



Statistical-Numerical Analysis of the Geometric and Mechanical Effects of Adhesive on the Strength of Single-Edge Joints Under Tensile Loading

Seyed Mahyar Mir Mohammad Hossein Ahari ^a, Jafar Eskandari Jam ^{a*}, Mohammad Hossein Alaei ^a, Hossein Momeni, Pooya Pirali ^a

^a Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Mir Mohammad Hossein Ahari S M, Eskandari Jam J, Alaei H, Momeni H, Pirali P. Statistical-Numerical Analysis of the Geometric and Mechanical Effects of Adhesive on the Strength of Single-Edge Joints Under Tensile Loading. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;4(4):597-622

 <https://10.61882/masm.4.4.597>

KEYWORDS

Single-lap joint,
Numerical simulation,
Statistical Analysis,
Mechanical properties of
adhesive,
Joint strength.

ABSTRACT

In various industries, structures are made by connecting parts with similar or dissimilar materials. Among these, adhesive bonding is one of the methods for permanently joining structures and creating a cohesive assembly. The single-lap adhesive joint is one of the most commonly used joints in various industries, and its different aspects have been examined in previous studies. However, no research has simultaneously investigated the effects of all mechanical properties of the adhesive and its geometry. This study aims to examine the impact of both mechanical and geometric properties of adhesives using Abaqus software and numerical simulations, which have been validated against numerical and experimental results from a reference paper. The adhesive was modeled using the cohesive zone model (CZM). For the Statistical Analysis, Minitab software and the Taguchi method were employed, examining eight parameters including elastic and shear modulus, tensile and shear strength, mode I and II fracture toughness of the adhesive, adhesive thickness, and the elastic modulus of the substrate. The results showed that with the increase in mode I fracture toughness, increase in mode II fracture toughness, increase in shear strength, increase in tensile strength and increase in the elastic modulus of the substrate, the strength of the joint increases. Among the adhesive properties, the mode I fracture toughness has the highest effect on the joint strength with a contribution percentage of 28.28. Following that, tensile strength has a contribution percentage of 20.28, mode II fracture toughness has 13.24, shear strength has 8.14, and the elastic modulus of the substrate has a contribution percentage of 4.37 in the joint strength. In conclusion, it can be stated that Mode I and Mode II fracture toughness values exert a more significant influence on adhesive joint strength compared to other adhesive properties. The thickness of the adhesive has less effect on the mechanical properties of the adhesive in terms of joint strength.

Extended Abstract

1. Introduction

Designing and manufacturing suitable joints is one of the biggest challenges in structural design, especially in composite structures, as joint areas lead to discontinuities in the geometry of the structure or the properties of the materials. The structural integrity, load-bearing capacity, and load transfer between different components are directly influenced by the joints. Among these, adhesive bonding is one of the methods for permanently joining structures and creating a cohesive assembly. In adhesive joints, stress is distributed over the entire surface of the joint area, resulting in lower stress concentration at the joint compared to mechanical

* Corresponding author. Tel.: +989122172195

E-mail eskandari@mut.ac.ir

DOI: <https://10.61882/masm.4.4.597>

Received: December 31, 2024; Received in revised form: March 02, 2025; Accepted: March 15, 2025.

© Author



connections. Additionally, these types of connections exhibit good resistance to cyclic loads and fatigue. They also reduce galvanic corrosion caused by the contact of different substrates.

Dadian et al. [1] conducted an experimental and numerical study on the shear strength of a functionally graded adhesive single-lap joint, involving glass-epoxy composites and aluminum 7075. Their main objective was to achieve the best grading of adhesive properties in the overlap area to maximize the shear strength of the single-lap adhesive joint. They were able to attain a 206% increase in strength compared to the baseline sample by using symmetric adhesive grading in the overlap area, resulting in a more uniform shear stress distribution and a higher failure load. Kim et al. [2] investigated the failure force of a single-lap adhesive joint with functionally graded adhesive properties. They employed the Taguchi method and response surface methodology to analyze the effects of adhesive mechanical properties, substrate type, adhesive thickness, overlap length, and variations in adhesive properties at the overlap area. The results indicated that increasing the overlap length while reducing adhesive thickness, along with a lower percentage of soft adhesive compared to brittle adhesive, maximized the ultimate failure force for the steel-steel overlap and substrate. Breto et al. [3] studied a composite single-lap adhesive joint through numerical simulation. They continuously varied the adhesive properties as a function throughout the overlap area and obtained the optimal distribution. Since the substrate materials were not identical, the stress distribution along the joint was asymmetric; therefore, the functionally graded adhesive properties were optimally asymmetric along the joint. The results demonstrated a 70% increase in joint strength compared to the single-adhesive configuration. Rocha et al. [6] conducted a numerical investigation of various traction-separation laws in simulating the initiation of damage and its growth in a cohesive zone model, comparing the numerical results with experimental tests. They examined the length of the overlapping region and the soft and brittle adhesives for the simulation. For each of the models, they estimated the constant parameters of materials. Antunes et al. [11] validated the traction-separation law for adhesive bonding using Sika 7752 adhesive with various thicknesses both numerically and experimentally. They employed the DCB test and calculated the mode I fracture toughness for different thicknesses. For simulation, they used a cohesive zone model and a triangular model for damage growth.

2. Research Methodology

The aim of this research is to investigate the effects of adhesive mechanical properties, adhesive thickness and substrate materials on the strength of single-lap joints. To this end, a numerical simulation of the single-lap joint was first conducted using the cohesive zone modeling method and the Abaqus software. The simulation results were compared with the results from the reference article [6], validating the current research simulation. Subsequently, for Statistical analysis, the mechanical properties of the adhesive, including elastic modulus, shear modulus, tensile and shear strength, mode I and mode II of fracture toughness, as well as adhesive thickness and substrate elastic modulus, were considered for examination. Following this, an experiment design was developed using the Taguchi method with Minitab software and the proposed experiments were conducted through numerical simulation. Finally, statistical analysis was performed using the simulation results, identifying the main and interaction effects of the parameters and a linear model was presented to predict the strength force.

3. Numerical simulation and verification

In the Abaqus software, the joint was modeled in two dimensions. To apply adhesive properties, the cohesive zone model was used. The substrates were defined as homogeneous elastic-plastic materials. The properties of materials were applied in accordance with the materials present in the reference article. A static solver and geometric nonlinear analysis were employed for the simulation. Plane strain elements CPE4R were assigned to the substrates and COH2D4 to the adhesive. A comparison of the simulation results with the reference article is shown in Figure 1 to 3.

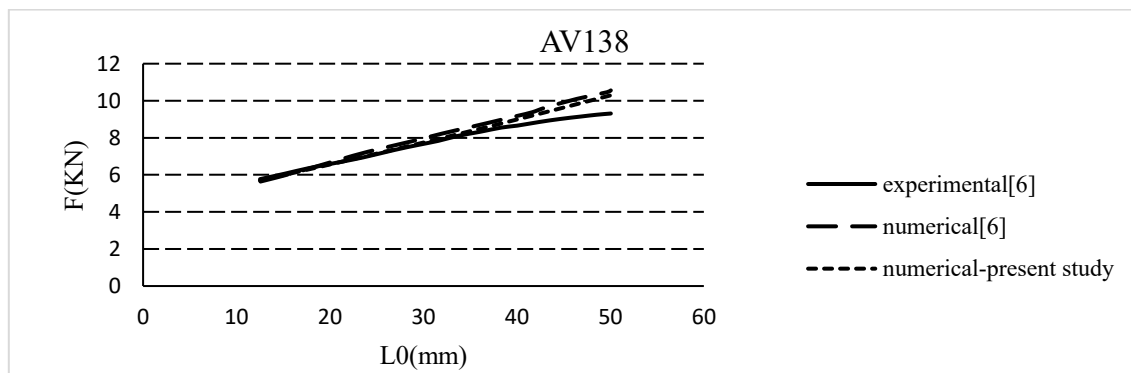


Figure 1. Comparison of the joint strength between the reference article and the present research - AV138

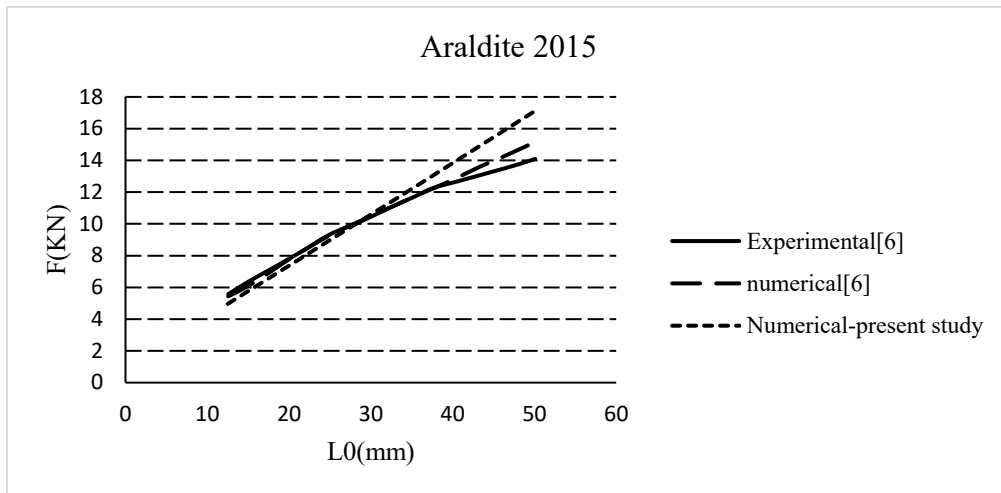


Figure 2. Comparison of the joint strength between the reference article and the present research –Araldite 2015

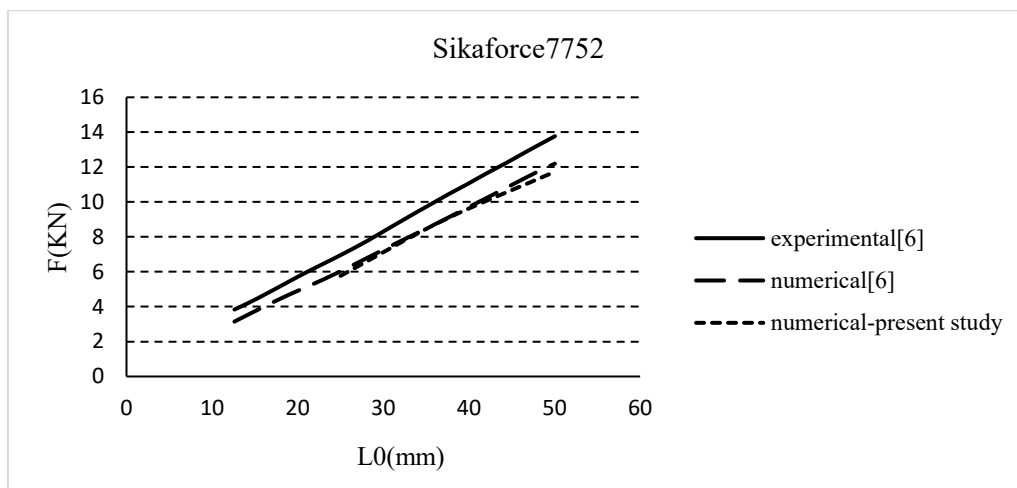


Figure 3. Comparison of the joint strength between the reference article and the present research –Sikafore 7752

4. Taguchi method

The effects of the mechanical properties of the adhesive and substrate were investigated using the Taguchi method. Here, the length of the overlap area of the joint, the length, and the thickness of the substrates are kept constant, while the thickness of the adhesive varies. The length of the substrates is set at 100 millimeters, the length of the overlap area is 25 millimeters, and the thickness of the substrates is 3 millimeters. The parameters under examination are shown in the Table 1. The L16 orthogonal array table of Taguchi method along with the answer of each test is shown in Table 2.

Table 1. Parameters and their levels

Parameters	Level 1	Level 2
Young's modulus of substrate, E_s [GPa]	20	200
Young's modulus of adhesive, E_a [GPa]	490	4890
Shear modulus of adhesive, G_a [GPa]	190	1560
Tensile strength of adhesive, t_n [MPa]	11.48	39.45
Shear strength of adhesive, t_s [MPa]	10.17	30.2
Toughness in tension of adhesive, G_{IC} [N/mm]	0.2	2.36
Toughness in shear of adhesive, G_{IIC} [N/mm]	0.38	5.41
Adhesive thickness, t_a (mm)	0.5	1.5

Table 2. Orthogonal array L16 with strength response for each test

Number of test	E_a	G_a	t_n	t_s	G_{IC}	G_{IIC}	t_a	E_s	response
1	490	190	11.48	10.17	0.2	0.38	0.5	20	2898
2	490	190	11.48	10.17	0.2	0.38	1.5	200	3350
3	490	190	39.45	30.2	2.36	5.41	0.5	20	12021
4	490	190	39.45	30.2	2.36	5.41	1.5	200	12655
5	4890	1560	11.48	10.17	2.36	5.41	0.5	20	5705
6	4890	1560	11.48	10.17	2.36	5.41	1.5	200	5825
7	4890	1560	39.45	30.2	0.2	0.38	0.5	20	3806
8	4890	1560	39.45	30.2	0.2	0.38	1.5	200	5916
9	490	1560	11.48	30.2	0.2	5.41	0.5	200	8150
10	490	1560	11.48	30.2	0.2	5.41	1.5	20	3882
11	490	1560	39.45	10.17	2.36	0.38	0.5	200	4300
12	490	1560	39.45	10.17	2.36	0.38	1.5	20	7765
13	4890	190	11.48	30.2	2.36	0.38	0.5	200	8540
14	4890	190	11.48	30.2	2.36	0.38	1.5	20	5120
15	4890	190	39.45	10.17	0.2	5.41	0.5	200	5906
16	4890	190	39.45	10.17	0.2	5.41	1.5	20	3995

5. Result

To investigate the impact of each parameter and determine which parameter has the greatest effect on the response, analysis of variance should be used. To create the analysis of variance table, the sum of squares for each parameter must be calculated. The results of the analysis of variance are presented in Table 3.

Table 3. Results of the analysis of variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	% of contribution
Ea	1	6512704	6512704	6512704	5.1
Ga	1	5216656	5216656	5216656	4.08
tn	1	10390952	10390952	10390952	8.14
ts	1	25872482	25872482	25872482	20.28
GI	1	36084049	36084049	36084049	28.28
GII	1	16900321	16900321	16900321	13.24
ta	1	496320	496320	496320	0.38
Es	1	5581406	5581406	5581406	4.37
Ea*ta	1	715716	715716	715716	0.561
Ga*ta	1	2010724	2010724	2010724	1.57
tn*ta	1	8142462	8142462	8142462	6.38
ts*ta	1	3124056	3124056	3124056	2.44
GI*ta	1	1218816	1218816	1218816	0.95
GII*ta	1	4032064	4032064	4032064	3.16
ta*Es	1	1275770	1275770	1275770	1.00
Total	15	127574500			100

As seen in Table 3, regarding the percentage of contribution, the greatest effect on the response is from the Mode I fracture toughness of the adhesive, at 28.28 percent, followed by shear strength and Mode II fracture toughness of the adhesive at 20.28 and 13.24 percent, respectively. The least effect is associated with adhesive thickness and the interaction effect of adhesive thickness with elastic modulus and Mode I fracture toughness of the adhesive.

6. Conclusion

In this research, the single-lap adhesive joint, in which the adhesive was modeled as cohesive zone model, was simulated using Abaqus software. This simulation was then validated against the results of a reference article. After validating the simulation, the effects of the mechanical properties of the adhesive, adhesive thickness, and the elastic modulus of the substrate on the strength of the single-lap joint under tensile loading were numerically investigated using design of experiments and the Taguchi method. The results of the analyses were obtained as follows. With the increase in mode I of fracture toughness, mode II of fracture toughness, shear strength, tensile strength, and the elastic modulus of the substrate, the strength of the joint increases. Among the properties of the adhesive, mode I of fracture toughness has the most significant effect on joint strength, with a contribution percentage of 28.28. Following that, tensile strength comes next with 28.20, mode II of fracture toughness with 24.13, shear strength with 14.08, and the elastic modulus of the substrate with 4.37 percent contribution in joint strength. As the elastic modulus of the adhesive, shear modulus of the adhesive, and adhesive thickness increase,

the strength of the joint decreases, with the adhesive thickness having the least effect on joint strength, with a contribution percentage of 0.38. Among the interactive effects of adhesive thickness with the other parameters, its interactive effect with tensile strength, mode II of fracture toughness, and shear strength has the highest effects, with contribution percentages of 6.38, 3.16, and 2.44 percent, respectively, while its least effect is with the elastic modulus of the adhesive and the elastic modulus of the substrate, with a contribution percentage of approximately 1 percent. In brittle adhesives (high elastic modulus), increasing the adhesive thickness leads to a decrease in joint strength. In adhesives with low shear modulus, increasing the thickness leads to a reduction in strength, while in adhesives with high shear modulus, it results in an increase in joint strength. In adhesives with high tensile strength, increasing the adhesive thickness results in an increase in strength, whereas in adhesives with low tensile strength, it leads to a decrease in joint strength. In adhesives with high shear strength, increasing the adhesive thickness decreases strength, while in adhesives with low shear strength, it results in an increase in strength. In adhesives with high mode I of fracture toughness, increasing the adhesive thickness does not significantly change the joint strength, but in adhesives with low first mode fracture toughness, it leads to a decrease in joint strength. In adhesives with high mode II of fracture toughness, increasing the adhesive thickness results in a decrease in strength, while in adhesives with low mode II of fracture toughness, it leads to an increase in joint strength.



تحلیل آماری - عددی اثرات هندسی و مکانیکی چسب بر استحکام اتصال تک لبه تحت بارگذاری کششی

سید مهیار میر محمد حسین آهاری^{الف}، جعفر اسکندری جم^ب، محمد حسین علایی^{ج*}، حسین مومنی^د، پویا پیر علی^ه

^{الف} دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، mahyar.ahari90@gmail.com

^ب استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، eskandari@mut.ac.ir

^ج استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، mhallace@mut.ac.ir

^د دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، h_momeni@mut.ac.ir

^ه استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، ppirali@mut.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
در صنایع مختلف سازه‌ها از اتصال قطعات با جنس‌های مشابه یا غیرمشابه ساخته می‌شوند. در این میان اتصال چسبی یکی از روش‌های پیوند و یا اتصال دائمی ساختارها و ایجاد یک مجموعه یکپارچه است. اتصال تک لبه چسبی از پرکاربردترین اتصالات در صنایع مختلف می‌باشد که در تحقیق‌های پیشین موضوعات مختلف آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اما تحقیقی که در آن اثر تمام خواص مکانیکی چسب و هندسه تواما با هم بررسی شوند، صورت نگرفته است. در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و شبیه‌سازی عددی که با نتایج عددی و تجربی یک مقاله مرجع صحت‌گذاری شده است به بررسی اثر خواص مکانیکی و هندسی چسب بر استحکام اتصال پرداخته شود. برای مدل‌سازی چسب از مدل ناحیه چسبنده استفاده گردید. برای تحلیل آماری از نرم‌افزار مینی‌تب و روش تاگوچی استفاده شده است و ۸ پارامتر از قبیل مدول الاستیک و برشی، استحکام کششی و برشی، چقرمگی شکست مود اول و دوم چسب، ضخامت چسب و مدول الاستیک زیرآیند مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش چقرمگی شکست مود اول، افزایش چقرمگی شکست مود دوم، افزایش استحکام برشی، افزایش استحکام کششی و افزایش مدول الاستیک زیرآیند، میزان استحکام اتصال افزایش می‌یابد. در بین خواص چسب چقرمگی شکست مود اول با درصد مشارکت ۲۸/۲۸ بیشترین اثر را در استحکام اتصال دارد. پس از آن به ترتیب استحکام کششی با ۴/۲۸، چقرمگی شکست مود دوم با ۱۳/۲۴ و استحکام برشی با ۸/۱۴ و مدول الاستیک زیرآیند با ۴/۳۷ درصد، بیشترین سهم مشارکت در استحکام اتصال را دارا می‌باشند. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد که چقرمگی‌های شکست مود اول و دوم نسبت به بقیه خواص چسب تأثیر به‌سزایی در استحکام اتصال چسبی دارند و ضخامت چسب نسبت به خواص مکانیکی چسب اثر کم‌تری در استحکام اتصال دارد.	اتصال تک لبه، شبیه‌سازی عددی، تحلیل آماری، خواص مکانیکی چسب، استحکام اتصال. تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

۱- مقدمه

در صنایع مختلف سازه‌ها از اتصال قطعات با جنس‌های مشابه یا غیرمشابه ساخته می‌شوند. این سازه‌ها بر اساس کاربرد

در صنایع مختلفی از قبیل حمل و نقل (خودرو، کشتی و هواپیما)، ساختمان، الکترونیک، پتروشیمی و ورزشی دارای مواد، هندسه و روش مونتاژ منحصر به خود هستند. طراحی و ساخت اتصال مناسب یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در طراحی سازه‌ها و به‌ویژه در سازه‌های کامپوزیتی است، زیرا نواحی اتصال به ناپیوستگی در هندسه سازه و خصوصیات مواد منجر می‌شود. صلبیت سازه، تحمل بارهای اعمالی و انتقال بار بین اجزای مختلف با تأثیر مستقیم اتصال‌ها صورت می‌گیرد. در این میان اتصال چسبی یکی از روش‌های پیوند و یا اتصال دائمی ساختارها و ایجاد یک مجموعه یکپارچه است. در اتصالات چسبی تنش بر روی کل سطح ناحیه اتصال توزیع می‌شود و علی‌رغم اتصال مکانیکی تمرکز تنش کم‌تری در محل اتصال ایجاد می‌شود. همچنین این‌گونه اتصالات مقاومت خوبی در برابر بارهای نوسانی و خستگی دارند. این اتصالات، خوردگی گالوانیک^۱ ناشی از تماس زیرآیندهای مختلف را کاهش می‌دهند. میرایی سازه را با افزایش سفتی سازه افزایش می‌دهند. علاوه بر این برای اتصال جنس‌های مشابه و غیرمشابه استفاده می‌شوند و باعث افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی اتصال می‌شوند. در مقابل، چسب‌ها نسبت به قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی مانند دما و رطوبت دچار افت خواص می‌گردند. چسب‌ها در پدیده خزش و آسایش تنش ضعف دارند. البته به دلیل ماهیت کاربرد بیشتر اتصالات چسبی در تحمل بار سازه‌ای (تنش ثابت) پدیده خزش اثر مهم‌تری در اتصال دارد که با افزایش تغییر شکل منجر به رشد ترک در لبه‌های اتصال می‌گردد. از جمله معایب دیگر چسب‌ها می‌توان به ضعف آن‌ها تنش‌های پوست کنی، زمان‌بر بودن پخت چسب، نیاز به آماده‌سازی سطح، ارزیابی و بازرسی پیچیده اشاره کرد. در این موضوع پژوهش‌های فراوانی انجام شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

دادیان و رهنما [۱] در پژوهش خود به بررسی تجربی و عددی استحکام اتصال لبه‌ای مدرج هدفمند چسبی، با زیرآیندهای کامپوزیت شیشه اپوکسی و آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداختند. هدف اصلی آن‌ها، دستیابی به بهترین درجه‌بندی خواص چسب در ناحیه هم-پوشانی جهت بیشینه نمودن استحکام برشی اتصال چسبی تک‌لبه‌ای بوده است. آن‌ها توانستند که با درجه‌بندی متقارن چسب ناحیه اتصال، به توزیع تنش برشی یکنواخت‌تر و بار شکست در مقایسه با نمونه پایه به افزایش ۲۰۶٪ در استحکام دست یابند. کیم و همکاران [۲] به بررسی نیروی شکست اتصال چسبی تک‌لبه با خواص چسب تابعی پرداختند. آن‌ها برای بررسی اثر خواص مکانیکی چسب، نوع زیر آینه، ضخامت چسب، طول همپوشانی و نحوه تغییرات خواص چسب در محل اتصال از روش تاگوچی و پاسخ سطح استفاده کردند. برای جنس زیرآینه فولاد-فولاد، کربن اپوکسی-فولاد و کربن اپوکسی-کربن اپوکسی را در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش طول همپوشانی، کاهش ضخامت چسب، درصد کمتر چسب نرم نسبت به ترد برای طول همپوشانی و زیرآینه فولاد- فولاد بیشترین نیروی نهایی شکست حاصل می‌شود. برتو و همکاران [۳] با شبیه‌سازی نرم‌افزاری به بررسی اتصال چسبی ترکیبی تک‌لبه پرداختند. جنس زیرآیندها کامپوزیت شیشه اپوکسی و آلومینیوم بودند. آن‌ها در طول ناحیه اتصال، خواص چسب را به صورت تابعی و به صورت پیوسته تغییر دادند و توزیع بهینه را به دست آوردند. از آنجایی که جنس زیرآیندها یکسان نیست توزیع تنش در طول اتصال نامتقارن است و به همین دلیل خواص تابعی چسب در طول اتصال در حالت بهینه به صورت نامتقارن است. نتایج افزایش ۷۰ درصدی استحکام اتصال نسبت به حالت تک چسب را نشان داد. شاهرخی نسب و همکاران [۴] برای بررسی استحکام برشی و پوست کنی اتصال تک‌لبه از چسب ترکیبی استفاده کردند. برای ارزیابی اتصال، شرایط بارگذاری با نرخ کشش ۵ و ۱۰۰ mm/min در دماهای محیط ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مطالعه شده است. در این بررسی پنج نوع چسب در اتصال تک‌لبه برشی مورد بررسی قرار گرفته که شامل چسب اپوکسی، چسب سیلیکون، اپوکسی حاوی لاستیک مایع، چسب ترکیبی اپوکسی-سیلیکون و چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع می‌باشد. نتایج حاکی از استحکام برشی بالاتر در اتصال چسبی حاوی چسب ترکیبی اپوکسی-سیلیکون نسبت به دیگر چسب‌ها در آزمون تک‌لبه برشی است. استین و همکاران [۵] به ارائه‌ی مدل تحلیلی برای پیش‌بینی تنش عمودی و برشی اتصال چسبی تک‌لبه با سفتی تابعی چسب با زیرآیندهای فولادی پرداختند. برای حل معادله دیفرانسیل به دست آمده از تعادل جزئی چسب و زیرآینه، از سری‌های توانی استفاده کردند. سپس برای صحت‌گذاری مدل تحلیلی از نرم‌افزار آباکوس و شبیه‌سازی المان محدود استفاده کردند که نتایج دقت مناسبی را نشان می‌داد. آن‌ها توزیع تابعی سفتی چسب را به صورت سه تابع کسینوسی، سهمی و

^۱ galvanic corrosion

چندجمله‌ای درجه ۴ در نظر گرفتند. روچا و همکارش [۶] به بررسی عددی مدل‌های مختلف تنش-جدایش در شبیه‌سازی شروع آسیب و رشد آن در مدل ناحیه چسبیده پرداختند و نتایج عددی را با آزمون‌های تجربی مقایسه کردند. طول ناحیه همپوشانی و چسب‌های نرم و ترد را برای شبیه‌سازی بررسی کردند. برای هر کدام از مدل‌ها پارامترهای ثابت را تخمین زدند. گلیچ و همکاران [۷] با شبیه‌سازی المان محدود به بررسی ضخامت چسب بر استحکام اتصال پرداختند. برای مدل‌سازی چسب از خواص الاستیک استفاده کردند. هاسگاو و همکاران [۸] به بررسی خواص چقرمگی شکست اتصال چسبی ضخیم با چسب نرم و منعطف پرداختند. چسب‌های لاستیکی با مدول خیلی پایین، دارای شکل‌پذیری زیادی هستند که برای جذب انرژی در ضربه و حتی مقاومت به خستگی مناسب می‌باشند. برای مشخصه‌یابی خواص از چسب پلی‌اورتان با ضخامت ۳ میلی‌متر و زیرآیندهای کامپوزیتی شیشه-اپوکسی استفاده کردند. همچنین در مقاله دیگری [۹] به مدل‌سازی و پیش‌بینی پاسخ اتصال چسبی با خواص شکست در مقاله اول خود پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی چسب ضخیم از دو مدل الاستیک-پلاستیک و ناحیه چسبیده استفاده کردند. ناحیه‌هایی از چسب که با زیرآیندها در تماس بودند را به‌صورت ناحیه چسبیده و ناحیه میانی چسب را به‌صورت الاستیک-پلاستیک مدل کردند. نصر صالح و همکاران [۱۰] به بررسی اثر نوع چسب برای مشخصات شکست مود اول در اتصال چسبی ضخیم برای کاربرد در صنایع دریایی پرداختند. آن‌ها از چسب پایه اپوکسی که رفتاری تقریباً ترد با ازدیاد طول ۴ درصد و از چسب پایه آکریل که دارای تغییر شکل پذیری بالا با ازدیاد طول ۴۰ تا ۶۰ درصد بود، استفاده کردند. برای ضخامت چسب مقادیر ۲/۶ و ۸ میلی‌متر را برای آزمایش‌های کشش، کشش-فشار و DCB در نظر گرفتند. طبق نتایج انرژی لازم برای رشد ترک در چسب نرم ۴ تا ۱۰ برابر بیشتر از چسب ترد بوده است. آنتونس و همکاران [۱۱] قانون تنش-جدایش را برای اتصال چسبی با چسب سیکا ۷۷۵۲ و ضخامت‌های مختلف به‌صورت عددی و تجربی صحت‌گذاری کردند. آن‌ها آزمایش DCB را به کار بردند و چقرمگی شکست مود اول به ازای ضخامت‌های مختلف را محاسبه کردند. برای شبیه‌سازی از مدل ناحیه چسبیده و برای رشد آسیب از مدل مثلثی استفاده کردند. گرت و همکاران [۱۲] به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت به دلیل افزایش گشتاور خمشی بالاتر میزان تحمل بار اتصال کاهش می‌یابد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت چسب و تأثیر آن در استحکام اتصال به نتیجه یکسانی منجر نشده است. داسیلوا و همکاران [۱۳] به بررسی اثر ضخامت چسب، ضخامت زیرآیند، جنس زیرآیند و چسب، آماده‌سازی سطوح و سرعت بارگذاری اتصال تک‌لبه چسبی با زیرآیند فولادی پرداختند. برای چسب از سه نوع رزین پلی‌یورتان خیلی نرم، اپوکسی خیلی ترد و اپوکسی متوسط و برای فولاد از دو جنس با استحکام تسلیم بالا و استحکام تسلیم پایین استفاده کردند. آن‌ها از روش تاگوچی^۲ برای طراحی آزمایش استفاده کردند و با استفاده از تحلیل واریانس، اثرات پارامترها را بررسی کردند و مدل رگرسیون برای پیش‌بینی بار واماندگی اتصال به دست آوردند. متهری و همکاران [۱۴] با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس به بررسی تغییرات هندسی چسب و زیرآیند در لبه‌های اتصال تک‌لبه پرداختند. آن‌ها با ایجاد گردی در لبه چسب و بریدگی در لبه زیرآیند سعی کردند که تمرکز تنش در لبه‌ها را کاهش و در نتیجه استحکام اتصال را افزایش دهند. رانگاسوامی و همکاران [۱۵] به‌صورت تجربی و با استفاده از روش تاگوچی و شبکه عصبی به بررسی استحکام اتصال تک‌لبه پرداختند. دو پارامتر طول ناحیه همپوشانی و ضخامت چسب را در طراحی آزمایش در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که طول همپوشانی نسبت به ضخامت چسب اثر بیشتری در استحکام اتصال دارد و برهمکنش بین این دو پارامتر ناچیز است. مختاری و همکارش [۱۶] به بررسی رفتار دینامیکی اتصال T شکل کامپوزیتی با ناحیه چسبی مدرج پله‌ای بر اساس مدل رفتار تابعی پرداختند. آن‌ها تحلیل مودال اتصال و آنالیز رفتار دینامیکی اتصال تحت بار نیم سینوسی گذرا در نرم‌افزار آباکوس^۳ انجام دادند. نتایج ۳۴ درصد تغییر در فرکانس طبیعی اول و تغییر شکل مودهای ارتعاشی را نشان داد. کریمان و همکارش [۱۷] به بررسی تجربی تأثیر عملیات سطحی مختلف بر رفتار شکست مود اول اتصال چسبی کامپوزیت-آلومینیوم پرداختند. عملیات سطحی با سه روش پوسته‌کنی، سنباده‌زنی و لیزر برای زیرآیندهای کامپوزیتی و دو روش سنباده‌زنی و لیزر برای زیرآیندهای آلومینیومی انجام شد. نتایج نشان دهنده افزایش ۱۳ درصدی چقرمگی شکست مود اول با استفاده از روش لیزر نسبت به روش سنباده‌زنی و افزایش ۷ درصدی چقرمگی شکست مود اول نسبت به روش پوسته‌کنی بوده است.

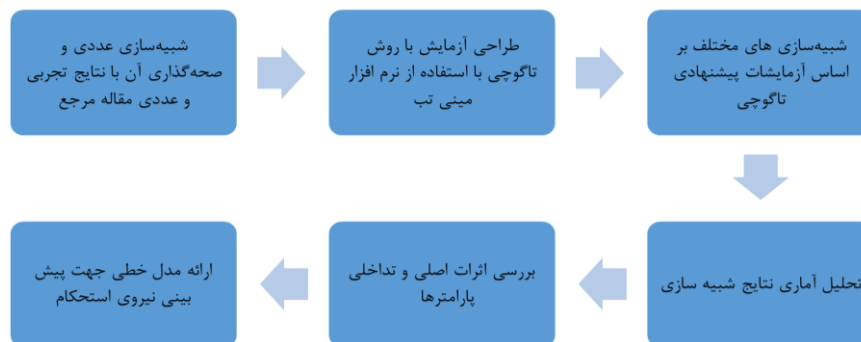
² Taguchi method

³ Abaqus

همان‌طور که در پژوهش‌های پیشین ذکر شد استحکام اتصال چسبی تک‌لبه به ازای چسب‌های مختلف با ضخامت متفاوت، با زیرآیندهای مختلف به‌صورت جداگانه بررسی شده‌اند. در واقع هر تحقیق اثر یک یا دو خواص مکانیکی از چسب را بر استحکام اتصال بررسی کردند. به‌عنوان مثال در مقاله روچا و همکارش [۶] که مبنای شبیه‌سازی پژوهش حاضر می‌باشد فقط اثر مدول الاستیک چسب را بررسی کردند و بقیه پارامترهای مورد بررسی آن‌ها مربوط به مدل‌های مختلفی بود که در مدل ناحیه چسبیده استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر سعی شده است که به تحلیل حساسیت تمام خواص مکانیکی چسب که در مدل ناحیه چسبیده استفاده می‌شود، هم‌زمان با تغییر ضخامت چسب و سفتی زیرآیندها پرداخته شود و میزان تأثیر هر کدام از خواص بررسی شود. هدف از این بررسی این بوده است که بتوان فهمید کدام از خواص چسب اثر مهم‌تری در استحکام اتصال در بارگذاری کششی دارند تا بتوان با بهبود آن خواص، استحکام بالاتری از اتصال تک‌لبه به دست آورد. برای این کار از روش تاگوچی که آزمایش‌های کم‌تری نسبت به بقیه روش‌های آماری جهت تحلیل حساسیت ارائه می‌دهد، استفاده شده است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش هدف بررسی اثرات خواص مکانیکی چسب، ضخامت چسب و جنس زیرآیندها بر استحکام اتصال تک‌لبه می‌باشد. بدین منظور ابتدا شبیه‌سازی نرم‌افزاری اتصال تک‌لبه با استفاده از روش مدل‌سازی ناحیه چسبیده و با نرم‌افزار آباکوس انجام شد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج مقاله مرجع [۶] مقایسه و شبیه‌سازی پژوهش حاضر صحت‌گذاری گردید. سپس برای تحلیل آماری، خواص مکانیکی چسب از قبیل مدول الاستیک، مدول برشی، استحکام کششی و برشی، چقرمگی اول و دوم و همچنین ضخامت چسب و مدول الاستیک زیرآیند عواملی بودند که جهت بررسی در نظر گرفته شدند. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب^۴ به طراحی آزمایش با روش تاگوچی پرداخته شد و آزمایش‌های پیشنهادی به‌صورت شبیه‌سازی عددی انجام شد. در آخر با استفاده از نتایج شبیه‌سازی تحلیل آماری صورت گرفت و اثرات اصلی و تداخلی پارامترها مشخص شدند و یک مدل خطی به‌منظور پیش‌بینی نیروی استحکام ارائه گردید. در شکل ۱ روند نمای اجرای پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۱ روند نمای اجرای پژوهش

۳- شبیه‌سازی عددی

در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۲۱ استفاده شده است. در شبیه‌سازی برای پیش‌بینی مقدار نیروی قابل تحمل اتصال از مدل ناحیه چسبیده برای مدل‌سازی چسب استفاده شده است.

۳-۱- تئوری مدل ناحیه چسبیده

از مدل ناحیه چسبیده به‌طور وسیعی برای تحلیل شکست در اتصالات چسبی، مواد فلزی، کامپوزیتی و سرامیکی استفاده شده است. مدل ناحیه چسبیده بر پایه مفاهیم مکانیک شکست، آسیب مکانیکی را مدل‌سازی می‌کند. اساس روش مدل ناحیه

^۴ Minitab software

چسبیده بر پایه معرفی رابطه ساختاری نرم‌شونده در ناحیه‌ی آسیب دیده اطراف نوک ترک است. المان‌هایی که از این روش تبعیت می‌کنند را المان‌های کوهسیو^۵ می‌نامند. این دسته‌ی المانی از قانون تنش-جدایش^۶ پیروی می‌کنند. مزیت‌های این مدل برای مدل‌سازی آسیب مکانیکی باعث شده است تا استفاده از آن روز به روز افزایش یابد. از مزیت‌های مهم این روش قابلیت شروع و رشد آسیب در قالب یک مدل واحد است و نیازی برای تعریف اولیه ترک نمی‌باشد.

در مدل ناحیه چسبیده سطح زیر نمودار تنش-جدایش در کشش و برش به ترتیب چقرمگی شکست بحرانی مود اول (G_{IC}) و چقرمگی شکست بحرانی مود دوم (G_{IIC}) می‌باشد. در نمودار تنش-جدایش که از قانون مثلثی^۷ تبعیت می‌کند، فرض می‌شود که رفتار چسب در ابتدا و همچنین پس از شروع آسیب به صورت الاستیک و خطی می‌باشد. در تئوری ناحیه چسبیده برای شروع آسیب دو معیار تنش پایه و کرنش پایه وجود دارد. در معیار تنش پایه دو رابطه تنش اسمی بیشینه^۸ و تنش اسمی درجه ۲^۹ در دسترس است که به ترتیب در رابطه ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. همچنین در معیار کرنش پایه دو رابطه کرنش اسمی بیشینه^{۱۰} و کرنش اسمی درجه ۲^{۱۱} در دسترس است که به ترتیب در رابطه ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند [۱۸].

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \cdot \frac{t_s}{t_s^0} \right\} = 1 \quad (۱)$$

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (۲)$$

$$\max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \cdot \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\} = 1 \quad (۳)$$

$$\left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (۴)$$

در رابطه‌های بالا t_n و t_s به ترتیب مؤلفه‌های تنش در راستای عمودی و برشی داخل صفحه و t_n^0 و t_s^0 به ترتیب مؤلفه‌های تنش بحرانی در راستای عمودی و برشی داخل صفحه هستند. همچنین ε_n و ε_s به ترتیب مؤلفه‌های کرنش در راستای عمودی و برشی داخل صفحه و ε_n^0 و ε_s^0 به ترتیب مؤلفه‌های کرنش بحرانی در راستای عمودی و برشی داخل صفحه هستند. علامت $\langle \rangle$ گروه مکانی بوده و به معنی عدم شروع آسیب در تنش و کرنش فشاری است. رشد آسیب با استفاده از انرژی شکست کنترل می‌شود. برای تحلیل مود ترکیبی رشد آسیب می‌توان از هر یک از دو معیار توانی و بنزگا-کنان^{۱۲} که به ترتیب در رابطه‌های ۵ و ۶ آورده شده‌اند، استفاده نمود [۱۹].

$$\left\{ \frac{G_I}{G_{IC}} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_{II}}{G_{IIC}} \right\}^\alpha = 1 \quad (۵)$$

$$G_{IC} + (G_{IC} + G_{IIC}) \left\{ \frac{G_s}{G_T} \right\}^\eta = G_C \quad (۶)$$

که α پارامتر معیار توانی نامیده می‌شود که برای هر ماده، عدد خاص مربوط به خود را دارد. G_I و G_{II} مرتبط با کار انجام شده توسط تنش و جابجایی نسبی مربوط به آن به ترتیب در راستای عمودی و برشی می‌باشند. η پارامتر مربوط به هر ماده و $G_T = G_I + G_s$ و $G_s = G_{II} + G_{III}$ می‌باشند.

در پژوهش حاضر جهت صحت‌گذاری شبیه‌سازی مطابق مقاله روچا و همکاران [۶] در مدل‌سازی چسب از معیار تنش پایه درجه ۲ برای شروع آسیب و از معیار توانی برای رشد آسیب استفاده شده است.

⁵ cohesive

⁶ Traction-separation

⁷ triangular law

⁸ MAXS (Maximum Stress)

⁹ QUADS (Quadratic Stress)

¹⁰ MAXE (Maximum Strain)

¹¹ QUADE (Quadratic Strain)

¹² Benzeggagh-Kenane

۲-۳- مشخصات مواد

طبق مقاله روچا و همکاران [۶] برای زیرآیندها از جنس آلومینیوم استحکام بالا و تغییر شکل پذیر AA6082 T651 که خواص آن در جدول ۱ آورده شده است، استفاده گردیده است. همچنین برای چسبها از چسب ترد^{۱۳} AV138، چسب نرم^{۱۴} آرالدایت^{۱۵} ۲۰۱۵ و چسب پلی اورتان Sikaforce 7752 که خواص آنها در آورده شده، استفاده شده است. در جدول ۳ خواص مربوط به مدل سازی ناحیه چسبنده چسبهای مذکور آورده شده است.

جدول ۱ مشخصه ماده آلومینیوم AA6082 T651 [۶]

مقدار	مشخصه
۷۰	E[GPa]
۲۶۱	σ_y [MPa]
۳۲۴	σ_f [MPa]
۲۱/۷	ϵ_f [%]

جدول ۲ مشخصات مکانیکی چسبها [۶]

AV138	Araldite2015	Sikaforce 7752	مشخصه
۴/۸۹	۱/۸۵	۰/۴۹	E[GPa] (مدول یانگ)
۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳	ν (ضریب پواسون)
۳۶/۴۹	۱۲/۶۳	۳/۲۴	σ_y [MPa] (تنش تسلیم کششی)
۳۹/۴۵	۲۱/۶۳	۱۱/۴۸	σ_f [MPa] (استحکام کششی)
۱/۲۱	۴/۷۷	۱۹/۱۸	ϵ_f [%] (کرنش شکست کششی)
۱/۵۶	۰/۵۶	۰/۱۹	G[GPa] (مدول برشی)
۲۵/۱	۱۴/۶	۵/۱۶	τ_y [MPa] (تنش تسلیم برشی)
۳۰/۲	۱۷/۹	۱۰/۱۷	τ_f [MPa] (استحکام برشی)
۷/۸	۴۳/۹	۵۴/۸۲	γ_f [%] (کرنش شکست برشی)
۰/۲	۰/۴۳	۲/۳۶	G_{IC} [N/mm] (چقرمگی شکست در کشش)
۰/۳۸	۴/۷	۵/۴۱	G_{IIC} [N/mm] (چقرمگی شکست در برش)

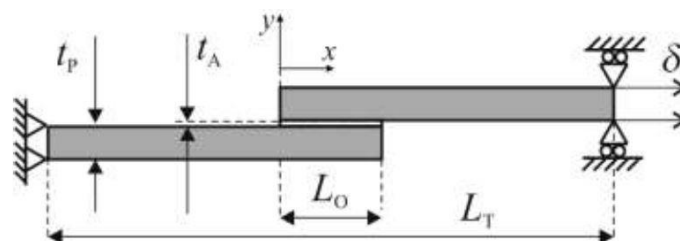
جدول ۳ خواص مربوط به مدل ناحیه چسبنده [۶]

AV138	Araldite2015	Sikaforce 7752	مشخصه
۴/۸۹	۱/۸۵	۰/۴۹	E[GPa]
۱/۵۶	۰/۵۶	۰/۱۹	G[GPa]
۳۹/۴۵	۲۱/۶۳	۱۱/۴۸	t_n^0 [MPa]
۳۰/۲	۱۷/۹	۱۰/۱۷	t_s^0 [MPa]
۰/۲	۰/۴۳	۲/۳۶	G_{IC} [N/mm]
۰/۳۸	۴/۷	۵/۴۱	G_{IIC} [N/mm]

۳-۳- هندسه اتصال

در شبیه سازی اتصال تکلبه مدل هندسی به صورت دوبعدی و مانند شکل ۲ در نظر گرفته شده است. ابعاد و اندازه طول هر زیرآیند، طول ناحیه همپوشانی، ضخامت چسب و ضخامت زیرآیندها در جدول ۴ آورده شده است.

¹³ Brittle¹⁴ Ductile¹⁵ Araldite



شکل ۲ هندسه اتصال تکلبه [۶]

جدول ۴ مشخصات هندسی اتصال تکلبه

مشخصات هندسی	اندازه (mm)
t_p	۳
t_A	۰/۲
L_0	۵۰، ۳۷/۵، ۲۵، ۱۲/۵
L_T	۱۷۰

۳-۴- جزئیات مدل سازی

در نرم افزار آباکوس برای مدل سازی دوبعدی اتصال تکلبه، مطابق شکل ۲ هندسه اتصال به صورت یک پارت^{۱۶} یکپارچه مدل سازی و از المان های پوسته^{۱۷} استفاده گردید. در این حالت یکپارچه دیگر نیازی به تعریف قیودی تماسی بین زیرآیندها و چسب نمی باشد. در تعریف خواص مواد همان طور که طبق بخش های قبل ذکر شد برای پیش بینی نیروی قابل تحمل استحکام اتصال از مدل ناحیه چسبنده استفاده گردید و خواصی که در جدول ۳ آورده شده است به چسب اختصاص داده شد. زیرآیندها به صورت ماده همگن الاستیک-پلاستیک تعریف گردیدند. از حل گر استاتیکی و تحلیل غیرخطی هندسی برای شبیه سازی استفاده شد. برای اعمال شرایط مرزی مطابق شکل ۲ یک طرف اتصال به صورت گیردار و طرف دیگر آن با اعمال جابجایی در راستای x به صورت استاتیکی و خطی^{۱۸} تحت کشش قرار گرفته است. در این شبیه سازی دما ثابت در نظر گرفته شده است. المان های کرنش صفحه ای CPE4R برای زیرآیندها و COH2D4 برای چسب مطابق [۶] که منجر به دقت مناسب شبیه سازی با نتایج تجربی شده بود، اختصاص داده شد. قابل ذکر است که مدل ناحیه چسبنده به اندازه المان ها در مش بندی غیر حساس می باشد [۲۰]. باین وجود تحلیل حساسیت به مش انجام شد. با توجه به ضخامت چسب ۰/۲ میلی متر، اندازه المان ها مطابق جدول ۵ بررسی شدند. نمودار همگرایی در شکل ۳ نشان داده شده است. بنابراین اندازه مش طوری انتخاب گردید که زمان حل شبیه سازی به کمترین زمان خود برسد با توجه به شکل ۳ در شبیه سازی، اندازه مش ۰/۲*۰/۲ در نظر گرفته شد. در شکل ۴ نمایی از مش بندی نشان داده شده است.

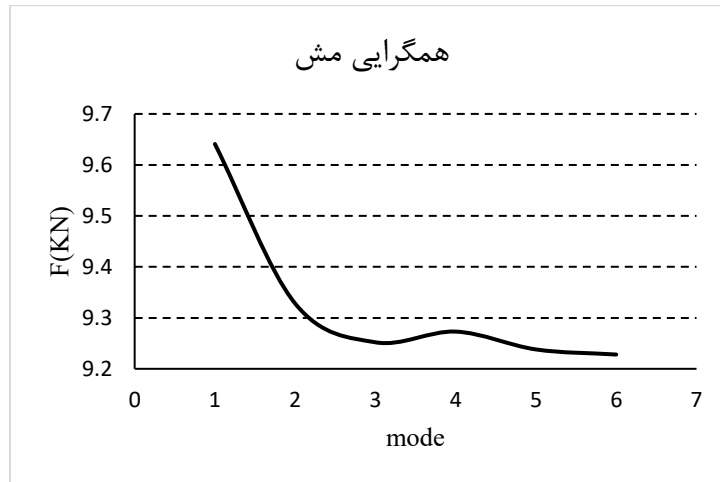
جدول ۵ اندازه المان ها برای بررسی همگرایی مش

حالت	اندازه مش (میلی متر)	نیروی استحکام (نیوتن)
۱	۰/۲*۱	۹۶۴۱
۲	۰/۲*۰/۵	۹۳۲۸
۳	۰/۲*۰/۴	۹۲۵۲
۴	۰/۲*۰/۳	۹۲۷۳
۵	۰/۲*۰/۲	۹۲۳۸
۶	۰/۲*۰/۱	۹۲۲۸

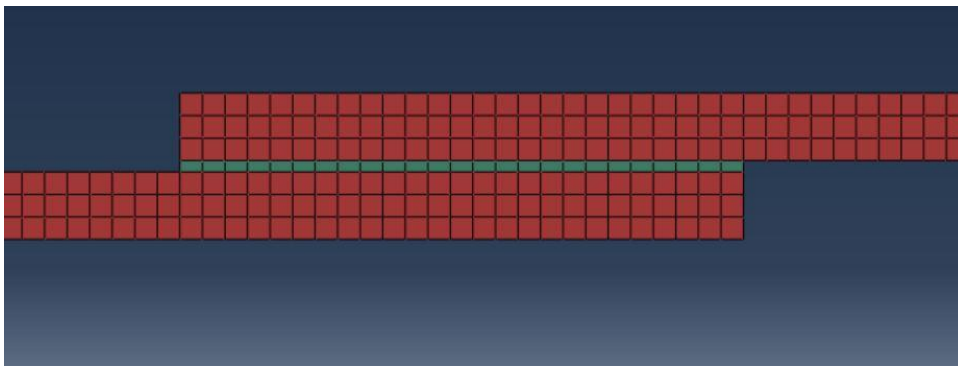
¹⁶ Part

¹⁷ Shell

¹⁸ Ramp



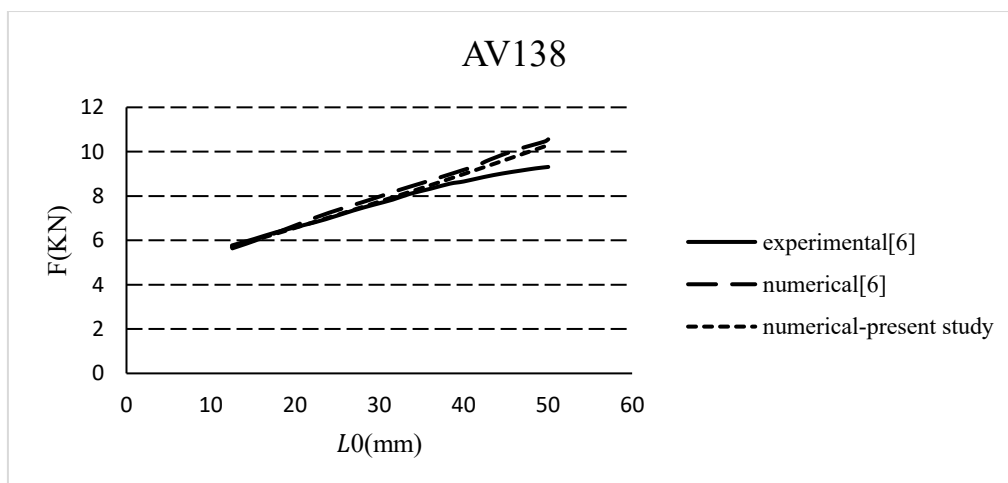
شکل ۳ نمودار همگرایی مش



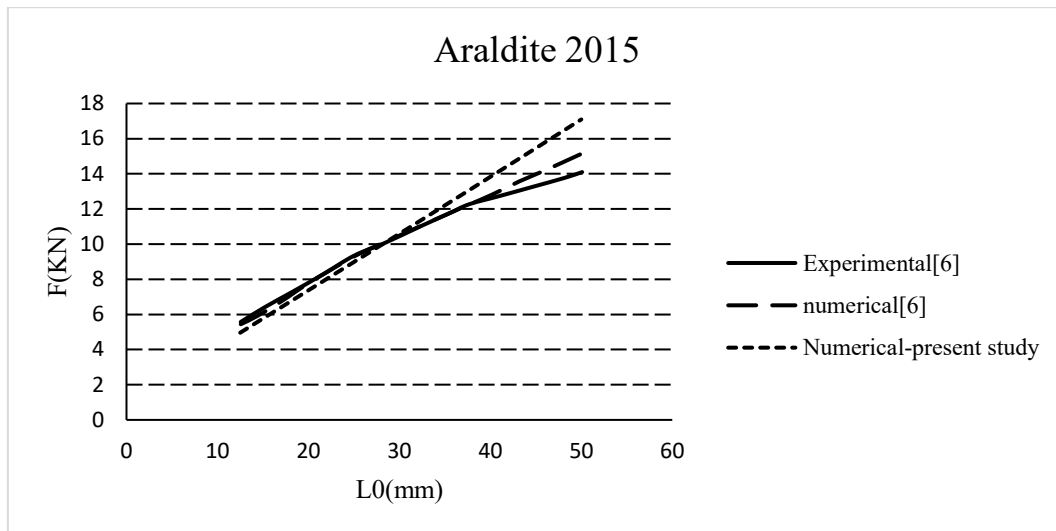
شکل ۴ مش بندی زیر آیندها و چسب

۴- صحت سنجی شبیه سازی

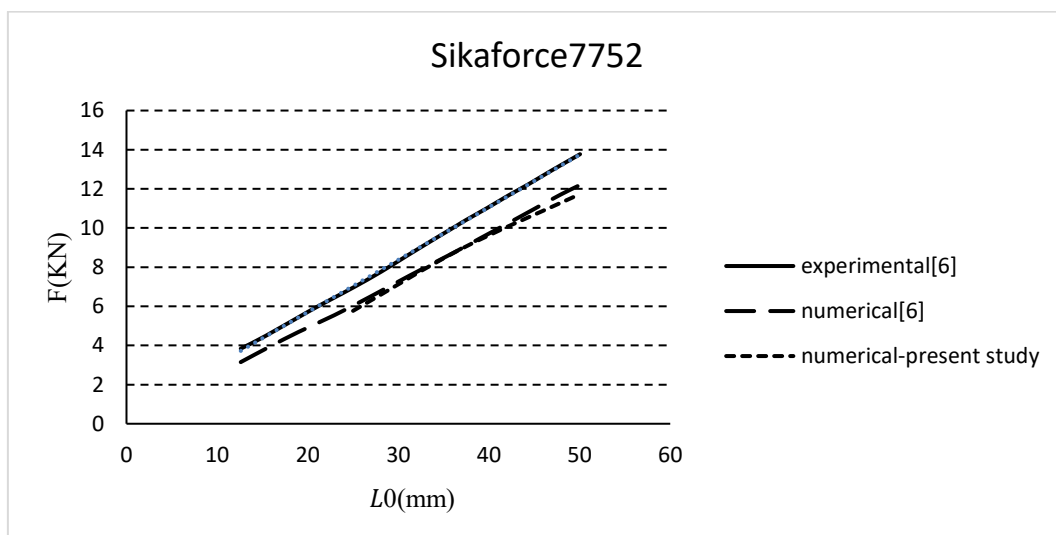
همان طور که طبق بخش ۲ فرایند شبیه سازی شرح داده شد به ازای چسبها و طولهای همپوشانی مختلف چسب در اتصال، شبیه سازی صورت گرفت و نتایج پژوهش حاضر با نتایج مقاله مرجع مقایسه گردید که در شکل ۵ تا ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵ مقایسه استحکام اتصال مقاله مرجع و پژوهش حاضر - چسب AV138



شکل ۶ مقایسه استحکام اتصال مقاله مرجع و پژوهش حاضر - چسب آرالدایت^{۱۹} ۲۰۱۵



شکل ۷ مقایسه استحکام اتصال مقاله مرجع و پژوهش حاضر - چسب سیکافورس^{۲۰}

طبق شکل ۵ تا ۷ مشاهده می شود که نتایج بین پژوهش حاضر و مقاله مرجع [۶] اختلاف چندانی ندارند و شبیه سازی حاضر دارای دقت مناسبی است. همچنین در جدول ۶ نتایج شبیه سازی پژوهش حاضر با شبیه سازی مقاله مرجع مقایسه شده و ضریب همگرایی^{۲۱} آن برای چسب های مختلف آورده شده است. اعداد ضریب همگرایی نزدیک به یک می باشد که نشان دهنده دقت شبیه سازی می باشد. در شکل ۸ به ترتیب مراحل مختلف شروع و رشد آسیب در چسب تا حذف المان ها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود به دلیل یکسان بودن جنس زیرآیندها نحوه رشد آسیب در طرفین ناحیه همپوشانی چسب به صورت متقارن می باشد. در شکل ۸ تصویر شماره ۱ بیانگر مرحله قبل از شروع آسیب می باشد که در آن پارامتر مربوط به آسیب مقادیر کمتر از ۱ را در کانتور نشان می دهد، تصویر شماره ۲ بیانگر شروع آسیب می باشد که در لبه ها متغیر آسیب در المان ها به مقدار ۱ رسیده و حذف گردیده اند. تصویر شماره ۳ رشد تدریجی آسیب و حذف المان های بیشتری را نشان می دهد و در تصویر شماره ۴ مقدار متغیر آسیب در همه المان ها به مقدار ۱ رسیده است و حذف شده اند. در شکل ۹ نمودار بار-جابجایی مراحل متناظر با هر کدام از تصاویر شکل ۸ نشان داده شده است.

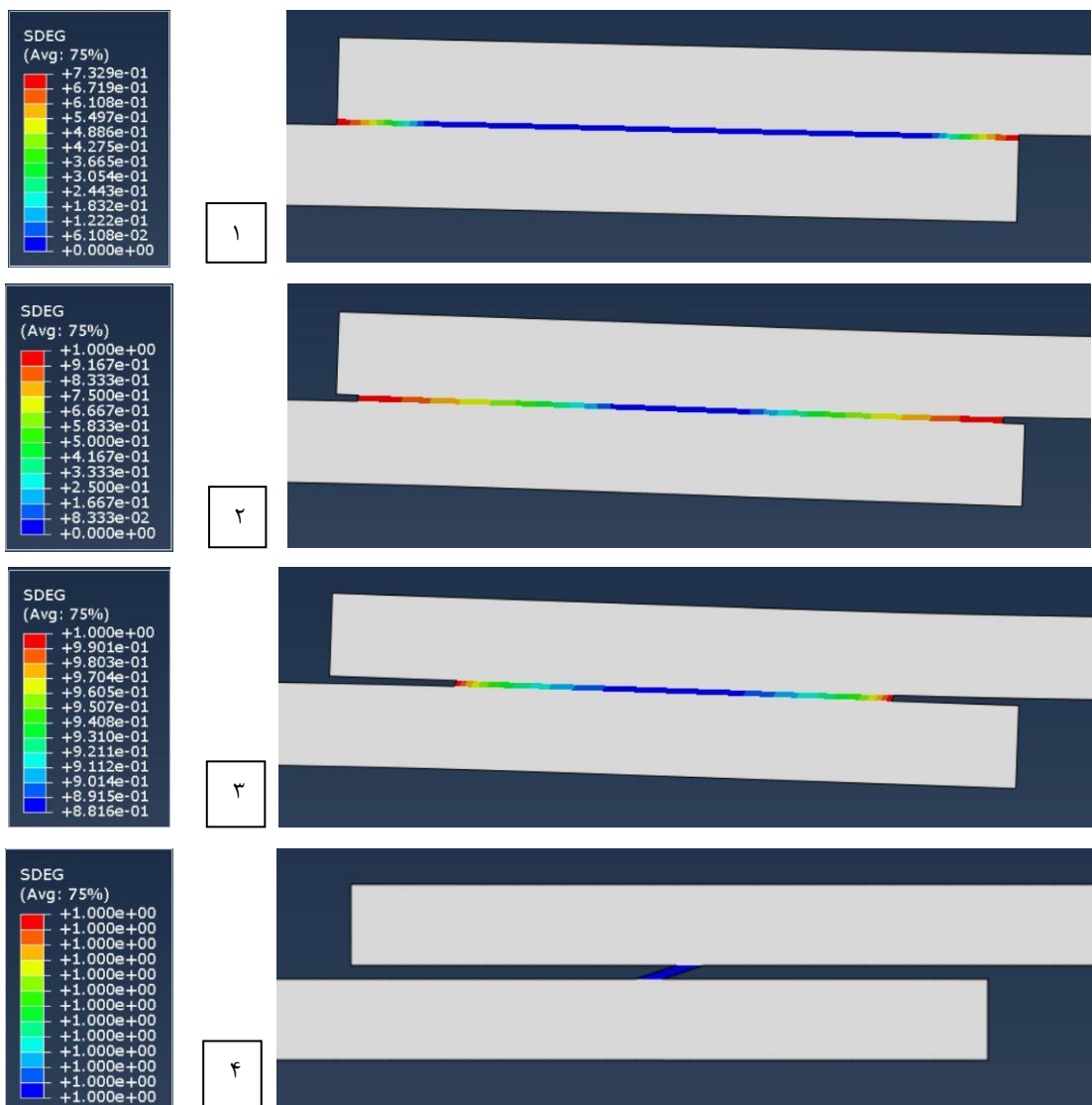
¹⁹ Araldite

²⁰ Sikafore

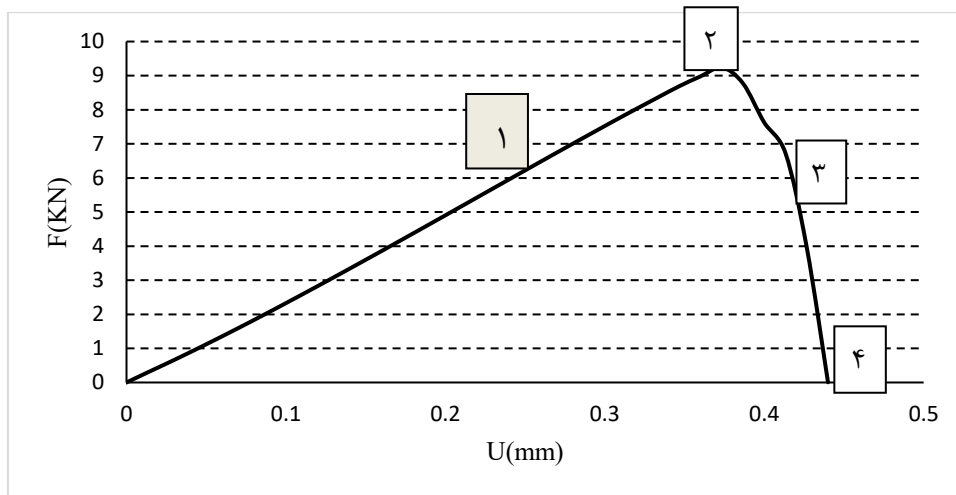
²¹ Correlation Ratio (R^2)

جدول ۶ مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر با مقاله مرجع [۱۶]

طول ناحیه چسب	AV138			Araldite 2015			Sikaforce7752		
میلی‌متر	نیروی شبیه‌سازی پژوهش (کیلو نیوتن)	نیروی شبیه‌سازی مقاله مرجع (کیلو نیوتن)	R^2	نیروی شبیه‌سازی پژوهش (کیلو نیوتن)	نیروی شبیه‌سازی مقاله مرجع (کیلو نیوتن)	R^2	نیروی شبیه‌سازی پژوهش (کیلو نیوتن)	نیروی شبیه‌سازی مقاله مرجع (کیلو نیوتن)	R^2
۱۲/۵	۵/۶	۵/۷		۴/۷	۵/۷		۲/۹	۳	
۲۵	۷/۲	۷/۳	۰/۹۸	۸/۲	۸/۹	۰/۹۵	۵/۸	۶/۱	۰/۹۹
۳۷/۵	۸/۷	۸/۹		۱۲/۲	۱۲/۱		۸/۸	۹/۱	
۵۰	۱۰/۲	۱۰/۵		۱۶/۳	۱۵/۴		۱۱/۸	۱۲/۱	



شکل ۸ مراحل مختلف شروع و رشد آسیب در چسب (شماره ۱ تا ۴)



شکل ۹ نمودار بار-جابجایی

۵- طراحی آزمایش

در پژوهش حاضر هدف بررسی استحکام اتصال تک‌لبه تحت بارگذاری کششی با افزایش ضخامت چسب می‌باشد. بدین منظور به بررسی اثرات خواص مکانیکی چسب و زیرآیند بر استحکام اتصال پرداخته شده است. شکل شماتیک هندسه مورد بررسی مانند شکل ۲ می‌باشد. در این جا طول ناحیه همپوشانی اتصال، طول و ضخامت زیرآیندها ثابت نگه داشته شده است و ضخامت چسب متغیر می‌باشد. طول زیرآیندها ۱۰۰ میلی‌متر، طول ناحیه همپوشانی ۲۵ میلی‌متر و ضخامت زیرآیندها ۳ میلی‌متر لحاظ شده است. به دلیل این‌که در اتصال تک‌لبه زمانی که زیرآیندها دارای جنس یکسان باشند توزیع تنش در ناحیه همپوشانی به صورت متقارن و زمانی که دارای جنس متفاوت باشند توزیع تنش به صورت نامتقارن می‌باشد و در نحوه شروع و رشد آسیب در چسب اثرگذار هستند، در این پژوهش برای زیرآیند پایینی اتصال جنسی دارای مدول الاستیک برابر ۷۰ گیگاپاسکال تعریف شده است و برای زیرآیند بالایی دو مدول الاستیک مختلف که اختلاف چشمگیری با مدول الاستیک زیرآیند پایینی داشته باشند، در نظر گرفته شده است که اثر اختلاف سفتی در هنگام بارگذاری کششی و گشتاور خمشی ایجاد شده از آن در نتایج به‌خوبی مشخص شود. برای بررسی اثر چسب، دو نوع چسب که رفتار نرم و ترد داشته باشند در نظر گرفته شده است که بتوان اثرات آن با افزایش ضخامت چسب و همچنین اختلاف سفتی بین دو زیرآیند را به‌خوبی بررسی کرد. خواص چسب نرم همان خواص چسب Sikaforce 7752 و چسب ترد همان AV138 می‌باشد. با توجه به توضیحات ذکر شده تعداد پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش ۸ عدد که هر کدام دارای دو سطح می‌باشند که در جدول ۷ آورده شده است. برای تحلیل اثر هر پارامتر و بررسی آماری نتایج از روش تاگوجی استفاده شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود. قابل ذکر است که تمام مراحل شبیه‌سازی مانند همان روشی است که در بخش‌های قبل جزییات و صحت سنجی آن شرح داده شده است.

جدول ۷ پارامترهای مورد بررسی و سطوح آن

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲
E_s [GPa] (مدول الاستیک زیرآیند)	۲۰	۲۰۰
E_a [GPa] (مدول الاستیک چسب)	۴۹۰	۴۸۹۰
G_a [GPa] (مدول برشی چسب)	۱۹۰	۱۵۶۰
t_n [MPa] (استحکام کششی چسب)	۱۱/۴۸	۳۹/۴۵
t_s [MPa] (استحکام برشی چسب)	۱۰/۱۷	۳۰/۲
G_{IC} [N/mm] (چقرمگی شکست مود اول چسب)	۰/۲	۲/۳۶
G_{IIC} [N/mm] (چقرمگی شکست مود دوم چسب)	۰/۳۸	۵/۴۱
t_d [mm] (ضخامت چسب)	۰/۵	۱/۵

۱-۵- طراحی تاگوچی

با استفاده از روش تاگوچی می‌توان تابع‌های گوناگون پاسخ را برحسب پارامترهای مشخص شده تخمین زد. نتایج تخمین زده شده ما را در به دست آوردن عواملی که به بهترین نتایج برای آزمایش مدنظر منجر می‌شود، یاری می‌کند. با اجرای آزمایش‌ها در سطوح بهینه پارامترها و مقایسه نتایج واقعی با مقدار تخمین زده شده، دقت طراحی انجام شده مشخص می‌شود. روش تاگوچی در مقایسه با روش‌های عاملی مزایایی چون کمتر بودن تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه کمتر بودن هزینه و زمان آزمایش، قابلیت بررسی اثرهای متقابل و انجام دادن آزمایش‌ها به صورت موازی و در نهایت پیش‌بینی پاسخ بهینه را دارد. در این روش از مزیت هر دو روش تک عاملی و فاکتوریل استفاده شده است و فاقد عیب‌های آن‌ها است، بدین معنا که از تعداد آزمایش‌های کمتری استفاده شده و اثر متقابل بین پارامترها را نیز مطالعه می‌کند. تاگوچی برای طراحی و اجرای آزمایش‌ها، طبق قواعد خاصی مجموعه‌ای از جدول‌ها با عنوان آرایه‌های متعامد ارائه می‌دهد. آرایه‌های متعامد این امکان را فراهم می‌کنند تا با انجام دادن کمترین تعداد آزمایش، اثرهای اصلی و متقابل بررسی شوند. هدف اصلی طراحی تاگوچی مطالعه اثرهای اصلی پارامترها است اما در صورت نیاز می‌توان برای تخمین اثرهای متقابل دوتایی نیز استفاده شود که در این صورت چیدمان آرایه‌های متعامد متفاوت خواهد بود. در روش تاگوچی چنانچه یک اثر متقابل بین دو یا چند پارامتر بررسی شود با آن همانند یک پارامتر رفتار شده و ستونی از آرایه متعامد به آن اختصاص داده می‌شود. تاگوچی برای تعداد ۸ پارامتر که هر کدام دو سطح دارند آرایه متعامد L16 را پیشنهاد می‌دهد که این آرایه دارای ۱۵ ستون می‌باشد که علاوه بر ۸ پارامتر اصلی می‌توان ۷ ستون دیگر آن را برای اثر تداخل دوتایی در نظر گرفت. در این پژوهش علاوه بر پارامترهای اصلی، اثر تداخل ضخامت چسب با بقیه پارامترها که به تعداد ۷ پارامتر می‌باشد، بررسی شده‌اند که در این حالت تمام ستون آرایه‌های L16 تکمیل می‌شود. به‌طور کلی، تاگوچی دو روش برای تحلیل نتایج ارائه می‌دهد.

جدول ۸ آرایه متعامد L16 با پاسخ نیروی استحکام اتصال برای هر آزمایش

آزمایش	E_a	G_a	t_n	t_s	G_{IIc}	G_{IC}	t_a	E_s	پاسخ (نیرو)
۱	۴۹۰	۱۹۰	۱۱/۴۸	۱۰/۱۷	۰/۲	۰/۳۸	۰/۵	۲۰	۲۸۹۸
۲	۴۹۰	۱۹۰	۱۱/۴۸	۱۰/۱۷	۰/۲	۰/۳۸	۱/۵	۲۰۰	۳۳۵۰
۳	۴۹۰	۱۹۰	۳۹/۴۵	۳۰/۲	۲/۳۶	۵/۴۱	۰/۵	۲۰	۱۲۰۲۱
۴	۴۹۰	۱۹۰	۳۹/۴۵	۳۰/۲	۲/۳۶	۵/۴۱	۱/۵	۲۰۰	۱۲۶۵۵
۵	۴۸۹۰	۱۵۶۰	۱۱/۴۸	۱۰/۱۷	۲/۳۶	۵/۴۱	۰/۵	۲۰	۵۷۰۵
۶	۴۸۹۰	۱۵۶۰	۱۱/۴۸	۱۰/۱۷	۲/۳۶	۵/۴۱	۱/۵	۲۰۰	۵۸۲۵
۷	۴۸۹۰	۱۵۶۰	۳۹/۴۵	۳۰/۲	۰/۲	۰/۳۸	۰/۵	۲۰	۳۸۰۶
۸	۴۸۹۰	۱۵۶۰	۳۹/۴۵	۳۰/۲	۰/۲	۰/۳۸	۱/۵	۲۰۰	۵۹۱۶
۹	۴۹۰	۱۵۶۰	۱۱/۴۸	۳۰/۲	۰/۲	۵/۴۱	۰/۵	۲۰۰	۸۱۵۰
۱۰	۴۹۰	۱۵۶۰	۱۱/۴۸	۳۰/۲	۰/۲	۵/۴۱	۱/۵	۲۰	۳۸۸۲
۱۱	۴۹۰	۱۵۶۰	۳۹/۴۵	۱۰/۱۷	۲/۳۶	۰/۳۸	۰/۵	۲۰۰	۴۳۰۰
۱۲	۴۹۰	۱۵۶۰	۳۹/۴۵	۱۰/۱۷	۲/۳۶	۰/۳۸	۱/۵	۲۰	۷۷۶۵
۱۳	۴۸۹۰	۱۹۰	۱۱/۴۸	۳۰/۲	۲/۳۶	۰/۳۸	۰/۵	۲۰۰	۸۵۴۰
۱۴	۴۸۹۰	۱۹۰	۱۱/۴۸	۳۰/۲	۲/۳۶	۰/۳۸	۱/۵	۲۰	۵۱۲۰
۱۵	۴۸۹۰	۱۹۰	۳۹/۴۵	۱۰/۱۷	۰/۲	۵/۴۱	۰/۵	۲۰۰	۵۹۰۶
۱۶	۴۸۹۰	۱۹۰	۳۹/۴۵	۱۰/۱۷	۰/۲	۵/۴۱	۱/۵	۲۰	۳۹۹۵

روش اول که به آن روش استاندارد گفته می‌شود همان روشی است که بر مبنای محاسبه اثر پارامترها و انجام تحلیل واریانس انجام می‌پذیرد. روش دوم که تاگوچی آن را برای آزمایش‌های همراه با تکرار بسیار توصیه کرده است، روش نسبت سیگنال به

نویز است. به عبارت دیگر، نسبت سیگنال به نویز^{۲۲} پراکندگی در اطراف یک مقدار مشخص را بیان می کند. هر چه این نسبت بیش تر باشد، پراکندگی کم تر بوده و اثر آن متغیر مهم تر خواهد بود. در این پژوهش به دلیل این که آزمایش ها در واقع همان تحلیل هایی هستند که با توجه به جدول آرایه متعامد در نرم افزار آباکوس شبیه سازی می شوند و تکرار هر ردیف آزمایش منجر به جواب یکسان در نرم افزار می شود، تکرار معنا و مفهومی پیدا نمی کند. بدین منظور از روش اول که مقادیر میانگین را بررسی می کند استفاده می گردد. برای تحلیل تاگوچی از نرم افزار مینی تب استفاده شده است. در جدول ۸ به ترتیب آزمایش ها همراه با نتایج نیروی شکست آورده شده اند.

۶- نتایج آماری

در این بخش نتایج آماری مختلف که از تحلیل تاگوچی به دست می آید، توضیح داده شده است.

۶-۱- تحلیل واریانس^{۲۳}

برای بررسی اثرگذاری هر یک از پارامترها و تعیین پارامتری که بیشترین اثر را بر پاسخ دارد باید از تحلیل واریانس استفاده نمود. برای تشکیل جدول تحلیل واریانس باید مجموع مربعات را برای هر یک از پارامترها محاسبه کرد. درصد مشارکت^{۲۴} میزان تأثیر هر پارامتر را بر روی پاسخ نشان می دهد که از تقسیم کردن مجموع مربعات هر پارامتر به مجموع مربعات کل و ضرب کردن مقدار حاصل شده در عدد ۱۰۰ به دست می آید. درجه آزادی پارامترهای اصلی یک واحد از تعداد سطوح آن کم تر می باشد و درجه آزادی اثرات تداخل از ضرب درجه آزادی پارامترهای اصلی مرتبط به آن به دست می آید. نتایج تحلیل واریانس در جدول ۹ آورده شده است. در واقع درصد مشارکت نشان دهنده بزرگی اثر هر یک از پارامترها است. برای تحلیل نتایج سطح اطمینان^{۲۵} ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است.

جدول ۹ نتایج تحلیل واریانس و درصد مشارکت هر پارامتر

% of contribution	Adj MS	Adj SS	Seq SS	DF	Source
۵/۱	۶۵۱۲۷۰۴	۶۵۱۲۷۰۴	۶۵۱۲۷۰۴	۱	Ea
۴/۰۸	۵۲۱۶۶۵۶	۵۲۱۶۶۵۶	۵۲۱۶۶۵۶	۱	Ga
۸/۱۴	۱۰۳۹۰۹۵۲	۱۰۳۹۰۹۵۲	۱۰۳۹۰۹۵۲	۱	tn
۲۰/۲۸	۲۵۸۷۲۴۸۲	۲۵۸۷۲۴۸۲	۲۵۸۷۲۴۸۲	۱	ts
۲۸/۲۸	۳۶۰۸۴۰۴۹	۳۶۰۸۴۰۴۹	۳۶۰۸۴۰۴۹	۱	GI
۱۳/۲۴	۱۶۹۰۰۳۲۱	۱۶۹۰۰۳۲۱	۱۶۹۰۰۳۲۱	۱	GII
۰/۳۸	۴۹۶۳۲۰	۴۹۶۳۲۰	۴۹۶۳۲۰	۱	ta
۴/۳۷	۵۵۸۱۴۰۶	۵۵۸۱۴۰۶	۵۵۸۱۴۰۶	۱	Es
۰/۵۶۱	۷۱۵۷۱۶	۷۱۵۷۱۶	۷۱۵۷۱۶	۱	Ea*ta
۱/۵۷	۲۰۱۰۷۲۴	۲۰۱۰۷۲۴	۲۰۱۰۷۲۴	۱	Ga*ta
۶/۳۸	۸۱۴۲۴۶۲	۸۱۴۲۴۶۲	۸۱۴۲۴۶۲	۱	tn*ta
۲/۴۴	۳۱۲۴۰۵۶	۳۱۲۴۰۵۶	۳۱۲۴۰۵۶	۱	ts*ta
۰/۹۵	۱۲۱۸۸۱۶	۱۲۱۸۸۱۶	۱۲۱۸۸۱۶	۱	GI*ta
۳/۱۶	۴۰۳۲۰۶۴	۴۰۳۲۰۶۴	۴۰۳۲۰۶۴	۱	GII*ta
۱	۱۲۷۵۷۷۰	۱۲۷۵۷۷۰	۱۲۷۵۷۷۰	۱	ta*Es
۱۰۰			۱۲۷۵۷۴۵۰۰	۱۵	Total

همان طور که در جدول ۹ مشاهده می شود با توجه به درصد مشارکت، بیشترین اثر را در پاسخ (نیروی شکست اتصال)، چقرمگی شکست مود اول چسب با ۲۸/۲۸ درصد و سپس استحکام برشی و چقرمگی شکست مود دوم چسب به ترتیب با ۲۰/۲۸ و ۱۳/۲۴ درصد دارا می باشند و کمترین اثر را ضخامت چسب و اثر تداخلی ضخامت چسب با مدول الاستیک و چقرمگی شکست

²² Signal to Noise Ration(SNR)

²³ Analysis of variance(ANOVA)

²⁴ Percent of contribution

²⁵ Confidence level

مود اول چسب دارند.

۲-۶- جدول پاسخ

نتایج تحلیل تاگوچی علاوه بر جدول تحلیل واریانس شامل جدول پاسخ است. جدول پاسخ شامل مقدار متوسط مشخصه‌های پاسخ برای هر سطح از هر پارامتر است. شاخص‌های دیگری که در این جدول گزارش می‌شوند مقادیر اختلاف و رتبه‌بندی پارامترها است. اختلاف مقدار اثر هر پارامتر را نشان می‌دهد که از اختلاف بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر متوسط مشخصه آن پارامتر به دست می‌آید. رتبه‌بندی پارامترها، آن‌ها را بر اساس مقادیر اختلاف به دست آمده از تأثیرگذارترین تا کم اثرترین مرتب و کمک می‌کند به سرعت متوجه شویم کدام پارامترها بیشترین تأثیر را بر پاسخ دارند. با استفاده از جدول پاسخ همچنین می‌توان بهترین سطح هر پارامتر که ما را به هدف آزمایش نزدیک‌تر می‌کند، انتخاب کرد. نتایج جدول پاسخ در جدول ۱۰ آورده شده است. سطوح ۱ و ۲ در جدول به ترتیب بیانگر سطح پایین و بالای پارامترهای اصلی می‌باشند.

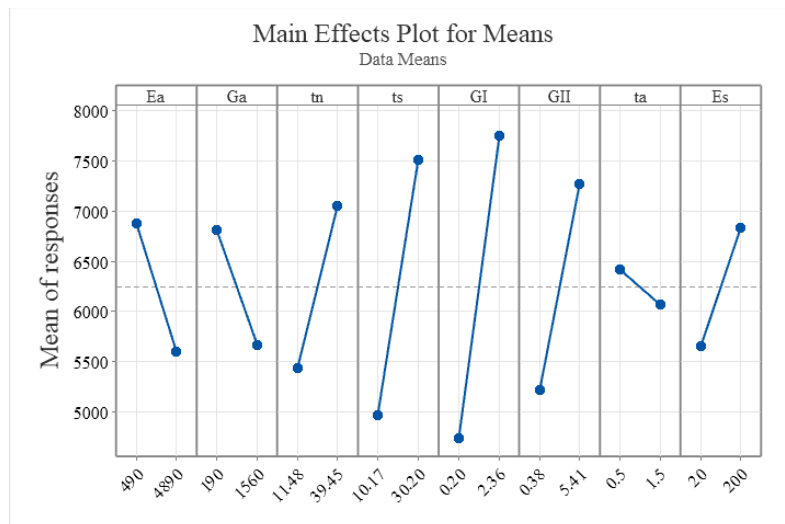
جدول ۱۰ جدول پاسخ برای متوسط اثر پارامترها

Es	ta	GII	GI	ts	tn	Ga	Ea	Level
۵۶۴۹	۶۴۱۶	۵۲۱۲	۴۷۳۸	۴۹۶۸	۵۴۳۴	۶۸۱۱	۶۸۷۸	۱
۶۸۳۰	۶۰۶۴	۷۲۶۷	۷۷۴۱	۷۵۱۱	۷۰۴۶	۵۶۶۹	۵۶۰۲	۲
۱۱۸۱	۳۵۲	۲۰۵۶	۳۰۰۴	۲۵۴۳	۱۶۱۲	۱۱۴۲	۱۲۷۶	دلتا ^{۲۶}
۶	۸	۳	۱	۲	۴	۷	۵	رتک ^{۲۷}

همان‌طور که طبق جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، Rank که بیانگر رتبه‌بندی پارامترهای اصلی می‌باشد، چقرمگی شکست مود اول چسب را با شماره ۱ به‌عنوان اثرگذارترین و ضخامت چسب با شماره ۸ کم اثرترین پارامتر معرفی می‌کند. رتبه‌بندی ذکر شده با درصد مشارکت که در تحلیل واریانس آورده شده بود، همخوانی دارد.

۳-۶- نمودار اثرات اصلی و تداخلی پارامترها

در شکل نمودار اثرات اصلی پارامترها با توجه به سطوح ۱ و ۲ آن‌ها رسم شده‌اند. هر چه شیب نمودار تندتر باشد اثر آن پارامتر بیش‌تر است و شیب منفی و مثبت به ترتیب اثر کاهشی و افزایشی آن پارامتر را بر روی پاسخ نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ نمودار اثرات اصلی پارامترها

با توجه به شکل از میان خواص چسب به ترتیب چقرمگی شکست مود اول، استحکام برشی، چقرمگی شکست مود دوم و

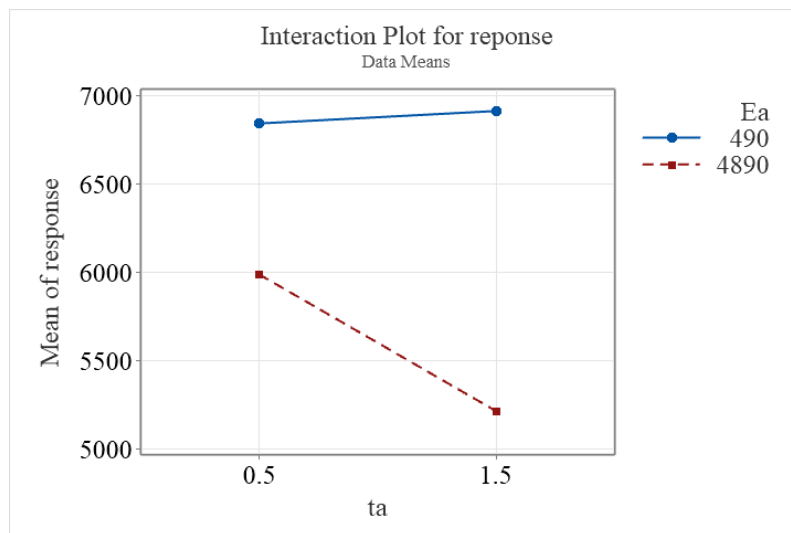
²⁶ Delta

²⁷ Rank

استحکام کششی دارای بیشترین شیب و تأثیر می‌باشند و مثبت بودن شیب آن‌ها، نشان می‌دهد سطح دوم این پارامترهای ذکر شده منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شوند. با توجه به شکل ضخامت چسب کم اثرترین پارامتر بر استحکام اتصال می‌باشد و نشان می‌دهد که افزایش ضخامت منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود. همچنین افزایش مدول برشی و الاستیک چسب باعث کاهش استحکام اتصال می‌شوند. با توجه به نمودارها، مقدار بهینه پاسخ زمانی به دست می‌آید که مدول الاستیک، برشی و ضخامت چسب در سطح پایینی خود و استحکام برشی، کششی، چقرمگی شکست مود اول و دوم و مدول الاستیک زیرآیند در سطح دوم خود باشند. با توجه به سطوح بهینه و اعمال آن‌ها در شبیه‌سازی المان محدود مقدار بیشینه نیروی استحکام مطابق جدول ۱۰ می‌باشد. در جدول ۱۱ بیشینه نیروی استحکام ناشی از ۱۶ آزمایش پیشنهادی تاگوچی جهت مقایسه آورده شده است. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۷ اثرات تداخلی بین ضخامت چسب با پارامترهای دیگر نشان داده شده است.

جدول ۱۱ نیروی استحکام بیشینه ناشی از سطوح بهینه پارامترها

آزمایش	E_a	G_a	t_n	t_s	G_{IC}	G_{IIC}	t_a	E_s	پاسخ (نیرو)
۴	۴۹۰	۱۹۰	۳۹/۴۵	۳۰/۲	۲/۳۶	۵/۴۱	۱/۵	۲۰۰	۱۲۶۵۵
بهینه	۴۹۰	۱۹۰	۳۹/۴۵	۳۰/۲	۲/۳۶	۵/۴۱	۰/۵	۲۰۰	۱۷۵۰۰



شکل ۱۱ اثر تداخلی بین مدول الاستیک چسب و ضخامت چسب

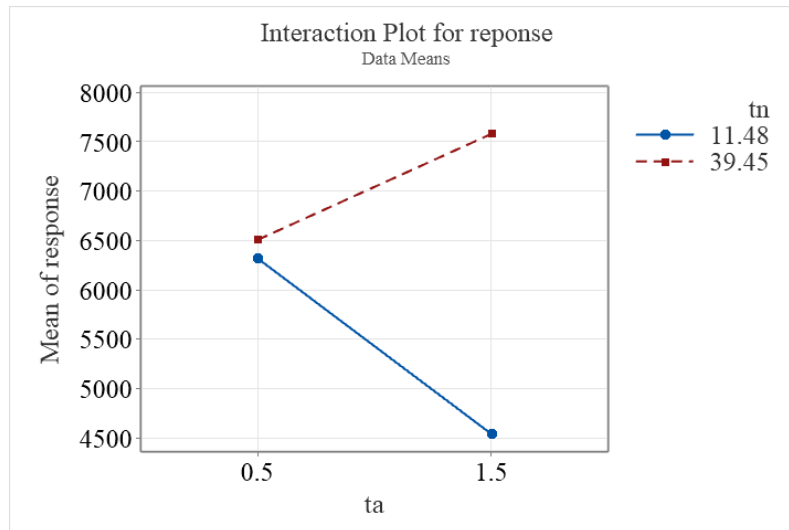


شکل ۱۲ اثر تداخلی بین مدول برشی چسب و ضخامت چسب

طبق شکل مشاهده می‌شود که تا حدودی بین مدول الاستیک و ضخامت چسب اثر تداخلی وجود دارد. با افزایش ضخامت

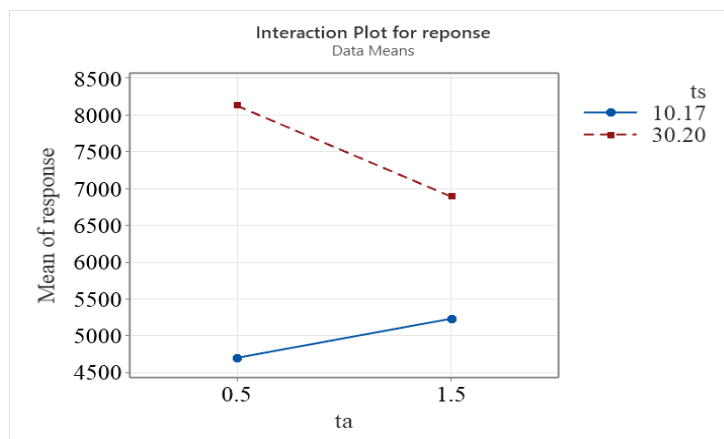
چسب در صورتی که مدول الاستیک در سطح پایینی خود، در واقع چسب نرم باشد تغییر محسوسی در پاسخ مشاهده نمی‌شود ولی زمانی که مدول الاستیک در سطح بالایی خود، در واقع چسب ترد باشد منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود.

طبق شکل مشاهده می‌شود که دو خط رسم شده با هم زاویه ایجاد کرده‌اند که بیانگر اثر تداخلی بین مدول برشی و ضخامت چسب می‌باشد. همچنین با افزایش ضخامت زمانی که مدول برشی کم باشد منجر به کاهش استحکام اتصال و زمانی که مدول برشی زیاد باشد منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شود. البته مدول برشی کم‌تر منجر به استحکام اتصال بیش‌تری می‌شود.



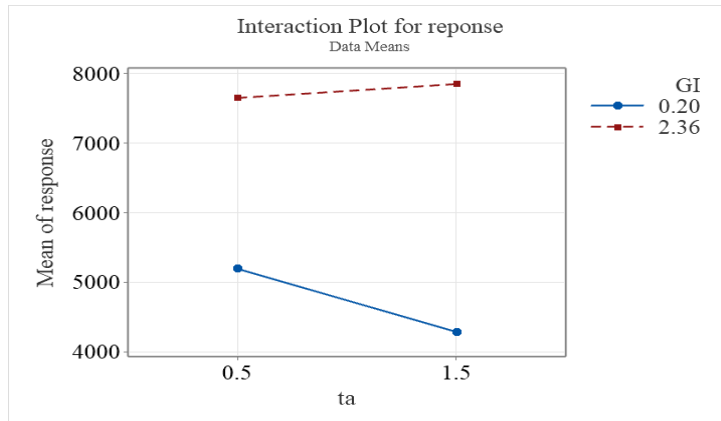
شکل ۸ اثر تداخلی بین استحکام کششی چسب و ضخامت چسب

طبق شکل ۸ مشاهده می‌شود که بین استحکام کششی و ضخامت چسب اثر تداخلی وجود دارد. زمانی که استحکام کششی در مقدار کم خود باشد، افزایش ضخامت منجر به کاهش استحکام اتصال و زمانی که استحکام کششی در مقدار زیاد خود باشد، افزایش ضخامت منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شود. دلیل آن این می‌تواند باشد که زمانی که ضخامت افزایش پیدا می‌کند میزان گشتاور خمشی ناشی از کشش زیرآیند بر روی چسب بیشتر و منجر به ایجاد تنش عمودی در چسب می‌شود که هر چه استحکام کششی چسب بیش‌تر باشد، استحکام اتصال بهتر می‌شود.



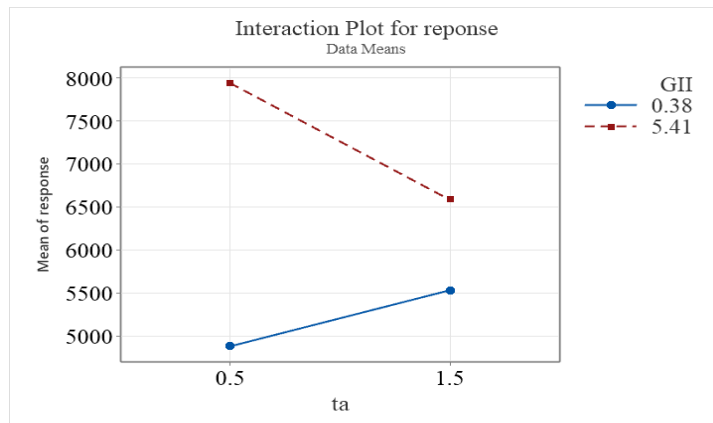
شکل ۹ اثر تداخلی بین استحکام برشی چسب و ضخامت چسب

طبق شکل ۹ با توجه به تقاطع بودن دو خط رسم شده، بین استحکام برشی و ضخامت چسب اثر تداخلی وجود دارد. به طوری که وقتی استحکام برشی دارای مقدار کم خود می‌باشد، افزایش ضخامت منجر به افزایش استحکام اتصال و وقتی که استحکام برشی دارای مقدار زیاد خود می‌باشد، افزایش ضخامت منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود. البته استحکام برشی بالاتر منجر به استحکام اتصال بیش‌تر می‌شود.



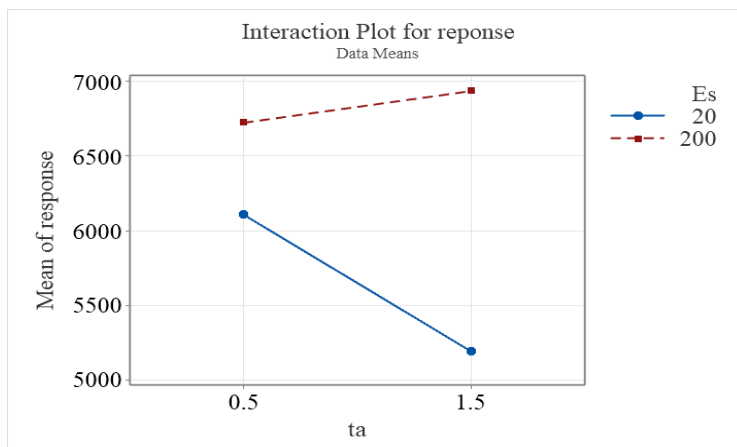
شکل ۱۵ اثر تداخلی بین چقرمگی شکست مود اول چسب و ضخامت چسب

طبق شکل با توجه به زاویه تقاطع خطوط، اثر تداخلی بین چقرمگی شکست مود اول و ضخامت چسب نسبت به مابقی اثرات تداخلی کم‌تر می‌باشد به طوری که وقتی چقرمگی شکست دارای مقدار زیاد خود می‌باشد افزایش ضخامت چسب تغییر چندانی در استحکام اتصال ایجاد نمی‌کند ولی وقتی که چقرمگی شکست دارای مقدار کم خود می‌باشد، افزایش ضخامت منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود.



شکل ۱۶ اثر تداخلی بین چقرمگی شکست مود دوم چسب و ضخامت چسب

طبق شکل ۱۶ با توجه به زاویه تقاطع خطوط، اثر تداخلی بین چقرمگی شکست مود دوم و ضخامت چسب قابل توجه می‌باشد. به طوری که وقتی چقرمگی شکست در مقدار کم خود می‌باشد، افزایش ضخامت منجر به افزایش استحکام اتصال و وقتی که چقرمگی شکست در مقدار زیاد خود می‌باشد، افزایش ضخامت منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود.



شکل ۱۷ اثر تداخلی بین مدول الاستیک زیرآیند و ضخامت چسب

طبق شکل ۱۷ بین مدول الاستیک زیرآیند و ضخامت چسب اثر تداخلی کمی وجود دارد و رفتار آن شبیه به اثر تداخلی

بین مدول الاستیک چسب و ضخامت می‌باشد. وقتی که مدول الاستیک زیرآیند در مقدار زیاد خود می‌باشد، افزایش ضخامت منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شود ولی این افزایش چشم‌گیر نمی‌باشد در صورتی مدول الاستیک زیرآیند در مقدار کم خود می‌باشد، افزایش ضخامت منجر به کاهش چشم‌گیر استحکام اتصال می‌شود. دلیل آن این می‌تواند باشد زمانی که مدول الاستیک زیرآیند مقدار کم‌تری دارد صلبیت خمشی اتصال کم‌تر است و تغییر ضخامت چسب اثر بیش‌تری در توزیع تنش چسب دارد و منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود.

۶-۴- تخمین مدل خطی

در نرم‌افزار مینی‌تب در تحلیل تاگوچی با توجه به اثرات پارامترهای اصلی و تداخلات بین پارامترها که در جدول آرایه‌های متعامد تعریف شده‌اند، یک مدل خطی تخمین می‌زند که با جایگذاری مقادیر کدگذاری شده پارامترها که در چه سطوحی هستند مقدار پاسخ خروجی را پیش‌بینی می‌کند. در رابطه ۹ معادله خطی ناشی از جدول ضرایب ارائه شده است. در رابطه مذکور به جای پارامترها، کد مربوط به آن جایگذاری می‌شود. برای سطح پایین عدد (۱-) و برای سطح بالا عدد (۱+) اعمال می‌شود.

$$F = 6239.63 - 638 Ea - 571 Ga + 805.88 tn + 1271.63 ts + 1501.75 GI + 1027.75 GII - 176.13 ta + 590.62 Es - 211.5 Ea \times ta + 354.5 Ga \times ta + 713.38 tn \times ta - 441.88 ts \times ta + 276 GI \times ta - 502 GII \times ta + 282.38 ta \times Es \quad (9)$$

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا اتصال چسبی تک‌لبه که در آن چسب به‌صورت مدل ناحیه چسبنده مدل‌سازی گردید با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و سپس این شبیه‌سازی با نتایج مقاله مرجع صحت‌سنجی گردید. پس از صحت‌گذاری شبیه‌سازی با استفاده از طراحی آزمایش و روش تاگوچی، به‌صورت عددی به بررسی اثر پارامترهای خواص مکانیکی چسب، ضخامت چسب و مدول الاستیک زیرآیند بر روی استحکام اتصال تک‌لبه تحت بارگذاری کششی پرداخته شد. نتایج به این صورت است که با افزایش چقرمگی شکست مود اول، افزایش چقرمگی شکست مود دوم، افزایش استحکام برشی، افزایش استحکام کششی و افزایش مدول الاستیک زیرآیند، میزان استحکام اتصال افزایش می‌یابد. در بین خواص چسب چقرمگی شکست مود اول با درصد مشارکت ۲۸/۲۸ بیش‌ترین اثر را در استحکام اتصال دارد. پس از آن به ترتیب استحکام کششی با ۲۰/۲۸، چقرمگی شکست مود دوم با ۱۳/۲۴ و استحکام برشی با ۸/۱۴ و مدول الاستیک زیرآیند با ۴/۳۷ درصد مشارکت در استحکام اتصال دارند. با افزایش مدول الاستیک چسب، مدول برشی چسب و ضخامت چسب میزان استحکام اتصال کاهش می‌یابد که در این بین ضخامت چسب با ۰/۳۸ درصد مشارکت، کم‌ترین اثر را بر استحکام اتصال دارد. از بین اثرات تداخلی ضخامت چسب با بقیه پارامترها، اثر تداخلی آن با استحکام کششی، چقرمگی شکست مود دوم و استحکام برشی به ترتیب با ۶/۳۸، ۳/۱۶ و ۲/۴۴ درصد مشارکت بیش‌ترین اثرات را دارا می‌باشند و کمترین اثرات آن با مدول الاستیک چسب و مدول الاستیک زیرآیند با درصد مشارکت تقریباً ۱ درصد می‌باشد. در چسب ترد (مدول الاستیک بالا) افزایش ضخامت چسب منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود. در چسب با مدول برشی پایین، افزایش ضخامت منجر به کاهش استحکام و در چسب با مدول برشی بالا منجر به افزایش استحکام اتصال می‌گردد. در چسب با استحکام کششی بالا، افزایش ضخامت چسب منجر به افزایش استحکام و در چسب با استحکام کششی پایین منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود. در چسب با استحکام برشی بالا، افزایش ضخامت چسب منجر به کاهش استحکام و در چسب با استحکام برشی پایین، منجر به افزایش استحکام می‌شود. در چسب با چقرمگی شکست مود اول بالا، افزایش ضخامت چسب تغییر چندانی در استحکام اتصال ایجاد نمی‌کند ولی در چسب با چقرمگی شکست مود اول پایین، منجر به کاهش استحکام اتصال می‌گردد. در چسب با چقرمگی شکست مود دوم بالا، افزایش ضخامت چسب منجر به کاهش استحکام و در چسب با چقرمگی شکست مود دوم پایین منجر به افزایش استحکام اتصال می‌گردد.

Authorship Contribution Statement

**Seyed Mahyar Mir
Mohammad Hossein Ahari**

Biography: Seyed Mahyar Mir Mohammad Hossein Ahari is currently a Ph. D student at Malek Ashtar University of Technology and his main research interests are composite structures.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Project administration, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Prof. Jafar Eskandari Jam

Biography: Jafar Eskandari Jam is Professor of Mechanical engineering at Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. His current research focuses on composite structures, plates and shell analysis and Nano mechanics.

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Writing- Original draft preparation.

**Dr. Mohammad Hossein
Alaei**

Biography: Mohammad Hossein Alaei is currently an Assistant Professor with the Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. His current research focuses on composite structures.

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Writing- Original draft preparation.

Dr. Hossein Momeni

Biography: Hossein Momeni is currently an Associate Professor with the Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.. His current research focuses on Materials, Metallurgy and Welding.

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Writing- Original draft preparation.

Dr. Pooya Pirali

Biography: Pooya Pirali is currently an Assistant Professor with the Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. His field of research is Impact mechanics

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Writing- Original draft preparation.

۸- مراجع

- [1] Dadian A, Rahnama S. Experimental and numerical study of optimum functionally graded Aluminum/GFRP adhesive lap shear joints using Epoxy/CTBN. International Journal of Adhesion & Adhesives. 2021; 107:102854
- [2] Myong-Ho Kim , Hyon-Sik Hong, Yong-Chol Kim. Determination of failure envelope of functionally graded adhesive bonded joints by using mixed mode continuum damage model and response surface method. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2021.
- [3] Breto R, Chiminelli A, Duvivier E, Lizaranzu M, Jiménez M. A. Finite element analysis of functionally graded bond-lines for metal/composite joints. The journal of adhesion. 2014.
- [4] Shahrokhinasab S, Sahraeyan R, Sabet A. Assessment of mixed adhesive in single lap and peel joint with composite substrate. In Persian, Journal of Science and Technology of Composites. 2017;4(2):189-194.
- [5] Stein N, Mardani H, Becker W. An efficient analysis model for functionally graded adhesive single lap joints. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2016;70:117-125.
- [6] Rocha R J B, Campilho R D S G. Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints. The Journal of Adhesion. 2017;94(7):562-582.
- [7] Gleich D M, Van Tooren M J L. & Beukers A. Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. Journal of Adhesion Science and Technology. 2001;15(9):1091-1101.

- [8] Hasegawa K, Crocombe A. D, Coppuck F, Jewel D, Maher S. Characterising bonded joints with a thick and flexible adhesive layer. Part 1: fracture testing and behaviour. *Adhesion & Adhesives*. 2015;63:124-131.
- [9] Hasegawa K, Crocombe A D, Coppuck F, Jewel D, Maher S. Characterising bonded joints with a thick and flexible adhesive layer. Part 2: Modelling and prediction of structural joint responses. *Adhesion & Adhesives*. 2015;63:158-165.
- [10] Saleh MN, Budzik MK, Saeedifar M, Zarouchas D, De Freitas S T. On the influence of the adhesive and the adherend ductility on mode I fracture characterization of thick adhesively-bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2022;115:103123.
- [11] Antunes R P R O, Campilho R D S G, Silvaa F J G, Vieira A L N. Numerical validation of cohesive laws for adhesive layers with varying thickness in bonded structures. *30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. 2021;55:213-220.
- [12] Grant L D R, Adams R D, da Silva L F M. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009;29(4):405–413.
- [13] Da Silva L F M, Carbas R J C, Critchlow G W, Figueiredo M A V. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2009;29:621-632.
- [14] Metehri A, Madani K, Campilho R D S G. Numerical analysis of the geometrical modifications effects on the tensile strength of bonded single-lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2024;134:103814.
- [15] Rangaswamy H, Sogalad I, Basavarajappa S. Experimental analysis and prediction of strength of adhesive-bonded single-lap composite joints: Taguchi and artificial neural network approaches. *SN Appl. Sci*. 2020.
- [16] Mokhtar M. and Shahravi M. Numerical and experimental analysis of dynamical behavior of composite T-joint with step wise graded adhesive zone based on functional behavior model. In Persian. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2017;4(2): 319-326.
- [17] Kariman Moghadam. A, Rahnama S. Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint. In Persian. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2023;9(4):2116-2127.
- [18] ABAQUS® Documentation. 2009, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay.
- [19] Benzeggagh ML. and Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Composites Science and Technology*. 1996; 56(4):439-449.
- [20] Feih S, Shercliff HR. Adhesive and composite failure prediction of Single-Lap joint structures under tensile loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2005;25:47–59.