



## استفاده از الگوریتم مرکب مرکزی به منظور مدل سازی و بهینه سازی استحکام کششی اتصالات "کامپوزیت - فولاد"

سینا آریایی<sup>1</sup>، ابوالفضل توتونچی<sup>2</sup>، عباس کیانوش<sup>3\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی دکترا، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز

3- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 5166616471، akianvash@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 دی 1392

پذیرش: 09 فروردین 1393

ارائه در سایت: 02 مهر 1393

کلید واژگان:

استحکام چسبندگی

مدل سازی ریاضی

طرح آماری مرکب مرکزی

آنالیز واریانس داده ها،

اتصالات کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با

الیاف شیشه - فولاد سازه

### چکیده

در پژوهش حاضر به منظور ارائه مدل رگرسیون و بهینه سازی استحکام کششی و کرنش پذیری اتصالات دوگانه‌ی "کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه - فولاد سازه" از الگوریتم مرکب مرکزی چرخش پذیر استفاده شده است. با انتخاب دما و زمان پخت اتصالات به عنوان متغیرهای ورودی، این پارامترها، پس از انجام آزمون توزین حرارتی، کد گذاری شده و هر کدام در پنج سطح مورد مطالعه قرار گرفتند. به منظور برآورد روبه پاسخ مورد نظر و ارائه مدل متناسب، سیزده آزمایش سیستماتیک انجام شد. به منظور سنجش دقت و اعتبار مدل پیشنهادی از آنالیز واریانس داده‌ها استفاده شده است. برای بررسی تاثیر هم‌زمان و متقابل زمان و دمای پخت بر استحکام اتصالات و برآورد شرایط بهینه فرآیند اتصال، نمودارهای دو بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مقدار بهینه هر کدام از متغیرهای پخت با بهره‌گیری از داده‌های نموداری مدل ریاضی ارائه شده، 40°C و 180 دقیقه به ترتیب برای دما و زمان پخت اتصالات به دست آمد. در نهایت، بررسی‌های ریز ساختاری با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها صورت گرفت که تطابق مناسبی با نتایج حاصل از مدل را نشان داد.

## The application of central composite rotatable design to model and optimize the tensile strength of "composite-steel" connections

Sina Ariaee<sup>1</sup>, Abolfazl Tutunchi<sup>2</sup>, Abbas Kianvash<sup>3\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 5166614766 Tabriz, Iran, akianvash@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 18 January 2014  
Accepted 29 March 2014  
Available Online 24 September 2014

#### Keywords:

Mathematical modeling  
central composite rotatable design  
analysis of variance  
glass fiber reinforced epoxy composite-  
structural steel connections

### ABSTRACT

In the present study, central composite algorithm was used in order to model and optimize the mechanical behavior of "glass fiber reinforced epoxy composite - structural steel" connections. Initial tests showed that the polymer curing variables play a significant role as key process parameters in producing strong and reliable connections. After conducting Thermal Gravimetric Analysis on polymer, by selecting curing time and curing temperature as input variables, the parameters were coded and each of them was studied in five levels. In order to estimate the desirable response and provide appropriate models, thirteen tests were conducted systematically. In order to assess the accuracy and to validate the proposed model, analysis of variance was performed successfully. The effect of curing time and curing temperature on the connection's strength quality was studied utilizing two-dimensional graphs. Utilizing this approach the optimal bonding process variables was achieved at 40°C and 180 min for curing temperature and curing time respectively. Finally, the results obtained from micro structural characterization and fractography analyses of joints by Optical and Scanning Electron Microscope were in good agreement with the results achieved by the developed model.

### 1- مقدمه

به سایر مواد سازه‌ای به وجود آورده است و در اکثر موارد، دقت در انتخاب روش اتصال به اندازه‌ی خود مواد مهم است [2]. متصل کردن با پلیمر تکنیکی است که کاربرد آن به منظور الحاق مواد غیر مشابه به یکدیگر در سال‌های اخیر روبه گسترش بوده است. از این روش، به‌ویژه زمانی که سایر

در سال‌های اخیر مواد کامپوزیتی با موفقیت قابل توجهی در محصولات مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. کاربرد گسترده‌ی این مواد پیشرفته، چالش‌های جدیدی را به‌خصوص در مورد نحوه‌ی الحاق کامپوزیت‌ها

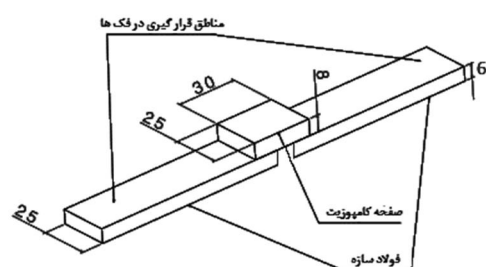
Please cite this article using:

S. Ariaee, A. Tutunchi, A. Kianvash, The application of central composite rotatable design to model and optimize the tensile strength of "composite-steel" connections, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 157-164, 2014 (In Persian)

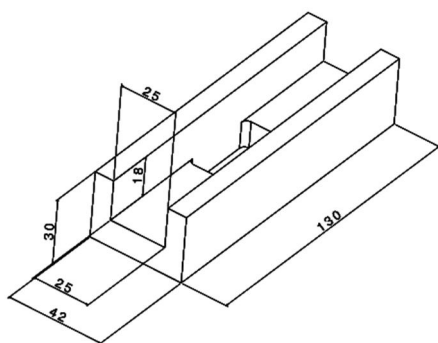
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به ترتیب برابر 6 و 8 میلی‌متر انتخاب شد تا اتصالات تا حد امکان تحت مد تخریب چسبندگی گسیخته شوند. به منظور کاهش پراکندگی نتایج آزمون کشش، تمام قسمت‌های نشیمنگاه نمونه‌ها سنگ‌زنی شدند، به علاوه تمام اتصالات فرآیند پخت خود را داخل نگهدارنده‌ها طی کردند. شکل 1 نمای شماتیک و واقعی نمونه‌های اتصالات و نگهدارنده‌ها را نمایش می‌دهد.

فولاد، از این نوع پلیمر تحت نام تجاری اپوکسی - استیل<sup>8</sup> (ساخت کشور آمریکا) برای اتصال نمونه‌ها در دما و زمان‌های پخت مختلف استفاده شد. حداقل سه نمونه از اتصالات برای هر یک از آزمایش‌ها ساخته شد. بررسی استحکام و کرنش اتصالات توسط یک دستگاه آزمون کشش اینسایز<sup>9</sup> (مجهز به کرنش سنج دقیق و نیرو سنج 150 کیلو نیوتنی) در آزمایشگاه علوم مواد واقع در دانشکده ساخت و تولید دانشگاه تبریز انجام گرفت. سرعت حرکت فک‌ها 0/2 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد تا امکان بررسی کرنش پذیری اتصالات در فرکانس بارگذاری کم میسر شود. بررسی‌های میکروسکوپی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 1 نمای شماتیک (الف) نمونه اتصالات برشی تک لبه، (ب) نگهدارنده‌ها، (ج) تصویر واقعی آن‌ها

روش‌های اتصال دادن همچون جوشکاری، پیچ کردن و پرچ کردن غیر قابل اعمال و یا مستعد آسیب رساندن به عملکرد مکانیکی سیستم است، می‌توان استفاده کرد. اتصال دادن پلیمری سبب افزایش عمر سیستم، کاهش هزینه ماشین کاری و تولید، حذف پدیده خوردگی در محل اتصال و کاهش پیچیدگی‌های فرآیند اتصال‌دهی می‌شود [3]. همچنین به علت عدم نیاز به دماهای کاری بالا در فرآیند اتصال‌دهی، پدیده تمرکز تنش و اعوجاج حرارتی قطعات به حداقل می‌رسد [4].

برخی دیگر از مزایای اتصال دادن پلیمری در سازه‌های فلزی در مرجع [5] مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر موارد ذکر شده، کاهش ارتعاش اتصالات با انتخاب روش اتصال‌دهی پلیمری از مزیت‌های دیگر این روش است [6]. تعدادی از سوالات مربوط به ساختار اتصالات فولاد-کامپوزیت نیز توسط وانگ و گوپتا پاسخ داده شده‌اند [7]. به علاوه، عملکرد مکانیکی اتصالات پلیمری قطعات مختلف در مرجع [8] مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. از منظر مدل‌سازی، برخی از ویژگی‌ها و مزایای مدل‌های عددی ارائه شده به منظور بررسی وضعیت مکانیکی اتصالات پلیمری در مرجع [9] مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. مقایسه روش‌های مختلف عددی در مدل‌سازی عددی در مرجع [10] انجام شده است. رویه پاسخ<sup>1</sup> یکی از روش‌های بهینه‌سازی مهندسی است. مدل و بهینه‌سازی متغیرهای ورودی در انواع روش‌های اتصال دادن همچون جوشکاری [11] و اتصال‌دهی لیزری عبوری [12,13] با استفاده از روش رویه پاسخ توسط محققان مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. هدف از پژوهش اخیر، استفاده از طرح آزمایش مرکب مرکزی<sup>2</sup> به منظور ایجاد تابع ریاضی تغییرات بین متغیرهای پخت پلیمر، تحت عنوان دما و زمان پخت، با حد تحمل بار کششی و کرنش در اتصالات برشی تک لبه فولاد-کامپوزیت است. توابع ریاضی رگرسیون<sup>3</sup> محاسبه شده و نتایج آزمون کشش نمونه‌های برشی تک لبه به انضمام مشاهدات میکروسکوپ نوری<sup>4</sup> و الکترونی روبشی<sup>5</sup> در تخمین شرایط بهینه پخت اتصالات و دستیابی به اتصالات پر استحکام با کرنش معقول به کار می‌روند.

## 2- مواد و روش ساخت اتصالات

از رزین اپوکسی<sup>6</sup> به شماره 2015 و هاردنر آمینی به شماره 2013، هردو ساخت شرکت آکسون<sup>7</sup> کشور فرانسه، به عنوان زمینه پلیمری و از الیاف تک جهتی شیشه الکتريکی (در هشت لایه) به عنوان تقویت کننده سیستم کامپوزیتی به موازات راستای بارگذاری اتصالات استفاده شد. لازم به ذکر است به منظور راحتی قالب‌گیری و خواباندن الیاف در کامپوزیت، از الیاف شیشه با چگالی سطحی  $100 \text{ (g/m}^2\text{)}$  استفاده شد. نسبت وزنی هاردنر به رزین و الیاف به کامپوزیت هر دو 1 به 3 انتخاب شده است. کامپوزیت هشت لایه به روش لایه گذاری دستی در قالب روباز پلی اتیلنی ساخته شد. برای ساخت نمونه‌های برشی تک لبه، صفحات کامپوزیت و فولاد کربنی ساده طبق استاندارد تحت برش و ماشینکاری قرارگرفتند [14]. بدین منظور، لبه‌های تمام اتصالات فولاد-کامپوزیت به دقت به عرض 25 و طول 13 میلی‌متر با دقت  $0/1 \pm$  میلی‌متر آماده شدند. ضخامت صفحات فولاد و کامپوزیت نیز

1- Response Surface  
2- Central Composite Rotatable Design  
3- Regression Model  
4- Optical Microscope  
5- Scanning Electron Microscope  
6- Diglycidyl ether of bisphenol- A (DGEBA)  
7- Axson

8- Epoxy-Steel  
9- In-Size

مقادیر 95% و یا بیشتر انتخاب شد. به منظور اطلاع از نحوه محاسبه سطح اطمینان می توان از روش ذکر شده در مرجع [21] بهره برد.

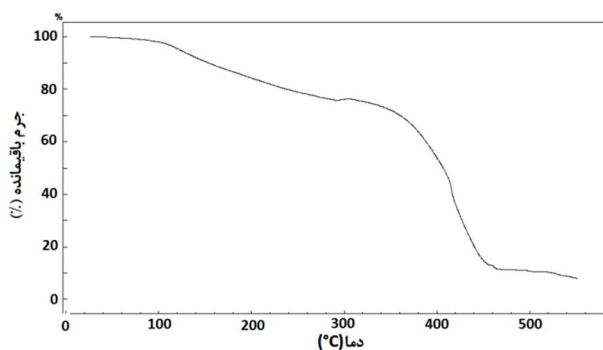
#### 4- نتایج و بحث

##### 1-4- طراحی ماتریس انجام آزمایش ها

در ابتدا به منظور تعیین مقاومت حرارتی پلیمر از آزمون توزین حرارتی<sup>4</sup> استفاده شد. بدین منظور از یک دستگاه کالریمتر شیمادزو (مدل دی تی جی-60- آچ<sup>5</sup>) واقع در آزمایشگاه سرامیک دانشکده مهندسی مواد دانشگاه تبریز استفاده شد. در این آزمون دمای مقارن با کاهش ده درصدی وزن ماده به عنوان حد نهایی مقاومت حرارتی آن در نظر گرفته می شود [22]. لذا بر همین اساس و با توجه به نتیجه حاصل از آزمون توزین حرارتی، که در شکل 2 نشان داده شده است، مقاومت حرارتی پلیمر 140°C تعیین شد. با توجه به نتیجه آزمون مقاومت حرارتی، به ویژه در مورد دمای پخت اتصالات، کد گذاری و کران بندی پارامترهای پخت اتصالات کامپوزیت- فولاد طبق جدول 1 انجام گرفت. ماتریس طراحی آزمایش طبق جدول 2 نگاشته شد. در این جدول نتایج آزمون کشش اتصالات کامپوزیت- فولاد به همراه نتایج پیش بینی شده توسط مدل چند جمله ای ارائه شده است.

##### 2-4- آنالیز واریانس مدل رگرسیون حد تحمل کششی نمونه های برشی تک لبه اتصالات کامپوزیت- فولاد

به منظور بررسی کیفیت، صحت و دقت مدل ریاضی ارائه شده، آزمون آنالیز واریانس (طبق جدول 3) روی مدل چند جمله ای اولیه صورت گرفت. با توجه به انتخاب سطح اطمینان 95%، شرط اثر پذیری مقادیر حد تحمل کششی اتصالات برای هر یک از جملات مدل، انتخاب مقادیر کمتر از 0/05 کمیت p است. به عبارت ساده تر، کمیت p درصد تصادفی بودن مقادیر محاسبه شده هر یک از ثابت های رگرسیون را مشخص می کند. لذا هرگاه کمیت p، مقادیر کمتر از 0/05 را به خود اختصاص دهند، احتمال تصادفی اختیار شدن مقادیر جملات مدل رگرسیون به شدت کاهش می یابد و این به



شکل 2 نتایج آزمون آنالیز حرارتی پلیمر واسط

جدول 1 سطوح و مقادیر واقعی و کد گذاری شده پارامترهای موثر در اتصال دادن

پارامتر	واحد	کد	سطوح			
زمان پخت	min	A	18	180	570	960
دمای پخت	°C	B	23	40	80	120
			-1/4	-1	0	+1
			+1/4			

توسط یک دستگاه میکروسکوپ نوری الیمپوس (مدل بی-ایکس-یو-سی-بی<sup>1</sup>) واقع در آزمایشگاه علوم مواد دانشگاه تبریز و یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل وگا|||تی-اسکن<sup>2</sup>) واقع در پژوهشگاه متالورژی رازی کرج انجام گرفت.

##### 3- پایه های نظری روش مدل سازی

###### 1-3- روش رویه پاسخ

رویه پاسخ از روش های آماری و عددی مدل سازی فرآیندهای مختلف مهندسی است. در این روش می توان نحوه تغییرات متغیر خروجی/ وابسته (متغیر پاسخ) را تابعی از کران تغییرات متغیرهای ورودی/ مستقل در نظر گرفت. هرگاه متغیرهای ورودی  $(X_1, X_2, \dots, X_k)$  یک سیستم مهندسی، کمی، پیوسته و تکرار پذیر باشند، متغیر پاسخ را می توان به صورت رابطه (1) در نظر گرفت:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (1)$$

می توان تابع  $f$  را با دقت مناسبی توسط تعدادی چند جمله ای درجه دوم جایگزین کرد. در روش رویه پاسخ از چند جمله ای ارائه شده در رابطه (2) به منظور مدل سازی تابع  $f$  استفاده می شود:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{ij} a_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن،  $k$ ،  $a_j = 0, 1, \dots, k$ ،  $a_i$ ، ثابت های رگرسیون،  $X_j$  و  $X_i$  متغیرهای مستقل کدگذاری شده،  $a_0$  میانگین پاسخ مورد نظر و  $a_{ij}$  و  $a_{ii}$  به ترتیب ثابت های خطی درجه دوم و ترکیبی مدل می باشند [18].

###### 2-3- طرح مرکب مرکزی چرخش پذیر

طرح های آزمایش فاکتوریل کامل، فاکتوریل کسری و مرکب مرکزی به صورت متداول، به منظور مدل سازی و بهینه کردن فرآیندهای مختلف به کار گرفته می شوند. روش مرکب مرکزی ابتدا توسط باکس و ویلسون طرح ریزی شد [19] و سپس توسط باکس و هانتر گسترش یافت [20]. در این پژوهش از دو متغیر ورودی مستقل تحت عناوین دمای پخت (A) و زمان پخت (B) در پنج سطح  $(0, \pm 1, \pm 2)$  به منظور طرح ریزی ماتریس انجام آزمایش ها طبق رابطه (3) استفاده شد:

$$\beta = 2^{n/4} \quad (3)$$

که در آن  $n$  تعداد متغیرهای مستقل ورودی است [19]. در پژوهش حاضر، از طرح مرکب مرکزی با انجام 13 آزمایش عملی برای مدل سازی نحوه تغییرات رویه پاسخ استفاده شد که مشتمل بر 1 آزمایش با چهار تکرار در نقطه مرکزی (0,0)، رویه پاسخ، 4 آزمایش در مختصات  $(\pm 1, \pm 1)$  و 4 آزمایش در مختصات  $(\pm \beta, 0)$  بوده است. متغیر پاسخ مورد نظر در این پژوهش مقادیر حد تحمل نیروی کششی نمونه های برشی تک لبه (استحکام نمونه های برشی تک لبه  $\times$  سطح مقطع اتصال) و جابه جایی متناظر نمونه ها بوده است. این رویه های پاسخ توسط چند جمله ای درجه دوم و به صورت رابطه (4) مدل سازی شدند:

$$Y = a_0 + a_1 A + a_2 B + a_{11} A^2 + a_{22} B^2 + a_{12} AB + \dots \quad (4)$$

ثابت های رگرسیون توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت<sup>3</sup> محاسبه و مدل مورد نظر در سطح اطمینان 95% محاسبه شد. به عبارت دیگر، احتمال قرار گیری ثوابت رگرسیون در محدوده داخلی (مجاز) منحنی واریانس مربوطه،

1- OM-Olympus-(UCB-BX)  
2- SEM-VEGA|||TE-Scan  
3- Design Expert v.8

4- Thermal Gravimetric Analysis  
5- Shimadzu Calorimeter-DTG-60-AH

جدول 2 ماتریس طراحی آزمایش و مقادیر پیش بینی شده و واقعی رویه های پاسخ اطلاعات آزمایش خصوصیات مکانیکی اتصالات

ترتیب انجام مقادیر کدگذاری شده پارامترهای اتصال دهی

آزمایش

رتبه

نتایج پیش بینی

نتایج عملی

حد تحمل اتصالات (N)

جابه جایی اتصالات (mm)

جدول 2

جدول 2 ماتریس طراحی آزمایش و مقادیر پیش بینی شده و واقعی رویه های پاسخ اطلاعات آزمایش خصوصیات مکانیکی اتصالات

ترتیب انجام مقادیر کدگذاری شده پارامترهای اتصال دهی

آزمایش

رتبه

نتایج پیش بینی

نتایج عملی

حد تحمل اتصالات (N)

جابه جایی اتصالات (mm)

جدول 2

رتبه	آزمایش	مقادیر کدگذاری شده	پارامترهای اتصال دهی	حد تحمل اتصالات (N)	جابه جایی اتصالات (mm)	نتایج پیش بینی	نتایج عملی
1	12	0	A	0	0/38	0/41	4630/7
2	3	-1	A	1	0/87	0/94	2873
3	2	1	A	-1	1/46	1/56	4659/6
4	10	0	A	0	0/38	0/38	4630/7
5	8	0	A	1/4	0/51	0/40	837/5
6	6	1/4	A	0	0/51	0/38	3745/1
7	7	0	A	-1/4	2/00	1/94	6111/1
8	11	0	A	0	0/38	0/48	4630/7
9	9	0	A	0	0/38	0/34	4630/7
10	13	0	A	0	0/38	0/28	4630/7
11	1	-1	A	-1	1/66	1/70	7631/8
12	5	-1/4	A	0	1/16	1/12	6454/4
13	4	1	A	1	0/16	0/29	2016/8

جدول 3 نتایج آنالیز واریانس مدل اولیه حد تحمل اتصالات برشی

ردیف	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقادیر $f$	مقادیر $p$
مدل	$3/9 \times 10^7$	5	$7/8 \times 10^6$	33/91	<0/0001
A	$7/3 \times 10^6$	1	$7/3 \times 10^6$	32/46	0/0007
B	$2/8 \times 10^7$	1	$2/8 \times 10^7$	122/16	<0/0001
AB	$1/1 \times 10^6$	1	$1/1 \times 10^6$	4/95	0/613
A <sup>2</sup>	$3/8 \times 10^5$	1	$3/8 \times 10^5$	1/69	0/23
B <sup>2</sup>	$2/3 \times 10^6$	1	$2/3 \times 10^6$	10/22	0/015
باقیمانده	$1/6 \times 10^6$	7	$2/3 \times 10^5$		
عدم تطابق	$6/2 \times 10^5$	3	$2/1 \times 10^5$	0/85	0/53
خطای خالص	$9/6 \times 10^5$	4	$2/4 \times 10^5$		

ضریب تعیین<sup>1</sup> = 0/96

ضریب تعیین تعدیل شده<sup>2</sup> = 0/93

ضریب تعیین پیش بینی شده<sup>3</sup> = 0/85

دقت مدل 21/04

3-4- آنالیز واریانس مدل رگرسیون جابه جایی نمونه های برشی تک لبه اتصالات کامپوزیت - فولاد

نتایج آنالیز واریانس مدل اولیه رگرسیون جابه جایی اتصالات کامپوزیت - فولاد در جدول 5 ارائه شده است. طبق نتایج این جدول می توان دریافت که، مدل رگرسیون صحیح و معتبر است [11]. به علاوه، مقدار عدم تطابق حاکی از اعتبار مدل می باشد. مقادیر به گزینی نیز به نوبه خود نشانگر دقت بالای مدل اولیه جابه جایی نمونه های برشی هستند [13]. با توجه به مقادیر، می توان دریافت که جملات A، B، A<sup>2</sup> و B<sup>2</sup> اثر گذارترین جملات مدل رگرسیون جابه جایی نمونه ها هستند.

با توجه به مقادیر، می توان دریافت که جملات A، B، A<sup>2</sup> و B<sup>2</sup> اثر گذارترین جملات مدل رگرسیون جابه جایی نمونه ها هستند. لذا، با حذف جمله AB می توان مدل ارائه شده را ساده سازی کرد. نتایج آنالیز واریانس انجام شده بر روی مدل ساده شده در جدول 6 ارائه شده است.

جدول 4 نتایج آنالیز واریانس مدل نهایی حد تحمل اتصالات برشی

ردیف	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقادیر $f$	مقادیر $p$
مدل	$3/8 \times 10^7$	3	$1/2 \times 10^7$	36/54	<0/0001
A	$7/3 \times 10^6$	1	$7/3 \times 10^6$	21/41	0/0012
B	$2/8 \times 10^7$	1	$2/8 \times 10^7$	80/58	<0/0001
B <sup>2</sup>	$2/6 \times 10^6$	1	$2/6 \times 10^6$	7/63	0/0220
باقیمانده	$3/4 \times 10^5$	9	$3/1 \times 10^6$		
عدم تطابق	$2/1 \times 10^6$	5	$2/1 \times 10^6$	1/76	0/3022
خطای خالص	$9/6 \times 10^5$	4	$2/4 \times 10^5$		

ضریب تعیین = 0/92

ضریب تعیین تعدیل شده = 0/90

ضریب تعیین پیش بینی شده = 0/82

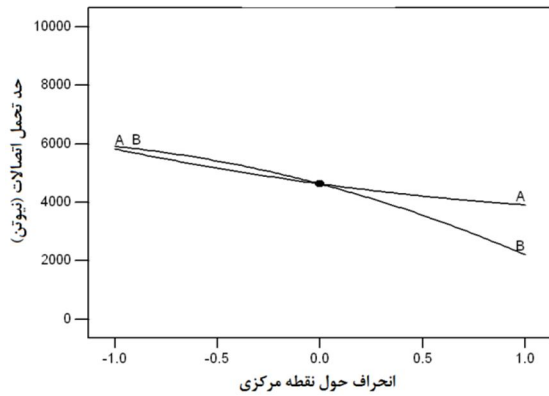
دقت مدل 18/67

نوبه ی خود نشان دهنده ی افزایش صحت جملات مدل است [23].  $f$  یکی دیگر از کمیت های صحت سنجی مدل رگرسیون است. کمیت  $f$  از تقسیم میانگین مربعات هر یک از جملات مدل رگرسیون بر میانگین مربعات باقیمانده به دست می آید. مقدار  $f$  اختیار شده توسط مدل  $33/91 (= 2/3 \times 10^5 \div 7/8 \times 10^6)$  است، که نشانه صحت مدل ارائه شده است [11]. مقادیر به گزینی (ضرایب تعیین) و اختیار اعداد نزدیک به 1 توسط هر کدام از آنها نیز به نوبه خود دقت کافی مدل ریاضی ارائه شده را نشان می دهد [13].

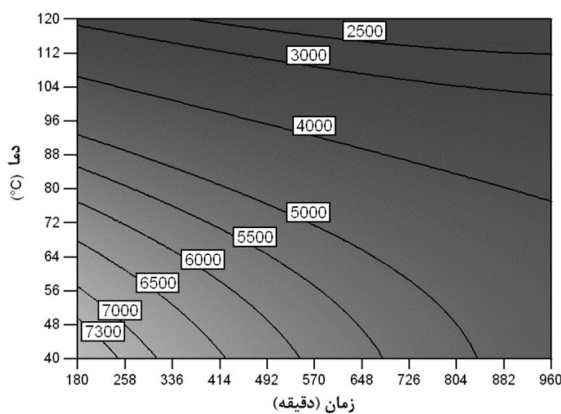
مقدار کمی دقت مدل پیشنهادی، که به نوعی بیانگر عکس خطای وارد شده در محاسبه جملات مدل رگرسیون است، باید اعداد بزرگتر از 4 را

1- Coefficient Of Determination (R2 )  
2- Adjusted-R2  
3- Predicted R2

4- lack-of-fit



شکل 3 نمودار تغییرات حد تحمل اتصالات برشی تک لبه با تغییر جزئی متغیرهای  $A$  و  $B$  حول نقطه مرکزی



شکل 4 نمودار تاثیرات هم زمان  $A$  و  $B$  مدل حد تحمل کششی اتصالات

کششی کاهش می یابد. با افزایش دمای پخت پلیمر، تمایل آن به امتزاج سریع تر و در نتیجه غیر تعادلی تر در حین فرآیند پخت افزایش می یابد و باعث ایجاد تنش پسماند در ساختار سازه می شود [25]. به علاوه حساب های هوای محبوس در حین عملیات اختلاط بیشتر انبساط می یابد. تنش پسماند می تواند عامل بروز ترک های مویی باشد که به همراه افزایش حجم حفره های هوایی می توانند از عوامل افت حد تحمل اتصالات به شمار آیند [26]. طبق این شکل انتظار می رود با کاهش هر دو پارامتر  $A$  و  $B$  از مقادیر نقطه مرکزی به عدد بالاتری برای حد تحمل اتصالات دست یافت.

#### 5-4- بررسی اثر متغیرهای پخت بر میزان جابه جایی اتصالات

نمودار تغییرات جابه جایی اتصالات با تغییرات جزئی متغیرها در اطراف نقطه مرکزی در شکل 5 نمایش داده شده است. سهم پارامتر  $A$  نسبت به پارامتر  $B$  در تغییرات ایجاد شده در جابه جایی نمونه ها (در حوالی نقطه مرکزی) بیشتر است. با احتساب درجه سفت شدگی پلیمر به عنوان عاملی اثر گذار در رفتار مکانیکی اتصالات، می توان علت تغییرات کرنش پذیری را با بهره گیری از رابطه (7) که رابطه ای از نوع آرنیوسی بوده و برای پیش بینی درجه سفت شدگی پلیمرها به کار می رود، جستجو کرد:

$$\frac{d\alpha}{dA} = k_0 \exp(-E/R(B + 273))(1 - \alpha)^n \quad (7)$$

که در آن  $k_0$  و  $n$  ثوابت فیزیکی و  $E$  انرژی فعال سازی مورد نیاز به منظور آغاز واکنش سفت شدن پلیمر است. مشهود است که سرعت واکنش سفت شدن پلیمر با افزایش دمای پخت، افزایش می یابد [26].

جدول 5 نتایج آنالیز واریانس مدل اولیه جابه جایی اتصالات برشی

ردیف	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقادیر $f$	مقادیر $p$
مدل	4/23	5	0/85	65/53	<0/0001
$A$	0/42	1	0/42	32/69	0/0007
$B$	2/21	1	2/21	171/65	<0/0001
$AB$	0/065	1	0/065	5/04	0/0596
$A^2$	0/36	1	0/36	28/04	0/0011
$B^2$	1/32	1	1/32	102/52	<0/0001
باقیمانده	0/090	7	0/013		
عدم تطابق	0/068	3	0/023	4/02	0/1061
خطای خالص	0/022	4	$5/62 \times 10^{-3}$		
ضریب تعیین	0/98				
ضریب تعیین تعدیل شده	0/96				
ضریب تعیین پیش بینی شده	0/88				
دقت مدل	23/09				

مقدار کمی دقت مدل ساده شده 19/87 است که نشانگر از دقت مطلوب آن است. به علاوه، کمیت  $f$  با مقدار 5/91 حاکی از اعتبار مدل ساده شده است. در نهایت، مدل ساده شده جابه جایی نمونه های اتصالات برشی تک لبه، با استفاده از متغیرهای کد گذاری شده به صورت رابطه (6) خواهد بود:

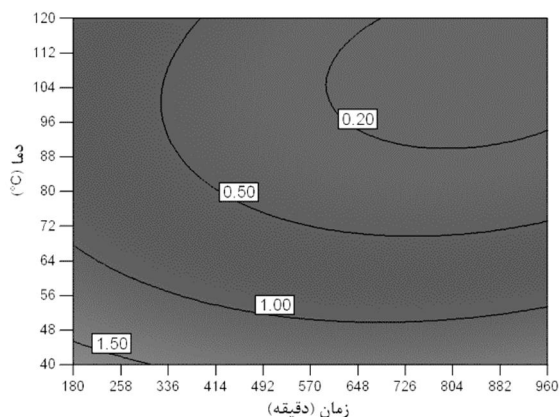
$$(6) \quad 0/38 - 0/23A - 0/52B + 0/23A^2 + 0/43B^2 = \text{جابه جایی اتصالات}$$

#### 4-4- بررسی اثر متغیرهای پخت بر حد تحمل کششی اتصالات

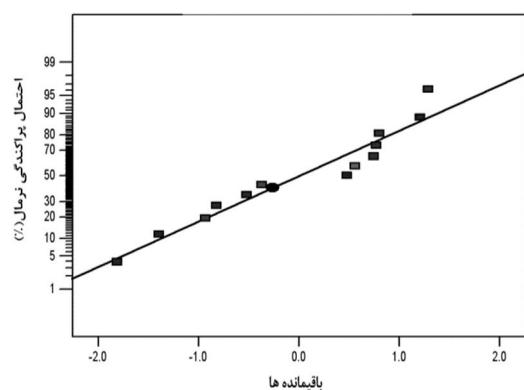
به منظور بررسی اثر مستقل هر یک از متغیرهای پخت اتصالات بر حد تحمل آن ها می توان از نمودار تغییرات جزئی هر متغیر در اطراف نقطه مرکزی استفاده کرد. نقطه مرکزی نقطه ای است که هر یک از متغیرها کد صفر را اختیار می کنند. در این پژوهش  $80^\circ\text{C}$  و 570 دقیقه به عنوان مرکز سطح انتخاب شدند. در شکل 3 تغییرات حد تحمل اتصالات برشی تک لبه، زمانی که هر یک از متغیرهای پخت از نقطه مرکزی عبور می کنند، نشان داده شده است. طبق شکل 3، تغییرات قابل توجه حد تحمل کششی اتصالات در اطراف نقطه  $80^\circ\text{C}$  از مقادیر 6000 تا 2000 نیوتن مشهود است. به علاوه شیب بیشتر تغییرات  $B$  نسبت به  $A$ ، بیانگر اثر بیشتر  $B$  بر حد تحمل کششی اتصالات است. در شکل 4 تاثیر متقابل هردو پارامتر  $A$  و  $B$  بر مدل حد تحمل اتصالات نشان داده شده است. با افزایش  $B$  از  $40^\circ\text{C}$  تا  $120^\circ\text{C}$  حد تحمل

جدول 6 نتایج آنالیز واریانس مدل نهایی جابه جایی اتصالات برشی

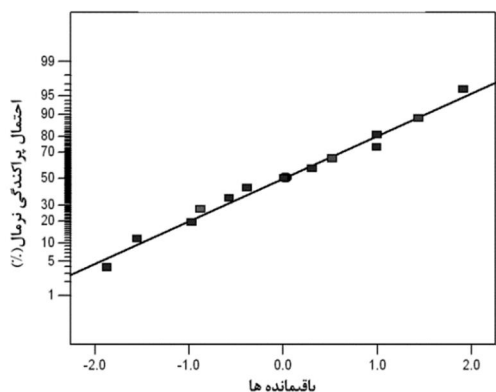
ردیف	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقادیر $f$	مقادیر $p$
مدل	4/16	4	1/04	53/58	<0/0001
$A$	0/42	1	0/42	21/72	0/0016
$B$	2/21	1	2/21	114/04	<0/0001
$A^2$	0/36	1	0/36	18/63	0/0026
$B^2$	1/32	1	1/32	68/11	<0/0001
باقیمانده	0/16	8	0/019		
عدم تطابق	0/13	4	0/033	5/91	0/0568
خطای خالص	0/022	4	$5/6 \times 10^{-3}$		
ضریب تعیین	0/96				
ضریب تعیین تعدیل شده	0/95				
ضریب تعیین پیش بینی شده	0/88				
دقت مدل	19/87				



شکل 6 نمودار تاثیرات هم زمان A و B بر مدل جابه جایی اتصالات



(الف)



(ب)

شکل 7 نمودار احتمال پراکندگی نرمال داده ها در فضای مدل (الف) حد تحمل و (ب) جابه جایی اتصالات کششی

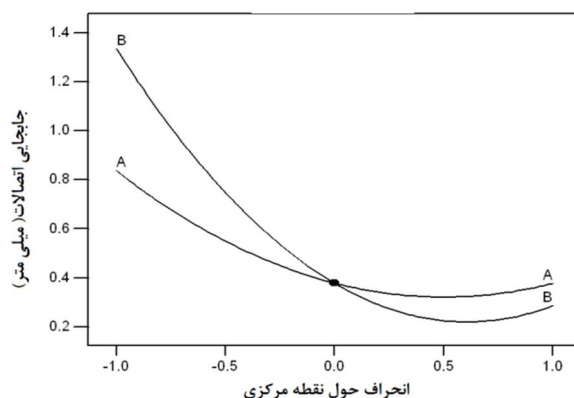
#### 7-4- مطالعه سطوح شکست نمونه ها با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی

به منظور بررسی پدیده غالب شکست رخ داده در نمونه ها، بررسی های میکروسکوپی نوری بر روی سطوح گسیخته شده فولادی و کامپوزیتی به عمل آمد. در شکل 9 سطح شکست فولاد و کامپوزیت نمونه با بیشینه استحکام نشان داده شده است. طبق این شکل پدیده غالب شکست و درصد بالایی از گسیختگی در هر دو سطح نمونه ی با استحکام بیشینه، شکست پیوستگی در لایه پلیمر واسط است.

شکل 6 نمودار تاثیر هم زمان A و B بر مدل جابه جایی اتصالات را نشان می دهد. با افزایش هر دو متغیر A و B اتصالات رفتار تردتری از خود نشان می دهند. چون با افزایش A و B، درجه سفت شدن پلیمر و در نتیجه چگالی اتصالات عرضی افزایش می یابد. این به معنی کاهش شاخه های لغزان در ساختار پلیمر و در نتیجه کاهش میزان جابه جایی است [25,26]. براساس این شکل می توان رفتار چقرمه تری را برای اتصالات آماده شده در اطراف دمای 40°C انتظار داشت.

6-4- راستی آزمایی مدل های پیشنهادی و بهینه سازی مقادیر پارامترها  
از دو رویکرد برای بررسی صحت مدل های پیشنهاد شده استفاده شده است. در روش اول از نمودار احتمال پراکندگی نرمال داده ها در فضای مدل استفاده می شود. در شکل 7 نمودار احتمال پراکندگی نرمال داده ها در فضای مدل نشان داده شده است. طبق قسمت های الف و ب شکل 7، می توان به خوبی پراکندگی خطی خطاهای مدل سازی را مشاهده کرد. این پراکندگی خطی به معنی توزیع نرمال خطاها در فضای ماتریس طراحی آزمایش ها است. لذا احتمال دخالت خطای تصادفی و اثر ترتیب انجام آزمایش ها (موسوم به اثر بلوک بندی آزمایش ها) در مدل سازی رفتار پارامترها به شدت کاهش می یابد [12]. در رویکرد دوم، مقادیر تجربی حد تحمل و جابه جایی اتصالات (که از انجام آزمایش های عملی بر نمونه ها محاسبه شده اند) با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل های ریاضی مقایسه شدند. در شکل 8 مقایسه ی بین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل ریاضی با مقادیر تجربی حاصل از آزمایش های عملی نشان داده شده است. قسمت الف و ب شکل 8 به خوبی همخوانی داده های حاصل از مدل ریاضی را با مقادیر عملی نشان می دهد و بر دقت مدل های ریاضی استخراج شده صحت می گذارد. پس از حصول اطمینان از صحت و دقت مدل ها می توان به مقادیر مطلوب هر دو متغیر A و B دست یافت. با هدف گذاری مقادیر بیشینه برای حد تحمل و جابه جایی نمونه ها در محدوده مدل سازی، مقادیر بهینه 40°C و 80 دقیقه به ترتیب برای دما و زمان فراوری اتصالات محاسبه شدند. با آماده سازی نمونه های آزمایش در دما و زمان بهینه شده مقادیر حد تحمل کششی و جابه جایی به دست آمده با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل ها مقایسه شده اند. نتایج مقایسه در جدول شماره 7 گزارش شده اند.

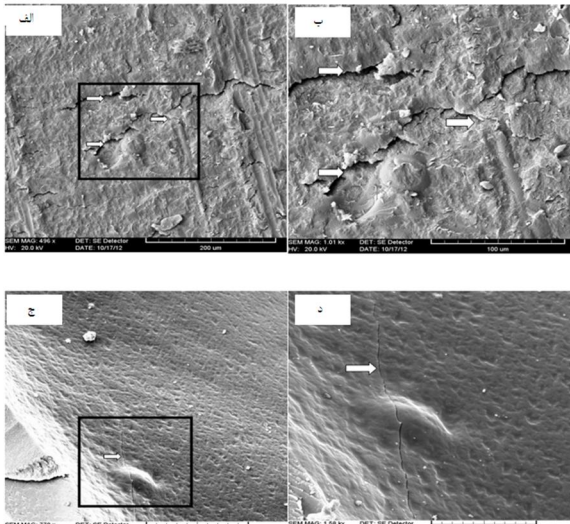
با انتخاب زمان و دمای بهینه پخت پلیمر، استحکام اتصالات در آزمون کشش به  $23/98 \text{ MPa} = (7795 \div (25 \times 13))$  افزایش یافت. به علاوه جابه جایی اتصالات به 1/70 میلی متر رسید.



شکل 5 نمودار تغییرات جابه جایی اتصالات برشی تک لبه با تغییر جزئی متغیرهای A و B حول نقطه مرکزی

## جدول 7 نتایج آزمایش‌های انطباق سنجی مقادیر بهینه‌سازی شده رویه‌های پاسخ

متغیرهای پخت اتصالات		رویه‌های پاسخ	
دما (°C)	زمان (min)	بیشینه حد تحمل اتصالات (N)	بیشینه جابه‌جایی اتصالات (mm)
40	180	7795 (تجربی عملی)	1/70 (تجربی عملی)
		7631/8 (پیش بینی)	1/66 (پیش بینی)
		2/13 (% اختلاف )	2/41 (% اختلاف )



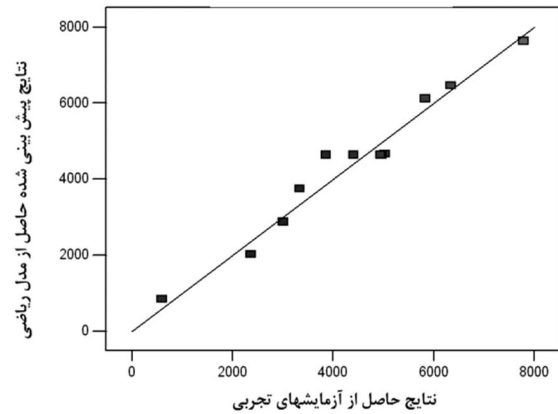
شکل 10 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی از سطوح شکست فولادی نمونه‌های برشی تک لبه با (الف و ب) بیشینه استحکام (به ترتیب با بزرگنمایی 500 و 1000 برابر) و (ج و د) کمینه استحکام (به ترتیب با بزرگنمایی 780 و 1580 برابر)

برای بررسی بیشتر نحوه پیشروی ترک، سطوح فولادی دو نمونه با بیشترین و کمترین استحکام چسبندگی، پس از گسیخته شدن توسط میکروسکوپ الکترونی روشی مورد مطالعه قرار گرفتند که در شکل 10 نشان داده شده است. طبق شکل 10، سطح شکست نمونه‌ی با بیشترین استحکام، زبری سطحی بیشتری نسبت به سطح شکست نمونه با کمینه استحکام دارد. در واقع هرچه سطح گسیخته شده ناصاف‌تر، مسیر پیشروی ترک و احتمال شاخه‌ای شدن آن بیشتر و انرژی لازم برای این کار زیادتر می‌شود و حد تحمل نمونه افزایش می‌یابد [27].

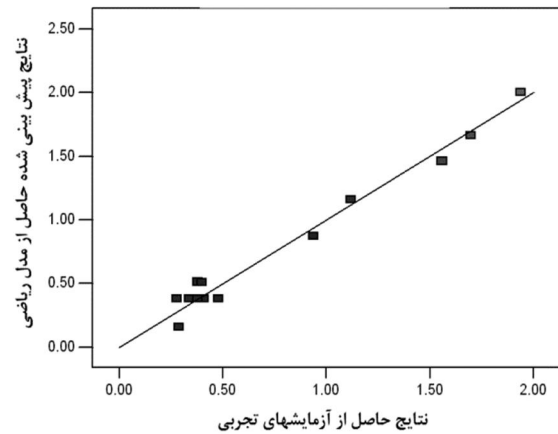
## 5- نتیجه‌گیری

در این بخش به‌طور خلاصه به نتایج حاصل شده، اشاره می‌شود:

1. روش طراحی آزمایش مرکب مرکزی چرخش پذیر با بررسی دو متغیر در پنج سطح و انجام سیزده آزمایش سیستماتیک، به‌منظور مدل‌سازی رفتار مکانیکی اتصالات کامپوزیت پایه اپوکسی - فولاد با موفقیت به‌کار برده شد.
2. نتایج آنالیز واریانس صورت گرفته روی مدل‌های پیشنهادی صحت و دقت بالای آن‌ها را به‌خوبی تایید کرد.
3. اثر گذارترین جملات در مدل ارائه شده در مورد حد تحمل نمونه‌ها، جملات  $B$  و  $B^2$  بودند.
4. اثر گذارترین جملات در مدل ارائه شده در مورد جابه‌جایی نمونه‌ها، جملات  $A$ ،  $B$ ،  $A^2$  و  $B^2$  بودند.

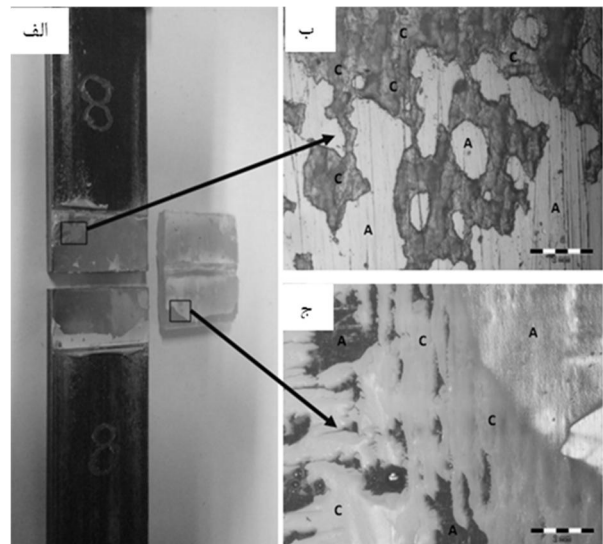


(الف)



(ب)

شکل 8 نمودار مقایسه مقادیر پیش بینی شده (توسط مدل ریاضی) با مقادیر تجربی (حاصل از آزمایش‌های عملی) (الف) حد تحمل و (ب) جابه‌جایی اتصالات کششی



شکل 9 (الف) تصویر نمونه گسیخته شده برشی تک لبه به‌همراه مواضع گسیختگی، (ب) از سطح فولاد و (ج) از سطح کامپوزیت (میکروسکوپ نوری) (A: شکست چسبندگی (از فصل مشترک دو ماده در مرز اتصال)، C: شکست پیوستگی (در لایه‌های درونی ماده در یک طرف اتصال))

- [11] H. Liu, K. Wang, P. Li, C. Zhang, D. Du, Y. Hu, X. Wang, Modeling and prediction of transmission laser bonding process between titanium coated glass and PET based on response surface methodology, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, No. 3, pp. 440-448, 2012.
- [12] A. Heidarzadeh, H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, E. Nazari, Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints, *Materials & Design*, Vol. 37, No. 0, pp. 166-173, 2012.
- [13] X. Wang, X. Song, M. Jiang, P. Li, Y. Hu, K. Wang, H. Liu, Modeling and optimization of laser transmission joining process between PET and 316L stainless steel using response surface methodology, *Optics & amp; Laser Technology*, Vol. 44, No. 3, pp. 656-663, 2012.
- [14] ASTM D 1002-99 standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal), ASTM Standards; 1999.
- [15] ASTM D 2651-90 standard guide for preparation of metal surfaces for adhesive bonding, ASTM Standards; 1990.
- [16] ASTM D 2093-97 standard practice for preparation of surfaces of plastics prior to adhesive bonding, ASTM Standards; 1997.
- [17] M. K. Jensen, B. J. Love, J. W. Grant, J. Cotton, J. R. Keiser, D. F. Wilson, Comparison study of dicyandiamide-cured epoxy bonded steel joints and polyamidoamine-cured epoxy bonded steel joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 20, No. 6, pp. 437-444, 2000.
- [18] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 6th Edition Set: John Wiley & Sons, Limited, 2007.
- [19] G. E. P. Box, K. B. Wilson, On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, in: Kotz S., Johnson N. (Eds.), *Breakthroughs in Statistics*, Springer New York, 1992, pp. 270-310.
- [20] G. E. P. Box, J. S. Hunter, Multi-Factor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 28, No. 1, pp. 195-241, 1957.
- [21] D. Moradkhani, F. Tagavi, *A Primer on the Taguchi Method*, pp. 123-125. Zanjan University Press, 2007. (In Persian)
- [22] F. Golestani-Fard, M. A. Bahrevar, E. Salahi, *Materials Characterization and Analysis Methods*, pp. 108-115, Iran University of Science & Technology Publication, 2004. (In Persian)
- [23] R. A. Fisher, *Design of Experiments*, Edinburg, Oliver & Boyd, 1951.
- [24] P. J. Ross, *Techniques for Quality Engineering*, New York, Mc Grow Hill, 1988.
- [25] K. K. Lee, K. T. Ng, C.W. Tan, Y. C. Chan, L. M. Cheng, Fabrication of smart card using UV curable anisotropic conductive adhesive (ACA.) part I: optimization of the curing conditions, *International Conference on Business of Electronic Product Reliability and Liability*, Kowloon, Hong Kong, pp. 134-9, 2004.
- [26] A. Sanchez Cebrián, M. Zogg, P. Ermanni, Methodology for optimization of the curing cycle of paste adhesives, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 40, pp. 112-9, 2013.
- [27] S.C. Zunjarrao, R.P. Singh, Characterization of the fracture behavior of epoxy reinforced with nanometer and micrometer sized aluminum particles, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 2296-305, 2006.

5. مقادیر بهینه دما و زمان پخت نمونه‌ها به‌منظور دستیابی به مقادیر بیشینه حد تحمل و جابه‌جایی نمونه‌ها به ترتیب  $40^{\circ}\text{C}$  و 180 دقیقه تعیین شد.
6. با انتخاب زمان و دمای بهینه پخت پلیمر، استحکام اتصالات در آزمون کشش به  $23/98 \text{ MPa}$   $(=25 \times 13)$  افزایش یافت. به‌علاوه جابه‌جایی اتصالات به  $1/70$  میلی‌متر رسید.
7. بررسی‌های میکروسکوپی صورت گرفته روی سطوح شکست نمونه‌ها نیز تطابق مناسبی با نتایج مدل‌های عددی داشتند.

## 6- مراجع

- [1] P. A. Gustafson, A. M. Waas, The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 10, pp. 2201-2215, 2009.
- [2] N. Valoroso, R. Fedele, Characterization of a cohesive-zone model describing damage and de-cohesion at bonded interfaces. Sensitivity analysis and mode-I parameter identification, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, No. 13, pp. 1666-1677, 2010.
- [3] B. G. Yacobi, S. Martin, K. Davis, A. Hudson, M. Hubert, Adhesive bonding in microelectronics and photonics, *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 10, pp. 6227-6262, 2002.
- [4] W. Brockmann, P. L. Geiß, J. Klöngen, B. Schröder, *Index*, in: *Adhesive Bonding*, Eds., pp. 403-414: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [5] A. Beevers, A. C. P. Kho, The performance of adhesive-bonded thin-gauge sheet-metal structures with particular reference to box-section beams, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 3, No. 1, pp. 25-29, 1983.
- [6] M. Krois, K. Dilger, S. Böhm, S. Koch, Use of compliant adhesive layers in direct glazing of road vehicles for improved sound attenuation, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 23, No. 5, pp. 413-425, 2003.
- [7] X. Wang, V. Gupta, Construction and characterization of chemically joined stainless steel/E-glass composite sections, *Mechanics of Materials*, Vol. 37, No. 12, pp. 1198-1209, 2005.
- [8] H. S. da Costa Mattos, A. H. Monteiro, R. Palazzetti, Failure analysis of adhesively bonded joints in composite materials, *Materials & Design*, Vol. 33, No. 0, pp. 242-247, 2012.
- [9] L. F. M. da Silva, P. J. C. das Neves, R. D. Adams, J. K. Spelt, Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 29, No. 3, pp. 319-330, 2009.
- [10] L. F. M. da Silva, P. J. C. das Neves, R. D. Adams, A. Wang, J. K. Spelt, Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 29, No. 3, pp. 331-341, 2009.