در پلیمر با حضور نانو ذرات و افزایش انرژی فراصوتی جذب شده توسط نانو کامپوزیت در مقایسه با پلیمر خالی از نانو ذرات، احتمالا بدلیل مدول الاستیسیته مکانیکی بالای نانو ذرات میباشد[۸]. همچنین با استفاده از نانوذرات از تخریب حرارتی بواسطه توزیع یکنواخت گرما در سطح وسیعی از اتصال جلوگیری بعمل آمده و مانع افزایش موضعی دما بواسطه افزایش زمان جوشکاری شده است. در نتیجه می توان به اتصالاتی با کیفیت مطلوب در زمانهای جوشکاری بالا دست یافت [۹ و ۱۰]. نیکوی و همکاران [۱۱] به بررسی جوشکاری فراصوتی کامپوزیتهای پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه به ضخامت ۴ میلیمتر پرداختهاند. در مطالعه صورت گرفته به بررسی تاثیر زمان جوشکاری، دامنه ارتعاش، فشار اعمالی و مقدار الیاف شیشه بر روی استحکام کششی – برشی اتصال پرداخته شده است. آنالیز واریانس انجام شده دامنه ارتعاش و فشارکاری

را به ترتیب بعنوان موثرترین و کم تاثیرترین پارامترها پیش بینی کرده است. همچنین تاثیر متقابل دامنه-زمان جوشکاری بر روی استحکام و عدم تاثير متقابل فشار-الياف، مجذور فشار و مجذور زمان بر روى استحكام از نتايج با اهميت مدل بوده است. هالتمانسپاتر و همكاران [۱۲] به بررسی استحکام اتصال ورقهایی از جنس اپوکسی تقویت شده با الیافهای کربن و آماده سازی سطحی شده به دو روش پلاسما با فشار گازی اتمسفر (روش فیزیکی) و پرتاب ذرات ساینده در محیط خلاء (روش مكانيكي) پرداختهاند. نتايج نشان دهنده افزايش استحكام برشی اتصال لب رویهم ورقها از مقدار متوسط ۱۸ مگاپاسکال برای نمونه ای بدون آماده سازی سطحی تا مقادیر ۳۰ و ۳۱ مگاپاسکال به ترتیب برای روش آماده سازی سطحی پلاسما و ذرات ساینده میباشد. میجوویچ و کوتسکی [۱۳] به بررسی تاثیر مواد H کننده مختلف بر روى آماده سازى سطح پليمرها پرداخته است. اين مواد باعث افزايش زبری سطح، فعال شدن شرایط شیمیایی سطح، تغییر در مورفولوژی و ایجاد حفرات در سطح، تغییر شرایط الکتریکی کلی سطح بدلیل ایجاد گروه های فعال قطبی غیر اشباع و حذف عناصر با نسبت وزن مولکولی پایین از سطح میشوند. لیونتو و همکاران [۱۴] به بررسی جوش فراصوتی و القایی کامپویتهای پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن با بكارگیری یک لایه گرمانرم جفت شده پلی وینیل بوتیرال پرداخته-اند. نتایج بیانگر حداکثر استحکام برشی در اثر مکانیزم اتصال از نوع قفل شوندگی مکانیکی بوده است. ژی و همکاران [۱۵] به مطالعه جوشكارى فراصوتى نمونههاى كامپوزيتى تقويت شده با الياف كربن و جفت شده با یک لایه گرمانرم از جنس پلی آمید ۶۶ پرداختهاند. انرژی ورودى جوشكارى بالاتر از حد مشخص باعث تجزيه حرارتى كامپوزيت و كاهش استحكام كششى قطعات جوشكارى شده است. فونگ و همکاران [۱۶] به بررسی تاثیر مدت زمان جوشکاری مایکروویو و نانو سیلیکون کارباید جهت اتصال نمونههایی از جنس پلیمر گرمانرم پلی پروپيلن پرداختهاند. نتايج نشاندهنده توانايي نانو سيليكون كاربايدها در جذب انرژی مایکروویو و تبدیل آن به گرمای مناسب جهت افزایش دما و جوشکاری مناسب نمونههای پلیمری بوده است. لی و همکاران [۱۷] به بررسی تاثیر نانو لولههای کربنی چند جداره در جوشکاری فراصوتی پلیمرهای پلی پروپیلن پرداختهاند. با بکارگیری ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی از نانو ذرات امکان آنالیز شکست محل اتصال بدون کاهش استحکام برشی اتصال لب رویهم فراهم شده است. با افزایش نانو ذرات به ۲۵ درصد وزنی، استحکام برشی بواسطه ماهیت ترد محل اتصال كاهش يافته است. نتايج بيانگر نقش مهم نانو لولههاى كربنى جهت مانيتور كردن در لحظه تغييرات مقاومت الكتريكي لايه واسطه بوده است. در این مطالعه، اثر نانوذرات اکسید آلومینیوم در لایه واسط پلی وینیل کلراید (PVC) بر جوشپذیری و استحکام کششی اتصال لب رویهم و فراصوتی کامپوزیتهای گرماسخت تقویت شده با پارچه بافته شده شیشهای بررسی شده است. از فرآیند H شیمیایی به عنوان روشی برای آماده سازی سطح گرماسختها برای ایجاد ارتباط بین لایه واسط و پارچه شیشهای از طریق درهم تنیدگی مکانیکی بهره گرفته شده است. همچنین با استفاده از روش ریخته گری محلول برای قرار دادن یک لایه واسط همگن و یکنواخت از PVC شامل نانوذرات بر روی سطح کامپوزیتهای گرماسخت استفاده شده است. رسانایی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه PVC به عنوان لایه واسط در حضور بیشینه ۱ درصد وزنی

نانو ذرات اکسید آلومینیوم با استفاده از دستگاه "دیسک لی" و کالریمتری روبشی تفاضلی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه براین از مدل سطح پاسخ جهت بررسی تاثیر سه پارامتر موثر زمان جوشکاری، درصد وزنی نانو ذرات و رسانایی گرمایی بر روی بیشینه نیرو و جابجایی شکست محل اتصال استفاده شده است. مدل رگراسیون چند متغیره برای ارائه یک معادله با در نظر گرفتن رابطه مستقل و وابسته پارامترهای موثر جهت پیش بینی بیشینه نیروی شکست و حداکثر جابجایی تا لحظه شکست ناحیه جوش بکار گرفته شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

خواص ترموفیزیکی کامپوزیت گرماسخت تقویت شده با پارچه بافته شده شیشهای و گرانول PVC تولید شرکت LG کره با متوسط درجه پلیمریزاسیون ۹۱۲ در جدول۱ گردآوری شده است. همچنین خواص مکانیکی کامپوزیت گرماسخت، کامپوزیت گرماسخت H شده و پارچه بافته شده شیشهای به ضخامت ۲۷۰ میکرون در جدول۲ نشان داده شده است. تمام مواد شیمیایی بکارگرفته شده در سنتز نانو ذرات اکسید آلومینیوم و همچنین حلال تتراهیدروفوران ساخت شرکت مرک آلمان میباشد.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی کامپوزیت گرماسخت تقویت شده با پارچه شیشه و لایه واسط PVC

ضریب انبساط گرمایی(K ⁻¹)	رسانایی گرمایی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	چگالی (g.cm ⁻³)	مواد
۱,۶×۱۰ ^{-۵}	•,٣•	۱٫۸۳	كامپوزيت
۱•×۱• ^{-۵}	•,18	١,٣٨	PVC

جدول ۲- خواص مکانیکی کامپوزیت گرماسخت، کامپوزیت گرماسخت H شده و پارچه بافته شده شیشهای

كرنش(./)	مدول الاستيسيته (GPa)	تنش شکست (MPa)	مواد
۹,۰۰	۵٫۵	77.	كامپوزيت
۵,۰۰	٣٫١	171	کامپوزیت H شدہ
•,1V	۲١,٠	798.	پارچه شیشهای

ضریب انبساط گرمایی توسط دستگاه TMA-۵۰۰ ساخت شرکت Polymer Laboratories کشور انگلستان اندازه گیری شده است. آنالیز بصورت هم دما در حضور گاز نیتروژن و در دمای محیط با اعمال نیروی ۲٬۰۵ نیوتنی انجام گرفته است. اندازهگیری ظرفیت گرمایی ویژه و دمای انتقال شیشهای نمونههای PVC و کامپوزیت تقویت شده با پارچه شیشهای با استفاده از دستگاه کالریمتری تفاضلی روبشی مدل پارچه شیشهای با استفاده از دستگاه کالریمتری نفاضلی روبشی مدل درجه سلسیوس در محدوده دمایی ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس در اتمسفر نیتروژن انجام شده است. از جوشکاری فراصوتی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۲۰۰۰ وات جهت اتصال نمونهها استفاده شده است. خواص مکانیکی نمونهها با استفاده از دستگاه کشش ساخت شرکت

Zwick-Roell آلمان بدست آمده است. جوشکاری بوسیله دستگاه فراصوتی ساخت شرکت ایرانی آماج سونیک (مدل ۲۰۰۰ وات و ۲۰ کیلوهرتز) با کنترلر MPLC02 انجام شده و از هورن طراحی شده آج دار مستطیلی شکل آلومینیومی به ابعاد ۲۵ × ۸۰ میلیمتر با گام آج ۱٫۵ میلیمتر استفاده گردیده است. پس از جوشکاری نمونهها، از دستگاه کشش ۲۰-STM ساخت شرکت سنتام ایران برای انجام آزمایش کششی نمونه ها با طول گیج ۱۰۰ میلیمتر با سرعت کشش فک ۱ میلیمتر بر دقیقه استفاده شده است. همچنین مقاطع اتصال نمونهها با بكارگیری میكروسكوپ الكترونی روبشی -MIRA3 FEG SEM ساخت شرکت Tescan کشور چک بررسی شده است. جهت اندازه گیری رسانایی گرمایی از دستگاه دیسک لی استفاده شده است[1٨]. دستگاه دیسک لی طبق مدل موجود و براساس مقاله ذکر شده در محیط آزمایشگاه طراحی و ساخته شده است. دستگاه از سه دیسک آلومینیومی به قطر ۲۰ میلیمتر و به ضخامت ۱۰ میلیمتر با سوراخی در لبه بالایی دیسک برای قرار دادن ترموکوپلها برای کنترل دما ساخته شده است. یک المنت الکتریکی با توان ۴۰±۰۰ وات بین دیسک ۱ و دیسک ۲ قرار داده شده که خود نیز به منبع تغذیه DC متصل شده است. المنت گرمایی دمای دیسک اول را افزایش میدهد و گرما به دلیل وجود لاستیک سیلیکونی در دو طرف المنت، به صورت متمرکز و یکنواخت به دیسک دوم منتقل می شود. همچنین، نمونههای پلیمری ریخته گری شده با یا بدون حضور نانوذرات بین دیسک ۲ و دیسک ۳ قرار گرفتهاند. علاوه بر این، نیروی استاتیکی ۴۹٬۰۵ نیوتن (۵ کیلوگرم) بر روی دیسک ۳ اعمال شده است. بعد از به حالت پایدار رسیدن سه دماسنج پس از تقریباً ۱۲ ساعت دماها خوانده شده است. طرح دستگاه ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.





شکل ۲- اجزای دستگاه لی و طرحواره آن جهت اندازه گیری بصورت مستقیم رسانایی گرمایی

۲-۲- سنتز نانو ذرات اکسید آلومینیوم

نانوذرات اکسید آلومینیوم (فاز گاما) با استفاده از فناوری سل-ژل بر اساس روش بیان شده توسط داواله و همکاران [۱۹] سنتز شده است. مورفولوژی محصولات اکسید آلومینیوم با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفته است. توزیع اندازه نانوذرات اکسید

آلومینیوم با تجزیه و تحلیل اندازه ذرات نانو توسط دستگاه پراکندگی دینامیکی نور مدل Nicrotrac ساخته شرکت Microtrac برآورد شده است.

۲-۳- آماده سازی نمونهها

ورق های کامپوزیتی با ضخامت ۰٫۵ میلی متر در ابعاد ۲۵ × ۱۰۰ ميليمتر بر اساس آزمون استاندارد ASTM D5868 تهيه شده است. کامپوزیتهای گرماسخت به روش دستی متشکل از ۳ لایه پارچه بافته شده شیشهای با نسبت درصد حجمی پارچه به رزین اپوکسی ۴۵ به ۵۵ درصد به ضخامت کلی ۵٬۰ میلیمتر ساخته شده است. از یک قالب سیلیکونی به ابعاد ۳۰۰ در ۱۵۰ میلیمتر و ترکیب رزین بیسفنول A و هاردنر مخصوص ۷۰ به ۳۰ درصد تولید شرکت Nuhdem Plastic ترکیه با برنامه پخت ۲۴ ساعت در دمای محیط، ۲ تا ۳ ساعت در دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس در آون و ۲ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سلسيوس استفاده شده است. در اين مطالعه از محلول اسيد سولفوریک با غلظت ۶۰ درصد وزنی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس بمدت زمان ۲۰ دقیقه به عنوان یک H کننده مناسب استفاده شده است. نمونهها به طور كامل با آب مقطر شسته شده تا اسيد سولفوريک باقی مانده از سطح خارج شده و همچنین واکنش متوقف شود. در نهایت، نمونهها با حوله کاغذی خشک شده و با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال نوری متصل به کامپیوتر در بزرگنماییهای مختلف از ۱۰X تا ۷۵۰X از سطح H شده عکسبرداری شده است. بنابراین، فرآیند H كردن تنها تا مرحله حذف يك لايه پارچه شيشه بدون رزين اپوكسي انجام شده است. پس می توان با موفقیت کامپوزیت گرماسخت را تا یک لايه با اسيد سولفوريک در شرايط ذکر شده با کنترل غلظت، دما و زمان H کرد. برای تهیه نمونه پلیمری با نانو ذرات و نشاندن آن بر روی قطعات کامپوزیتی، مقدار ۲۰۰۱-±۵٫۵ گرم پودر PVC در ۱۰۰ میلی لیتر تتراهیدروفوران حل شده و سپس به ترتیب ۰٫۵±۰٫۰۲ درصد وزنی و ۰٬۰۲۲ درصد وزنی نانوذرات به ترتیب، ۰٬۰۲۸ گرم و ۰٬۰۵۵ گرم نانو ذرات اکسید آلومینیوم به محلول PVC در یک بشر شیشه ای اضافه شده و با استفاده از یک همزن برش بالا Heidolph Stirrer بمدت ۱۵ دقیقه به عنوان توزیع اولیه مخلوط شده است. سپس مخلوط در معرض فرآيند همزن فراصوتي مدل Bandelin Sonoplus HD 3100 ساخت کشور آلمان تحت دامنه مناسب با پنج پالس کاری (۲ ثانیه روشن، ۱ ثانیه خاموش) برای حدود ۱۰ دقیقه با حداکثر توان خروجی ۵۰۰ وات و فرکانس کاری ۲۵ کیلوهرتز با استفاده از قطر ۸ میلی متر و نوک هورن تیتانیومی قرار گرفته است. به منظور جلوگیری از افزایش دما در طول فرایند فراصوتی، از خنکسازی خارجی با غوطهور کردن بشر حاوی محلول مخلوط شده در یک حمام یخ بهره گرفته شده است. پس از آن، مخلوط در حمام فراصوتی حدود ۴۰ دقیقه قرار گرفته و در انتها مخلوط PVC بهمراه نانو ذرات اكسيد آلومينيوم توزيع شده بصورت همگن، بر روی کامپوزیت گرماسخت قرار گرفته در داخل کریستالیزور لبه دار (مساحت موثر: ۴۱۵ میلیمترمربع) در دمای محیط ریخته شده و اجازه داده شده تا ۲۴ ساعت باقی بماند. شکل ۳ نمایی از فيلم واسطه همكن، بدون اعوجاج و يكنواخت PVC شامل نانو ذرات اکسید آلومینیوم ریخته شده بر روی قطعات کامپوزیتی را نشان می دهد.



شکل ۳- لایه PVC ریخته شده بر روی نمونه های کامپوزیتی با ۱ درصد وزنی نانو ذره اکسید آلومینیوم

نمونههای جوش داده شده طبق استاندارد ASTM3039 جهت انجام تست کشش آماده سازی شده و از دو سر آزاد خود (محل گیرش توسط فکهای دستگاه کشش) مطابق با شکل ۴ با چسب تب دار شده تا از خمش آنها جلوگیری شود.



شکل ۴- دستگاه تست کشش سنتام

همچنین مقاطع اتصال یکسری از نمونهها بدون انجام تست کشش بعد از جوشکاری با کاتر برش داده شده و با استفاده از کاغذ سنباده با شماره های به ترتیب ۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ۱۵۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ آماده سازی شده و با بکارگیری میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده است.

۲-۴- اتصال کامپوزیتهای آماده سازی سطحی شده به روش جوشکاری فراصوتی

محدوده تغییرات پارامترهای جوشکاری بر اساس مطالعات اولیه و نتایج تجربی آزمایشهای اولیه برای دستیابی به بالاترین امکان در هم تنیدگی مکانیکی بین پلیمر گرمانرم ذوب شده و پارچه شیشه در ناحیه جوشکاری انتخاب شده اند. موثرترین و قابل کنترل ترین پارامترها، زمان جوشکاری، زمان نگهداشت و فشار جوشکاری در نظر گرفته شده است. بنابراین اتصالات با در نظر گرفتن زمان جوشکاری در بازه ۲٫۲-

نگهداشت ۵/۰ ثانیه طبق شکل ۵ انجام شده است. حداقل ۳ نمونه برای هر پارامتر ورودی جوش برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج آزمایش در نظر گرفته شده و میانگین هر سه مقدار تحملی اتصال بدست آمده جهت تعیین بیشینه استحکام کششی اتصال و حداکثر مقدار کرنش شکست در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- نمونههای جوش داده شده به روش فراصوتی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز نانو ذرات و نانو کامپوزیتها

الگوی پراش اشعه X نانوذرات اکسید آلومینیوم در شکل ۶ (الف) آورده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده شده تمام پیکها در الگوی پراش اشعه X نمونه با دادههای کارت (JCPDS فاز گاما اکسید آلومینیوم مطابقت دارند[۱۹]. همچنین مورفولوژی محصول اکسید آلومینیوم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی طبق شکل ۶(ب) نشان داده شده است. شکل ۶(ب) ذرات اکسید آلومینیوم با اندازه ذره در محدوده ۲۰–۵۰ نانومتر را نشان میدهد. توزیع اندازه ذرات نانو(200 SZ) با توجه به شکل ۷ تخمین زده شده و حدود ۴۸۸ نانومتر برآورد شده است.



شکل ۶- (الف) سنتز نانو اکسید آلومینیوم فاز گاما به روش سل-ژل (ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی



مطابق با جدول ۳ بدست آمده از طیف سنجی پراش انرژی پرتو X از سطح کامپوزیت آماده سازی سطحی شده در حضور لایه واسط با نانو ذرات، عناصر کربن، کلسیم، آلومینیوم، سیلسیوم و اکسیژن نماینده حضور پارچه شیشهای و رزین اپوکسی در سطح نمونه مورد آزمایش میباشد. همچنین عناصر آلومینیوم و کلر ناشی از حضور پلیمر PVC حاوی مقدار ۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم در سطح کامیوزیت میباشد.

ِ کامپوزیتها آماده سازی شده با	عناصر در سطح	دول ۳- آناليز	جد
--------------------------------	--------------	---------------	----

Х	پرتو	انرژی	پراش	سنجى	طيف	بکارگیری
---	------	-------	------	------	-----	----------

درصد اتمی (./)	درصد وزنی (./)	عناصر
۵۷,۰۷	44'۷	كربن
۲۹ _/ ۸۱	۳۰,۰۰	اكسيژن
٣,١٠	۴,٩٩	آلومينيوم
۵٫۷۶	٩٫۶۵	سيليسيوم
٣٫١۴	v,at	كلسيم
1/11	٣/٩۶	نانو ذره
1	1	جمع

همچنین جدول ۴ و شکل ۸ به ترتیب بدست آمده از طیف سنجی پراش انرژی پرتو X از سطح نانو کامپوزیت PVC در حضور ۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، بیانگر توزیع یکنواخت، همگن و بدون کلوخهای شدن نانو ذرات اکسید آلومینیوم در داخل پلیمر میباشد. توزیع یکنواخت نانو ذرات طبق شکل ۸ باعث ایجاد سطح واسط بزرگ نانو ذرات با پلیمر شده است. در نتیجه وجود اتصال و چسبندگی قوی بین پلیمر با نانو ندرات خواص مکانیکی و حرارتی پلیمر را تواماً افزایش داده است. افزایش غلظت بیش از مقدار۲۰/۰۲±۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم باعث ایجاد عدم یکنواختی و کلوخهای شدن خواهد گردید. دلیل رخ دادن پدیده کلوخهای شدن وجود نیروی واندروالسی بین نانوذرات در مقابل پراکندگی همگن ذرات با بکارگیری درصد وزنی مشخص میباشد.



شکل ۸- توزیع نانو ذره اکسید آلومینیوم با ۱ درصد وزنی در ماتریس PVC

با بکارگیری طیف	کامپ وز يت	سطح نانو	عناصر از	جدول ۴- آناليز
	V	A 11 A1		

ستجی پراس اترزی پر تو ۸				
درصد اتمی (./)	درصد وزنی (./)	عناصر		
٨۶٫٨۶	۲۴ <i>٬</i> ۶۵	كربن		
۵٫۶۱	8,47	اكسيژن		
• / ١١	۲۲٬۰	آلومينيوم		
٠,١٩	٠,٣٧	سيليسيوم		
۷٫۲۳	۱۸,۳۴	کلر		
۱۰۰	۱	جمع		

۲-۳- خواص حرارتی و مکانیکی

جدول ۵ نسبت رسانایی گرمایی در حضور نانو ذرات اکسید آلومینیوم به پلیمر پایه PVC را بطور واضح نشان می دهد. رسانایی گرمایی نمونه PVC با ۵٫۰ و ۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم به ترتیب ۱٫۴ و ۱٫۶ برابر نسبت به رسانایی گرمایی نمونه PVC بدون نانو ذرات است. وجود مقاومت ناچیز بین ماتریس پلیمری و فاز پر کننده در سیستمهای پر شده دلیلی بر افزایش بالای رسانایی گرمایی با غلظت نانو ذرات است.

رسانایی گرمایی (±۰٫۰۵ W.m ⁻ ¹ .K ⁻¹)	دمای محیط (±۰٫۱°C)	دمای دیسکها C) (±۰٫۱°	ضخامت (±μ۲۰m)	نانو كامپوزيت (±∙٫۰۲wt.%)
•,18	۲۵٫۳	VF,V VF,S VT,D	78.	PVC
•,7٣	۲١,۴	84'Y 84'b 84'Y	۴	PVC (• _/ Δwt.%)
۰,۲۵	۲۴٫۳	Y•,X Y•,Y 88,4	۶	PVC (1 wt.%)

وابستگی دمایی ظرفیت گرمایی ویژه مطابق با شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این منحنی دمای انتقال شیشه ای کامپوزیت و پلیمر PVC به ترتیب ۱۲۴ و ۹۰ درجه سلسیوس میباشد. در نزدیکی دمای انتقال شیشهای افزایش ظرفیت گرمایی ویژه مشاهده میشود و شیب نمودار گرماگیر را خواهیم داشت. قبل از دمای شیشهای شیب نمودار گرماگیر بوده و بعد از دمای انتقال شیشهای منحنی تقریبا افقی خواهد شد. همچنین منحنی در ناحیه ذوب خود تقعری رو به بالا را از خود نشان میدهد که پیک موجود در آن نشانگر دمای ذوب خواهد بود. دمای ذوب پلیمر PVC و کامپوزیت به ترتیب برابر با ۱۶۴ و ۲۵۴ درجه سلسیوس میباشد.



شکل ۹- تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه نسبت به دما

منحنی های شکل ۱۰(الف) و ۱۰(ب) بیانگر حداکثر استحکام کششی و مقدار کرنش شکست محل اتصال با زیرلایه PVC با و بدون حضور نانو ذرات اکسید آلومینیوم در دوره های زمانی مختلف جوشکاری ۲٫۲ تا ۲٫۷ ثانیه با حداکثر ۵ درصد خطای نسبی می باشد. مطابق شکل، PVC شامل۲۰٫۲±۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم بیشینه مقدار ۵۹ مگاپاسکال تنش کششی و ۲٫۰۴ کرنش تا

لحظه شکست را تحمل کرده در صورتیکه PVC بدون حضور نانو ذرات اکسید آلومینیوم تنها ۴۵ مگاپاسکال تنش کششی و کمتر از ۰٬۰۲ کرنش شکست تحمل کرده است. شکل ۱۰ همچنین بیان کننده افزایش ۱/۳ برابری استحکام شکست با بکارگیری ۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم و همچنین افزایش ۲٫۱ برابری مقدار کرنش شکست در قیاس با بیشینه مقدار استحکام و کرنش شکست محل اتصال در حضور لایه واسط PVC بدون حضور نانو ذرات می باشد. زمان جوشکاری طولانی با افزایش مقدار انرژی جوشکاری ورودی منجر به افزایش سطح اتصال و استحکام جوش می شود. اما افزایش بیش از حد در زمان جوشکاری معمولاً بیش از ۰٫۵–۰٫۶ ثانیه برای زیرلایه های PVC بدون نانو ذرات اكسيد آلومينيوم منجر به تخريب حرارتي ماتریس پلیمری و اعوجاج در جهت پارچه در دماهای بالا با توجه به سطوح شکست حاصل از تست کشش می شود. بنابراین، افزایش درصد وزنی نانو ذرات تا سطح استاندارد مشخص ۰۲±۱۰درصد وزنی با توزیع همگن و بدون کلوخه ای شدن باعث افزایش سطح موثر برای انتشار امواج فراصوتی و کاهش زمان جوشکاری تا مقدار بیشینه ۰/۴ ثانیه شده است.



شکل ۱۰– منحنی الف) حداکثر استحکام کششی-زمان ب) حداکثر جابجایی شکست-زمان نمونهها جوش داده شده بعد از تست کشش

با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی طبق شکل ۱۱(الف)، ۱۱(ب) و ۱۱(ج) بوضوح میتوان دید که حضور نانو ذرات باعث توزیع گرمای جوشکاری یکنواخت در طول سطح اتصال با ضخامت یکسان در سرتاسر محل جوش شده است. علاوه براین، پلیمر

PVC ذوب شده به بهترین شکل توانسته پارچه بدون رزین در مرحله آماده سازی سطح را پوشش داده و با نفوذ زیرلایه و ایجاد گیرش مکانیکی استحکام اتصال را افزایش دهد. بررسیهای صورت گرفته از سطوح شکست با چشم غیر مسلح، تاییدی بر تصاویر تهیه شده با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی مبنی بر وجود لایه واسطه ذوب شده با توزیع یکنواخت و تغییر شکل پلاستیکی شدید در بیشتر سطح اتصال بوده است. در برخی نقاط از سطح اتصال پارچه شیشهای لخت و بدون بوده است. در مرحلی نقاط از سطح اتصال پارچه شیشهای لخت و بدون محضور باقی ماندههای پلیمر واسطه دیده شده است. عدم حضور پلیمر PVC بر روی پارچه شیشهای بیانگر تر شوندگی مناسب سطح کامپوزیت در مرحله آماده سازی سطح میباشد. در برخی از مناطق اتصال، بدلیل عدم زمان جوشکاری مناسب و عدم حضور نانو ذرات نشانههایی از سوختگی پلیمر و ذوب ناکافی PVC مشاهده شده است.



شکل ۱۱- تصاویر عمود بر سطح برش خورده از مرکز جوش با میکروسکوب الکترونی روبشی الف) بدون نانو ذرات اکسید آلومینیوم ب) ۰٫۵ (درصد وزنی و ج) ۱ درصد وزنی نانو اکسید آلومینیوم

۳-۳- مدل ارائه شده

زمان جوشکاری، درصد وزنی نانو ذرات و رسانایی گرمایی بعنوان موثرترین پارامترها در مدل سطح پاسخ با بکارگیری نرم افزار Minitab16 استفاده شده است. بهینه ترین نتایج با کنترل و بهینه سازی پارامترهای موثر در محدوده مشخص بدست آمده است. با بکارگیری مدل سطح پاسخ هر کدام از پارامترها طبق جدول ۶ در سطوح مشخصی آنالیز میشود.

جدول ۶- پارامترهای موثر با سطوح تغییرات در مدل سطح پاسخ

سطوح تغييرات	فاكتور
۲٫۰۰، ۳٫۰۰، ۴٫۰۰، ۵٫۰۰ و ۷٫۰	زمان جوشکاری (s)
۰، ۵٬۰ و ۱	درصد وزنی نانو ذرات (%.wt)
۰٬۱۶، ۲۳٬۰۲ و ۲۵،	رسانایی گرمایی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)

شکل ۱۲(الف) و ۱۲(ج) تاثیر تواماً زمان جوشکاری و رسانایی گرمایی با ثابت نگه داشتن درصد وزنی نانو ذرات به ترتیب بر روی بیشینه نیرو و جابجایی محل اتصال تا لحظه شکست را نشان میدهد. با بکارگیری ۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم و زمان جوشکاری در بازه زمانی ۰٫۴ تا ۰٫۶ ثانیه، حتی در کمترین مقادیر از رسانایی گرمایی نیز به ترتیب نیروی شکست منطقه اتصال بیش از ۲۱۰۰ نیوتن و جابجایی شکست بیش از ۳٫۲ میلیمتر رخ داده است. با افزایش رسانایی گرمایی در زمان جوشکاری ثابت بدلیل کاهش مقدار گرما جهت ذوب پليمرها در منطقه اتصال، استحكام اتصال كاهش يافته است. در نتیجه بکارگیری زمان جوشکاری در محدوده مشخص با مقدار مناسبی از رسانایی گرمایی تواماً باعث ایجاد اتصال با استحکام و جابجایی شکست بالا شده است. شکل ۱۲(ب) و ۱۲(د) تاثیر تواماً درصد وزنی نانو ذرات و رسانایی گرمایی با ثابت نگه داشتن زمان جوشکاری به ترتیب بر روی بیشینه نیرو و جابجایی محل اتصال تا لحظه شكست را نشان مىدهد. با افزايش درصد وزنى نانو ذرات، رسانایی گرمایی نیز افزایش یافته است. در زمان جوشکاری ثابت ۰٬۴ ثانیه با بکارگیری نانو ذرات در محدوده ۰٫۸ تا ۱ درصد وزنی میتوان با حداقل رسانایی گرمایی نیز به بیشینه نیرو و جابجایی شکست به ترتیب ۲۱۰۰ نیوتن و ۳ میلیمتر دست یافت. نتایج بیانگر بیشینه نیرو و جابجایی شکست محل اتصال با بکارگیری مقادیر بهینه از پارامترهای جوشکاری میباشد. از دیدگاه مهندسی، جوش با استحکام و الاستيسيته بالا بسيار با اهميت بوده و نتايج بدست آمده بيانگر عدم رخداد شکست ترد در محل اتصال بوده است.

برای بررسی تأثیر هر پارامتر و اثر متقابل آنها بر حداکثر نیروی شکست و جابجایی شکست، از روش رگراسیون چندگانه استفاده شده است. معادلات حاکم بر مدل طبق روابط (۱) و (۲) بیان شده است.

F= -310.4 - 7558.1%Nano + 740.7Wt + 35082.3	(Λ)
Wt×K + 30207.5%Nano×K – 42192.9 Wt ² ×K	()
$D = 1.83 - 16.1K + 6.95K \times \%Nano + 60.1Wt \times K - 67.7$	(7)
Wt ² ×K	(1)

با توجه به روابط بالا Wano، Wt ، و D به ترتیب زمان جوشکاری، درصد وزنی نانو ذرات، رسانایی گرمایی، حداکثر نیروی تحملی و جابجایی شکست اتصال میباشد. نتایج آنالیز واریانس بدست آمده از مدل سطح پاسخ نشان دهنده تاثیر زمان جوشکاری، درصد وزنی نانوذرات، رسانایی گرمایی و برهمکنش آنها با توجه به مقادیر معناداری کمتر از ۲۰/۵ بر هر یک از توابع پاسخ بوده است. مقادیر معناداری و ضرایب معادلات رگراسیون چند متغیره جهت بیان حداکثر نیروی شکست و جابجایی اتصال در جداول ۷ و ۸ نشان داده شده است. یکی از پارامتری که دقت مدل را تعیین میکند، مقدار ضریب همبستگی مدل است. نزدیکتر بودن مقدار این پارامتر به ۱ یا ۱۰ درصد بیانگر دقت بیشتر مدل آماری رگراسیونی در انطباق و پیش

بینی بر اساس داده های تجربی می باشد. مقدار ضریب همبستگی برابر با ۸۷ درصد بوده و نشان دهنده دقت برازش مناسب مدل است. همچنین تقریبا ۸۰ درصد از دادههای ورودی دارای توزیع نرمال بوده است. مدل توانایی پیش بینی مقادیر بیشینه نیرو شکست و جابجایی شکست با بکارگیری پارامترهای ورودی خارج از محدوده تغییرات را دارا میباشد. طبق جدول آنالیز واریانس به ترتیب ۷۱ و ۷۷ درصد دادهها خارج از محدوده تغییرات پارمترهای موثر برای محاسبه بیشینه نیرو و جابجایی شکست توسط مدل قابل پیش بینی بوده است.

جدول ۷- آنالیز واریانس برای پیش بینی نیروی شکست اتصال

مقدار معناداري	ضريب رگراسيون	پارامتر	
•,•••	-71.5/4	Constant	
•,• * *	-YQQY'I	%Nano	
۰,۰۴۵	٧۴٠٫٧	Wt	
•,••)	۳۵۰۸۲٫۳	$Wt \times K$	
•,•••	-42192'8	Wt ² ×K	
•1•18	۳•۲•Υ٫۵	%Nano ×K	
ضریب همبستگی: ۸۷ درصد			
ضریب همبستگی (قابل کنترل): ۸۰ درصد			
ضریب همبستگی (قابل پیش بینی): ۷۱ درصد			



مقدار معناداري	ضريب رگراسيون	پارامتر	
•,•••	۱,۸۲۸۸	Constant	
•,•1۴	-18,1401	K	
•,•••	۶۰,۱۰۲۰	Wt imes K	
•,•••	-84 ¹ ,4•28	Wt ² ×K	
۰,۰۰۳	۶,۹۵۵۷	%Nano ×K	
ضریب همبستگی: ۸۷ درصد			
ضریب همبستگی (قابل کنترل): ۸۳ درصد			
ضریب همبستگی (قابل پیش بینی): ۷۷ درصد			



شکل ۱۲-(الف) و (ج) اثر متقابل زمان جوشکاری و رسانایی گرمایی بر روی حداکثر نیرو و جابجایی شکست، (ب) و (د) اثر متقابل رسانایی گرمایی و درصد وزنی نانو ذرات بر روی حداکثر نیرو و جابجایی شکست

۴- نتیجه گیری

یب بروی نتایج این پژوهش نشان داده است که با افزایش درصد نانوذرات اکسید آلومینیوم تا ۲۰/۰±۱ درصد وزنی، مقدار رسانایی گرمایی به میزان ۱/۶ برابر PVC بدون حضور نانو ذرات افزایش یافته است. بیشترین استحکام و کرنش شکست به ترتیب برابر با ۵۹ مگاپاسکال و ۲۰۰۴ در کمترین زمان جوشکاری ممکن ۱/۴ ثانیه برای نمونه با ۱ درصد وزنی نانو ذرات مشاهده شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی درصد وزنی نانو ذرات مشاهده شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی درصد وزنی نانو ذرات مشاهده شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مهمگن و یکنواخت گرمای جوشکاری در حضور نانوذرات اکسید آلومینیوم میباشد. همچنین جدول آنالیز واریانس بدست آمده از مدل سطح پاسخ با ضریب همبستگی ۸۷ درصد بخوبی بیانگر تاثیر هر کدام از پارامترهای زمان جوشکاری، درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم، رسانایی گرمایی و تعامل بین پارامترها بر روی استحکام و جابجایی شکست محل اتصال میباشد.

۵- مراجع

[۱] تیربند ج، اکبری د. و گلزار م، ایجاد قابلیت جوشکاری در پلیمرهای گرماسخت تقویت شده به کمک آماده سازی سطحی با استفاده از پرتو لیزر. *نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران*، د. ۲، ش. ۱، ص ۹۲–۱۰۶. ۱۴۰۰.

[۲] جباری راد ع.، اکبری د. و گلزار م.، اتصال مواد مرکب پایه گرماسخت به روش جوشکاری فراصوتی به کمک لایه واسط هم پخت شده. *نشریه علـوم* و فناوری جوشکاری ایران، د. ۶، ش. ۲، ص۱۳۷–۱۹۴۴، ۱۳۹۹.

[3] Deng S., Djukic L., Paton R. and Ye L., Thermoplastic-epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures-A review. *Composites part A: applied science and manufacturing*, Vol. 68, pp. 121-132, 2015.

science and manufacturing, Vol. 68, pp. 121-132, 2015. [۴] محمدی ع، عابدینی ر، عبداله ا. و فرتاشوند و، بررسی سمت و سوی

کاربرد ارتعاشات توان بالای فراصوتی در فرایندهای جوشکاری. نشریه

علمی صوت و ارتعاش، د. ۱۰، ش. ۲۰، ص ۳۵–۵۵، ۱۴۰۰.

- [5] Agha Mohammad Pour M., Abdi Behnagh R. and Esmaeilzadeh P., Simulation of ultrasonic welding of Al-Cu dissimilar metals for battery joining. *International journal of advanced design and manufacturing technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 23-31, 2020.
- [6] Palardy G., Shi H., Levy A., Corre S. L. and Villegas I. F., A study on amplitude transmission in ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Composites part A: applied science and manufacturing*, Vol. 113, pp. 339-349, 2018.
- [7] Harras B., Cole K. C. and Vu-Khanh T., Optimization of the ultrasonic welding of PEEK-carbon composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 15, pp. 174-182, 2016.
- [8] Shutilov V. A., Fundamental physics of ultrasound. 1st ed. CRC Press, London, 1988.
- [9] Brassard D., Dube M. and Tavares J. R., Resistance welding of thermoplastic composites with a nanocomposite heating Element. *Composites part B: engineering*, Vol. 165, pp. 779-784, 2019.
- [10] Ribeiro A., Casanova J., Brandi S. D. and Pinheiro D. M., Acoustic approach of weldability for nanocomposite (nanosilica/PA6) welded by ultrasonic welding. *Palimeros*, Vol. 29, No. 4, 2019.

[۱۱] نیکوی ر.، بنی مصطفی عـرب ن.، قـادری ع. و مـراد شـیخی م.، بررسـی

مشخصات مکانیکی و ظاهری کامپوزیت زمینه پلیمری جوشکاری شده توسط

فرایند التراسونیک. *نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۱، ص ۲۳۳–۲۳۹.

[12] Holtmannspotter J., How surfaces of carbon fibre reinforced plastics with thermoset matrices need to be treated for structural adhesive bonding. *The journal of adhesion*, Vol. 94, pp. 839-854, 2018.

- [13] Mijovic J. S. and Koutsky J. A., Etching of polymeric surfaces: A review. *Polymer-plastics technology and engineering*, Vol. 9, pp. 139-179, 2006.
- [14]Lionetto F., Morillas M. N., Pappada S., Buccoliero G., Villegas I. F. and Maffezzoli A., Hybrid welding of carbonfiber reinforced epoxy based composites. *Composite part A: applied science and manufacturing*, Vol. 104, pp. 32-40, 2018.

[15] Zhi Q., Tan X. R., Lu L., Chen L. Y., Li J. C. and Liu Zh. X., Decomposition of ultrasonically welded carbon fiber/polyamide 66 and its effect on weld quality. *Welding in the world*, Vol. 61, pp. 1017-1028, 2017.

[16] Foong Ph. Y., Voon Ch. H., Lim B. Y. and et al., Formation of polypropylene nanocomposite joint using silicon carbide nanowhiskers as novel susceptor for microwave welding. *Journal of reinforced plastics and composites*, Epub ahead of print 22 september 2022. DOI: 10.1177/07316844221128317.

[17] Li W., Frederick H. and Palardy G., Multifunctional films for thermoplastic composite joints: ultrasonic welding and damage detection under tension loading. *Composites part A:applied science and manufacturing*, Vol. 141, pp. 106221, 2021.

[18] Fuller T. R. and Fricke A. L., Thermal conductivity of polymer melts. *Journal of applied polymer science*, Vol. 15, pp. 1729-1736, 1971.

[19] Dhawale V. P., Khobragade V. B. and Kulkarni S. D., Synthesis and characterization of aluminium oxide (Al₂O₃) nanoparticles and its application in Azodye decolourisation. *International journal of environmental analytical chemistry*, Vol. 2, pp. 10-17, 2018.