



بهینه‌سازی عوامل فرایند ساخت ماتریس اپوکسی به روش RSM/CCD

کیمیا قاسمیان^۱، مهدی شعبان^{۲*}

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m.shaban@basu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری دسته‌ای پر کاربرد از کامپوزیت‌ها هستند که خصوصیات زمینه‌ی آن‌ها ویسکوالاستیک است و وابستگی زیادی به دما دارد. یکی از مهمترین مراحل ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، فرایند سفت شدن است که سبب ایجاد شبکه پیوندهای عرضی می‌گردد. این فرایند می‌تواند منجر به افزایش دمای انتقال شیشه‌ای و بهبود خصوصیات مکانیکی گردد. زمینه از جنس اپوکسی، دارای خصوصیات مطلوبی مانند مقاومت حرارتی خوب، استحکام کششی بالا و مقاومت شیمیایی بسیار خوب است؛ اما از طرفی دیگر دارای معایبی است که مهمترین آن‌ها، ترد و شکننده بودن پس از پخت و مقاومت نامناسب در برابر ضربه است. به منظور رفع این مشکل، از پلی اورتان که یک پلیمر الاستیک است به عنوان اصلاح کننده برای بهبود خواص مکانیکی به ویژه سخت شدن اپوکسی استفاده می‌شود. کامپوزیت‌های اپوکسی/پلی‌اورتان، در مقایسه با ماتریس اپوکسی خالص، دارای خواص مکانیکی و عملکرد ترمودینامیکی بهتری هستند. بهینه‌سازی فرایند ساخت، برای کارآمد نمودن و بهبود خصوصیات کامپوزیت‌های با ماتریس اپوکسی با درصد کم اصلاح کننده و خواص مناسب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، به بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای ساخت در رزین‌های اپوکسی مورد استفاده در زمینه ماتریس‌ها پرداخته شده است. طراحی آزمایش و بهینه‌سازی به روش RSM/CCD انجام گرفته است. اثر سه پارامتر دما، زمان و درصد وزنی پلی اورتان بر روی استحکام تسلیم و مدول ینگ کامپوزیت اپوکسی/پلی‌اورتان بررسی شده است و با توجه به این روش بهینه‌ترین حالت برای بیشینه نمودن پاسخ‌ها انتخاب گردید.

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۸ خرداد ۱۴۰۳
پذیرش: ۱۱ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

کامپوزیت اپوکسی/پلی‌اورتان
عوامل فرایند ساخت
روش سطح پاسخ
بهینه‌سازی
طراحی آزمایش

Optimization of epoxy matrix manufacturing process factors by RSM/CCD method

Kimia Ghasemian¹, Mahdi Shaban^{2*}

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

* Corresponding Author's Email: m.shaban@basu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 7 June 2024

Accepted: 1 September 2024

Keywords:

Epoxy/Polyurethane Composite
Manufacturing Process Factors
Response Surface Method
Optimization
Design of Experiment

Abstract

Polymer matrix composites are a widely used category of composites whose properties are viscoelastic and highly dependent on temperature. One of the most important steps in the construction of polymer matrix composites is the curing process, which causes the creation of a network of transverse bonds. This process can increase the glass transition temperature and improve the mechanical properties. Epoxy, as a matrix, has desirable properties such as good thermal resistance, high tensile strength, and very good chemical resistance. However, epoxy has disadvantages, the most important of which are its brittleness after curing and inadequate impact resistance. In order to solve this problem, polyurethane, which is an elastic polymer, is used as a modifier to improve the mechanical properties, especially the hardening of epoxy. Compared to pure epoxy matrix, epoxy/polyurethane composites have better mechanical properties and thermodynamic performance. To achieve the best result for composites with epoxy matrix with low percentage of modifier and suitable natural properties, optimization of the manufacturing process is the essential factor that should be considered. In this article, the multi-objective optimization of manufacturing parameters in epoxy resins used in the manufacturing has been carried out. Experiments and optimization have been done by RSM/CCD method. The effect of three parameters of temperature, time and weight percentage of polyurethane on the yield strength and Young's modulus of epoxy/polyurethane composite has been investigated and according to this method, the most optimal values were selected for the maximizing of responses.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ghasemian K, Shaban M. Optimization of epoxy matrix manufacturing process factors by RSM/CCD method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Dec 21;11(10):11-23. doi: 10.22034/ijme.2024.461364.1968 [In Persian]

۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها را می‌توان به صورت ترکیبی از دو یا چند ماده تعریف کرد که منجر به خصوصیات بهتر و کارتری نسبت به تک تک اجزای آن‌ها می‌شود. کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری دسته‌ای از کامپوزیت‌ها هستند که خصوصیات زمینه‌ی آن‌ها ویسکوالاستیک است و وابستگی زیادی به دما دارد. این نوع کامپوزیت‌ها در زمینه‌های مختلفی مانند صنایع هوافضا، خودروسازی و دریایی کاربرد دارند. علاوه بر این، در صنایع برودتی مانند تانک‌های سوخت فوق سرد، خطوط تحویل سوخت فوق سرد و بخش‌های برودتی توربوپمپ‌ها، به دلیل سادگی در ساخت، قیمت پایین و خصوصیات مکانیکی مطلوب، از این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان استفاده کرد [۱]. یکی از مهمترین مراحل ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، فرایند سفت شدن یا پخت^۱ است که در دمای اتاق یا در دمای بالاتر می‌تواند انجام شود که وابسته به ترکیب رزین و سخت‌کننده^۲ است [۲]. در صورت پخت مناسب، شبکه پیوندهای عرضی به صورت کامل تشکیل می‌گردد که منجر به افزایش دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) و خصوصیات مکانیکی می‌گردد. دمای انتقال شیشه‌ای به عوامل مختلفی وابسته است که از آن جمله می‌توان به فرمول شیمیایی ملکول رزین، عامل پخت، زمان پخت، چگالی پیوندهای عرضی و دما اشاره کرد [۳]. بعلاوه، دما و زمان پس از پخت رزین‌های اپوکسی پخت‌شده^۳ نقش مهمی در افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌ها مانند دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) و مدول یانگ دارند. عموماً دمای انتقال شیشه‌ای با افزایش دمای پس از پخت، افزایش می‌یابد، مشروط به اینکه دمای پس از پخت فراتر از دمای پخت نباشد. عوامل متعددی فرایند پس از پخت را تحت تاثیر قرار می‌دهند که زمان بین شروع و خاتمه فرایند سفت شدن و پروفایل دما نقش به سزایی دارند. لذا می‌توان یک حالت بهینه برای خصوصیات مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بدست آورد [۴]. کومار و همکاران [۵] به بررسی تاثیر اثر پخت رزین بر خصوصیات حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های با رزین اپوکسی و الیاف شیشه پرداختند.

اپوکسی، به عنوان یک ماده ماکرومولکولی که خاصیت گرما سختی دارد، به دلیل خواص مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی و حرارتی برجسته به صورت گسترده در صنعت استفاده می‌شود. این ماده، دارای مقاومت حرارتی خوب، استحکام کششی بالا، چسبندگی بالا، انقباض^۴ کم، عایق الکتریکی عالی و مقاومت شیمیایی بسیار خوب است. این ماده در صنایع نیمه هادی و اتصالات بسیار پر کاربرد است. با این حال، اپوکسی دارای معایبی است که از آن جمله می‌توان به خاصیت ترد و شکننده پس از پخت و مقاومت نامناسب در برابر ضربه اشاره نمود [۶]. این عیب استفاده از رزین‌های اپوکسی را در کالاهایی که به استحکام مکانیکی بالایی نیاز دارند محدود می‌کند. پلی اورتان، یک پلیمر الاستیک است که به عنوان اصلاح کننده برای بهبود خواص مکانیکی به ویژه سخت شدن اپوکسی استفاده می‌شود.

پلی یورتان دارای خصوصیات منحصر به فردی مانند الاستیسیته خوب، استحکام در برابر ضربه و ازدیاد طول بالا و مقاومت در برابر خوردگی عالی است که در بسیاری از صنایع مانند صنایع نساجی، چسب، صنایع چرم، الاستومرهای ترموپلاست و مواد کامپوزیتی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۷، ۸]. کامپوزیت‌های اپوکسی/پلی اورتان، در مقایسه با ماتریس اپوکسی خالص، دارای خواص مکانیکی و عملکرد ترمودینامیکی بهتری هستند. همچنین خواص مکانیکی یک کامپوزیت مانند تنش تسلیم، مدول یانگ، استحکام کششی نهایی، ازدیاد طول در شکست و اثر چقرمگی تحت تاثیر مقدار فاز دوم یا سوم قرار دارند. برای دستیابی به بهترین نتیجه برای کامپوزیت‌های با ماتریس اپوکسی با درصد کم اصلاح کننده و خواص طبیعی مناسب، بهینه‌سازی فرایند ساخت، عامل اساسی است که باید در نظر گرفته شود.

در مقاله حاضر به بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه پارامترهای ساخت در رزین‌های اپوکسی که در ساخت ماتریس‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند پرداخته شده است. به منظور بهینه نمودن فرایندهای ساخت ماتریس اپوکسی، سه عامل یا فاکتور درصد وزنی پلی یورتان، دمای پس از پخت و زمان مدنظر قرار گرفتند. آزمایشات براساس روش طراحی آزمایش، طراحی شدند. سپس به کمک روش سطح پاسخ به بهینه سازی دو تابع هدف ضریب یانگ و تنش تسلیم پرداخته شد. معادلات رفتاری اپوکسی نیز براساس فاکتورهای طراحی، استخراج گردید و تمامی پارامترهای آماری مورد مطالعه قرار گرفت و بهترین پاسخ طراحی استخراج گردید.

¹ Curing

² Hardener

³ Cured

⁴ Shrinkage

۲- مبانی تئوری

در ابتدا به مبانی تئوریک مربوط به طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ پرداخته می‌شود.

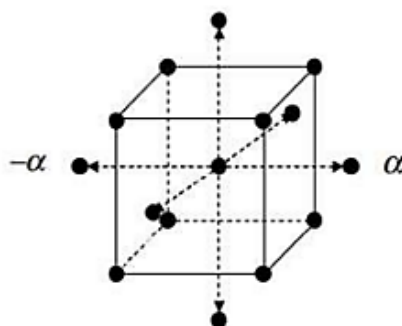
۲-۱- روش طراحی آزمایش

روش طراحی آزمایش یا DOE^۱ یک تکنیک آماری پذیرفته شده در سطح جهانی است که قادر به تعیین همزمان اثرات منفرد و مرتبط بسیاری است که می‌تواند بر نتایج خروجی در هر طراحی تأثیرگذار باشد. در کنار روش طراحی آزمایش، متدولوژی سطح پاسخ یا RSM^۲ روشی است که در دهه ۱۹۵۰ میلادی توسط جورج باکس و همکارانش توسعه داده شده و در دهه‌های اخیر توسط محققان دیگر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۹، ۱۰]. روش سطح پاسخ در اصل، روش ترکیبی از طراحی و تحلیل آزمایش‌ها، تکنیک‌های مدل‌سازی و روش‌های بهینه‌سازی است که با استفاده از داده‌های تجربی، بهبودهای فرایند را به ارمغان می‌آورد. مزایای این روش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- کاهش تعداد آزمایش‌ها
- مشخص کردن حساسیت پاسخ در برابر هر عامل (فاکتور)
- سادگی استفاده و دقت بالا
- قابلیت بررسی متغیرهای پیوسته

این روش نیز مانند سایر روش‌ها، می‌تواند دربرگیرنده خطای احتمالی مدل و تخمین به کار رفته باشد. در میان روش‌های سطح پاسخ، دو روش طراحی باکس بنکن یا BBD^۳ [۱۱] و طراحی مرکب مرکزی یا CCD^۴ [۱۲] یکی از پرکاربردترین روش‌های RSM است. این روش برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایندها استفاده می‌شود. CCD شامل یک مجموعه نقاط بدست آمده از نتایج تجربی است که شامل نقاط مرکزی^۵، نقاط کشفی و نقاط محدودکننده است [۱۳، ۱۴].

نقاط مرکزی برای تخمین مقادیر میانگین استفاده می‌شوند، نقاط کشفی برای تحقیق در حدود مقادیر متغیرهای مستقل و نقاط محدودکننده برای بررسی محدوده‌های ممکن متغیرهای مستقل به کار می‌روند. با استفاده از نتایج CCD، می‌توان مدل‌های ریاضی برای توصیف رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته ایجاد کرده و فرایند را بهینه‌سازی کرد. روش طراحی مرکب مرکزی در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون توسعه یافته است و متداول‌ترین طرح آزمایش در مطالعات تجربی است. به‌طور معمول، این طرح شامل سه نوع نقطه آزمایشی است: نقاط فاکتوریال^۶ یا نقاط عامل، نقاط مرکزی و نقاط محوری^۷ (نقاط ستاره‌دار^۸). شکل ۱، نمایی از طرح CCD دارای سه عامل یا فاکتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمایی از طرح CCD دارای سه عامل یا فاکتور

¹ Design of Experiment
² Response Surface Method
³ Box-Behnken Design
⁴ Central Composite Design
⁵ Center Point
⁶ Factorial Point
⁷ Axial Point
⁸ Star Point

نقاط فاکتوریال در گوشه‌های هندسه مکعب قرار می‌گیرند و برابر مقادیر +1 و -1 هستند. در این حالت، در واقع هیچکدام از فاکتورها در حالت میانه خود نیستند و یا در بیشینه و یا در کمینه ترین حالت خود قرار دارند و مقدار صفر را ندارند. در صورت عدم استفاده از نقاط محوری و مرکزی، این نقاط طرح‌های فاکتوریال را مشخص می‌کنند. نقاط محوری که به نقاط ستاره‌دار نیز معروف هستند، اعدادی کمتر از کمینه مقدار فاکتور ها و بیشتر از بیشینه مقدار فاکتور ها را می‌توانند اختیار کنند که عموماً برابر $-\alpha$ و $+\alpha$ در نظر گرفته می‌شوند. فاصله پارامتر α برابر با فاصله ی نقاط محوری تا نقطه مرکز می‌باشد. نقاط مرکزی به صورت پیش فرض صفر در نظر گرفته می‌شوند ولی در صورت تمایل قابل تغییر می‌باشند و تعداد آن‌ها در نرم افزار های مربوطه قابل تغییر است.

۲-۲- معادله کلی روش RSM

یکی از پرکاربردترین روشهای آماری برای تجزیه و تحلیل داده ها در علوم مختلف، رگرسیون خطی ساده یا چندگانه است. در تحلیل رگرسیون نوع ارتباط بین متغیرها تعیین می‌شود. علاوه، میزان تأثیرگذاری یک متغیر می‌تواند در متغیر دیگر نیز مدنظر قرار می‌گیرد. به عبارت دقیق‌تر بر اساس اطلاع از یک یا چند متغیر مستقل، می‌توان یک معادله رگرسیونی نوشت و از آن برای پیش بینی مقادیر متغیر وابسته استفاده کرد.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \dots + \varepsilon \quad (1)$$

در رابطه فوق، β_0 پاسخ متوسط در یک آزمایش، β_i ضرایب برگشتی تأثیر عوامل اصلی، β_{ij} ضرایب برگشتی مربوط به تعاملات دوگانه میان متغیر های فرایند است. ε نیز مولفه‌ی خطای تصادفی می‌باشد.

۲-۳- تحلیل واریانس یا ANOVA

تحلیل واریانس یا ANOVA^۱، یک دسته از مدل‌های آماری هستند که قادرند اختلاف بین گروه‌ها یا دسته‌ها را براساس واریانس بررسی کنند. این روش توسط رونالد فیشر، بیولوژیست و آمارشناس مشهور، ابداع شده است. اساس این روش، تفکیک واریانس یا پراکندگی داده‌ها به چند جزء بود. امروزه کاربرد تحلیل واریانس که با این ایده انجام شده، بسیار زیاد است. در ساده‌ترین شکل، تحلیل واریانس می‌تواند به عنوان یک روش برای آزمون فرض مقایسه میانگین در بین چند جامعه مستقل به کار رود. این کار به عنوان یک جایگزین برای آزمون فرض با استفاده از آماره آزمون T است. تحلیل واریانس در حالت کلاسیک راه حلی است که سه عمل زیر را همزمان انجام می‌دهد:

۱. تجزیه مجموع مربعات کل به مجموع مربعات اجزای حاصل از مدل خطی

۲. مقایسه میانگین مربعات، به کمک آماره و آزمون F

۳. آزمودن پارامترهای مدل به منظور دستیابی به مدل آماری مناسب

ضریب تعیین، که به ضریب R^2 ^۲ شناخته می‌شود، یک پارامتر آماری است که میزان تغییرات متغیر وابسته را براساس متغیر(های) مستقل در یک مدل رگرسیونی، معین می‌کند. مقدار ضریب تعیین R^2 بین ۰ و ۱ قرار دارد. مقدار صفر این ضریب به معنای این است که متغیر(های) مستقل توانایی در توضیح تغییرات متغیر وابسته ندارند. اگر مقدار آن یک باشد، به معنای یک تطابق کامل است، به این معنا که متغیر(های) مستقل تمامی تغییرات متغیر وابسته را به طور کامل توضیح می‌دهند. ضریب تعیین تعدیل شده یا R^2_{adj} حالت اصلاح شده ضریب تعیین است و همواره با افزایش عامل‌ها (فاکتورها) به مدل، افزایش نمی‌یابد. بالعکس، اگر عامل‌های غیر ضروری به مدل افزوده شود، این ضریب کاهش می‌یابد. محاسبه ضریب تعیین^۳ و ضریب تعدیل شده^۴ صورت زیر می‌باشد:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (2)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (3)$$

¹ Analysis of Variance

² R-Square

³ R^2

⁴ R^2 Adjusted

در معادلات فوق، p تعداد عامل های مدل و n تعداد آزمایش ها می باشد. از لحاظ آماری مدلی مناسب است که دارای بیشترین مقدار ضریب برازش باشد. البته باید توجه داشت که این شرط لازم است ولی به تنهایی جهت تشخیص دقت مدل کافی نیست. از نظر آماری معنی دار بودن مدل ها با مقادیر F ، P بررسی می شود که از طریق معادلات زیر محاسبه می گردند:

$$F = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (4)$$

که در آن:

$$MS_R = \frac{SS_R}{P - 1} \quad (5)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{n - p} \quad (6)$$

در معادلات فوق، SS_R مجموع مربعات رگرسیون و SS_E مجموع مربعات خطا می باشد که به ترتیب از طریق معادلات زیر محاسبه می گردند:

$$SS_R = \sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

$$SS_E = \sum (Y - \hat{Y})^2 \quad (8)$$

که در آن، Y مقدار پاسخ، \bar{Y} میانگین پاسخ ها و \hat{Y} مقدار پاسخ حاصل از مدل رگرسیونی می باشد. بنابراین هرچه مقدار F به یک نزدیک تر باشد، نماینگر این است که خطای طراحی آزمایش کمتر می باشد. مقدار ارزش P در واقع معنادار بودن مدل و همچنین اثر بخشی عامل ها را در مدل بیان می کند. مقدار P زمانی بیان کننده دقت مناسب است که مقدار آن از 0.05 کمتر باشد [۱۵].

۳- طراحی تصادفی آزمایش ها به روش RSM/CCD برای ساخت اپوکسی

سه عامل مستقل در طرح های مورد نظر مورد بررسی قرار گرفتند. عامل A درصد وزنی پلی یورتان، عامل B دمای پس از پخت و عامل C زمان پس از پخت را نشان می دهند. پاسخ های اندازه گیری شده یا Y همان توابع هدف هستند که شامل استحکام تسلیم و مدول یانگ کامپوزیت اپوکسی/پلی-یورتان می باشد به دلیل وابستگی کارایی فرایند به عوامل A ، B و C ، از روش RSM برای تعیین روابط بین متغیرهای A ، B و C و مدول یانگ و استحکام تسلیم اپوکسی استفاده گردید. با توجه به اطلاعات مندرج در مقاله مرجع [۱۳]، نرم افزار Design-Expert نسخه 10 برای بهینه سازی این عوامل بر روی استحکام تسلیم و مدول یانگ مخلوط اپوکسی/پلی یورتان استفاده شد. واکنش پخت در دماهای ایزوترمال (دما ثابت) مختلف (8-120 درجه سانتی گراد) در زمان های مختلف (2-4 ساعت) طراحی شده است. متغیرهای طراحی، محدوده متغیرها، واحدها و نمادهای طراحی به منظور بهینه سازی ساخت اپوکسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ متغیرهای طراحی، محدوده متغیرها، واحدها و نمادهای طراحی به منظور بهینه سازی ساخت اپوکسی

متغیرها	واحد	نماد	حد پایین	حد بالا	$+\alpha$	$-\alpha$
پلی اورتان	Wt%	A	4.05	15.946	0	20
دمای پس از پخت	c	B	88.1	111.892	80	120
زمان پس از پخت	hr	C	2.4	3.5946	2	4

با انتخاب روش RSM، تعداد آزمون های مورد نیاز در نرم افزار برای روش CCD، ۲۰ عدد تعیین گردید. با توجه به آزمایش های انجام شده طبق جدول تصادفی فوق، مقادیر به دست آمده برای پاسخ های مورد نظر (استحکام تسلیم و مدول یانگ) در جدول ۲ آورده شده است [۱۶].

ابتدا برای آن که بررسی شود کدام مدل و با چه درجه ای برای طراحی مورد نظر مناسب است، اطلاعات مربوط به ضریب تعیین، بررسی می گردد. نتایج مربوط به ضرایب تعیین در جدول ۳ آورده شده است.

¹ P-value

جدول ۲ طراحی آزمایش انجام گرفته به منظور بهینه سازی ساخت اپوکسی

شماره نمونه	فاکتور اول: A (pu_%wt)	فاکتور دوم: B (temp_C)	فاکتور سوم: C (time_hr)	پاسخ اول: تنش تسلیم (Mpa)	پاسخ دوم: مدول یانگ (Gpa)
1	15.95	111.89	2.41	16.96	1.30
2	20.00	100.00	3.00	13.60	1.90
3	10.00	100.00	3.00	19.64	1.90
4	10.00	100.00	3.00	19.87	2.00
5	10.00	100.00	3.00	22.78	2.00
6	15.95	88.11	3.59	15.03	2.10
7	15.95	111.89	3.59	13.06	1.50
8	0.00	100.00	3.00	18.00	2.00
9	4.05	111.89	3.59	14.80	1.80
10	10.00	100.00	4.00	15.50	1.50
11	10.00	120.00	3.00	14.09	1.50
12	10.00	100.00	3.00	19.87	2.00
13	4.05	111.89	2.41	18.70	2.30
14	10.00	100.00	2.00	20.00	1.80
15	10.00	100.00	3.00	19.60	1.90
16	4.05	88.11	3.59	23.11	1.30
17	10.00	80.00	3.00	20.00	1.50
18	15.95	88.11	2.41	15.85	1.70
19	10.00	100.00	3.00	20.53	2.00
20	4.05	88.11	2.41	23.23	1.90

جدول ۳ نتایج تحلیل فاکتورهای ساخت اپوکسی با تابع هدف استحکام تسلیم

نوع مدل	مقدار احتمال p-value	عدم برازش p-value	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین پیش‌بینی شده
خطی	0.002688842	0.05444573	0.49799713	0.35523924
تعامل دو فاکتوری	0.1970971	0.065425545	0.563368765	0.43870992
سه‌می	0.002261697	0.538356992	0.859226255	0.67581964
مکعبی	0.687985763	0.227081675	0.830908549	-2.29077587

همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌شود برای مدل درجه دوم ضریب تعیین و ضریب تعیین برازش شده که همان R^2 و R^2_{adj} اند، دارای بیشترین مقدار بوده و برای این طراحی مناسب ترین گزینه‌ها در بین سایر گزینه‌ها می‌باشند. در نتیجه برای این طراحی مدل درجه دوم انتخاب شده و بررسی‌های لازم انجام می‌شود. لازم به ذکر است مقادیر فوق‌الذکر هرچه به عدد ۱ نزدیک تر باشند، مدل قابل اطمینان تر است و از خطای کمتری برخوردار می‌باشد. برای مدول یانگ نیز پس از تحلیل، مشابه استحکام تسلیم، مدل درجه دوم انتخاب می‌گردد.

۴- تحلیل ANOVA

با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) برای استحکام تسلیم، F-value مدل برابر با ۱۳,۸۹ می‌باشد که این مقدار نشان می‌دهد مدل معنادار است. به عبارت دیگر، فقط یک احتمال ۰,۰۲ درصدی وجود دارد که F-value به این اندازه بزرگ به دلیل نویز رخ دهد. مقادیری که مقدار $prob > F$ یا همان P-value آنها کمتر از ۰,۰۵ باشد، نشان می‌دهند که عبارات مدل معنادار هستند. در این حالت، عبارات A، B، C، AB، A²، B² و C² دارای مقدار p کمتر از ۰,۰۵ اند. معادله پیش‌بینی کننده پاسخ برای استحکام تسلیم به صورت زیر می‌باشد:

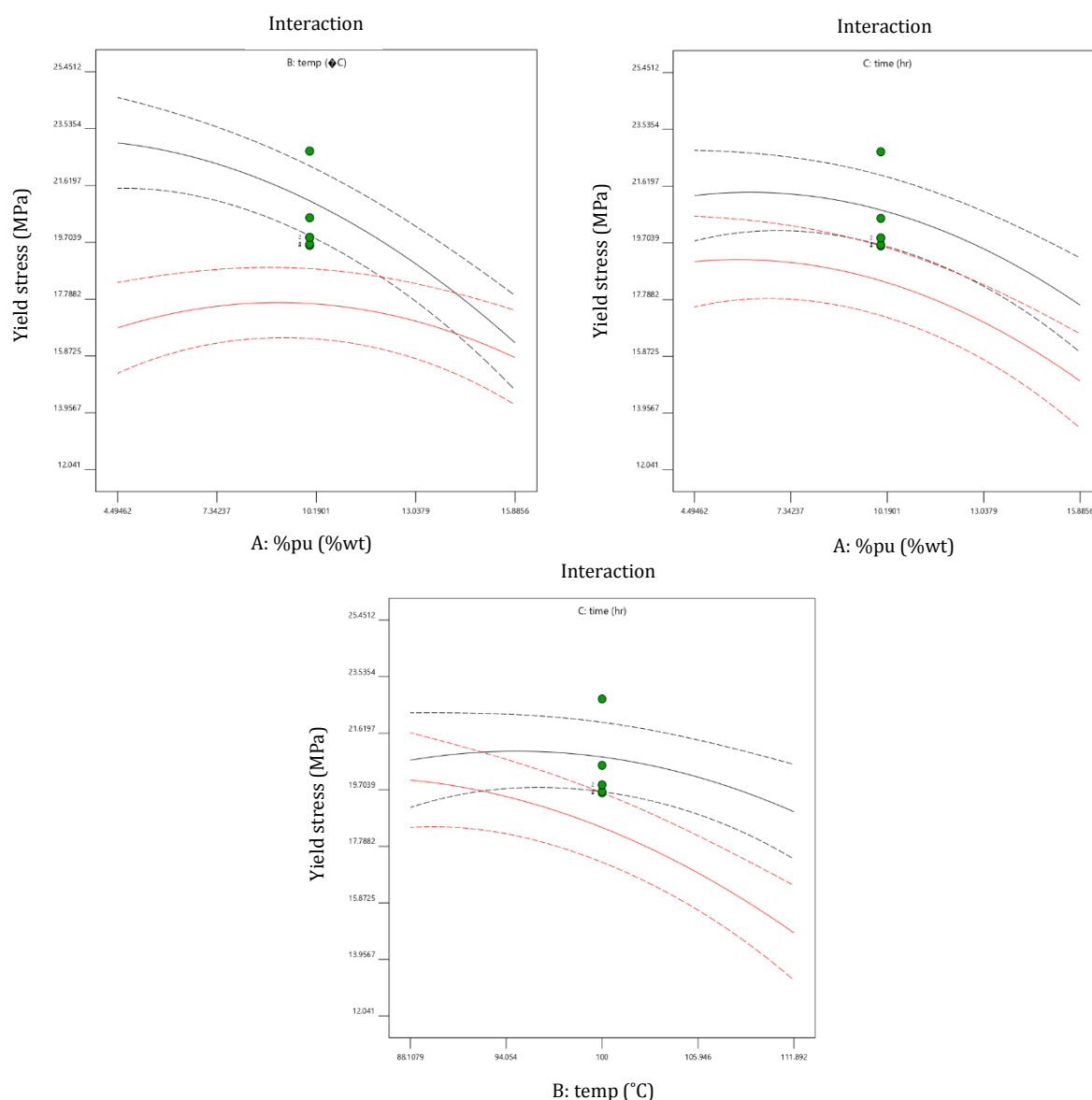
$$Yield Stress = -63.7992 - 1.5638A + 1.39403B + 22.78682C + 0.021178AB - 0.024749AC - 0.12127BC - 0.040201A^2 + 0.006937B^2 - 2.07012C^2 \quad (9)$$

تحلیل‌های مورد نظر برای مدول یانگ نیز، F-value مدل را برابر با ۳۲,۶۴ نشان می‌دهد که مدل معنادار است. فقط یک احتمال ۰,۰۱ درصدی وجود دارد که F-value به این اندازه بزرگ به دلیل نویز رخ دهد. در این حالت، عبارات A، C، AC، AB، B² و C² که مقدار p آنها کمتر از ۰,۰۵ اند، معنادار هستند. معادله پیش‌بینی کننده پاسخ برای مدول یانگ به صورت زیر می‌باشد:

$$Young\ modulus = -12.99345 + 0.14180A + 0.2559B + 1.15981C - 0.003358AB - 0.060104AC - 0.00176BC - 0.000153A^2 - 0.00108B^2 - 0.28463C^2 \quad (10)$$

۴-۱- بررسی ترسیمه های تعاملی پارامتر های فرایند در استحکام تسلیم

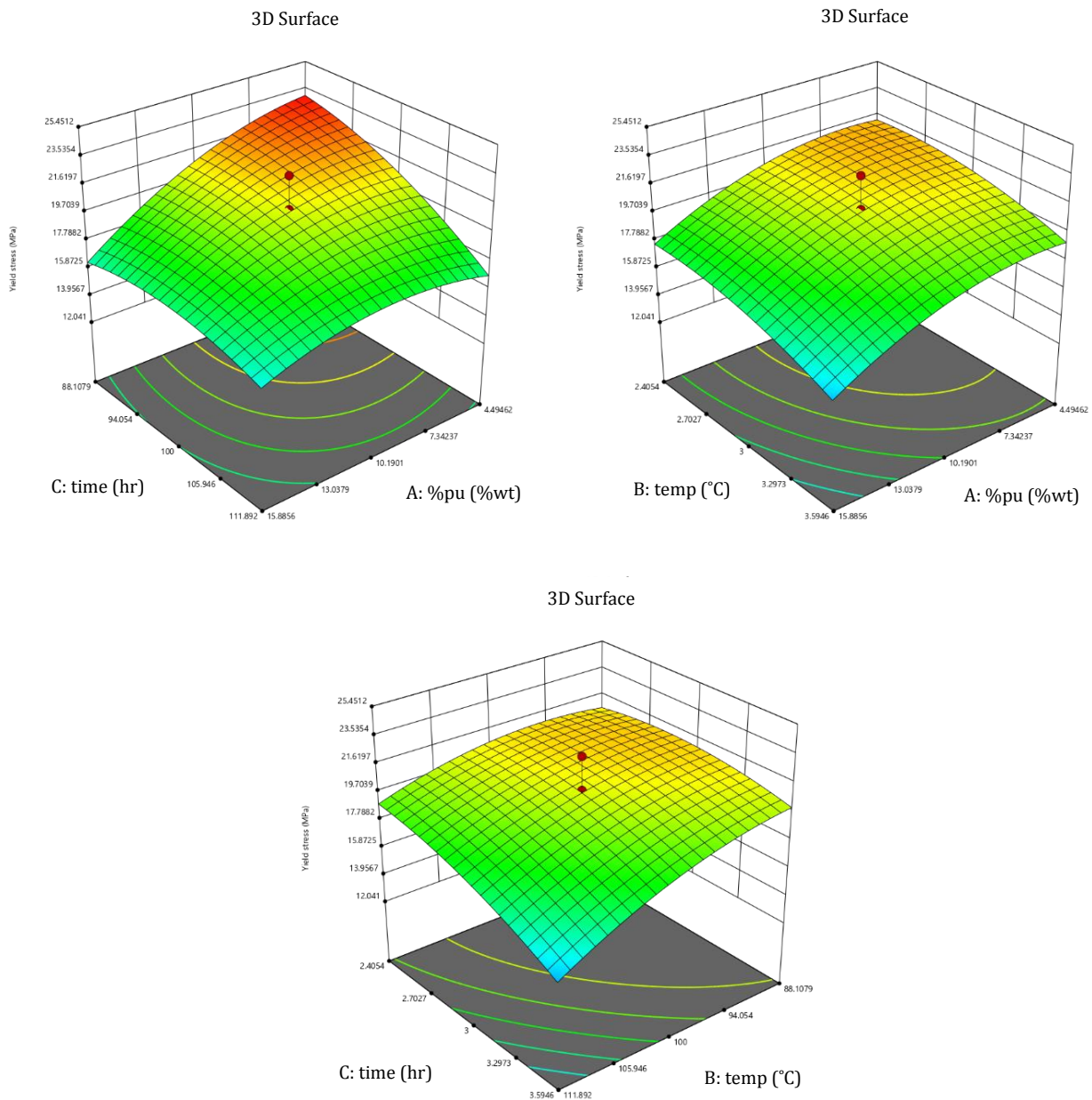
شکل ۲ بررسی تاثیر های تعاملی میان فاکتورهای ساخت در تنش تسلیم و ضریب یانگ را نشان می دهد. با توجه به تاثیر تعاملی میان پارامتر های A, B, در سطح بالای پارامتر B مشاهده می شود که به ازای مقدار میانه پارامتر A، بیشترین استحکام تسلیم بدست می آید. لازم به ذکر است که شیب ترسیمه برای سطح بالا پارامتر B نسبتا کم می باشد. در سطح پایین B مشاهده می شود که به ازای مقادیر کمتر A، استحکام تسلیم بیشینه می باشد. همچنین بیشترین مقدار در این ترسیمه برای حالتی است که دو پارامتر در سطح پایین خود قرار گرفته اند. لازم به ذکر است که خطوط غیر موازی نمایانگر وجود تداخل میان این دو پارامتر مذکور می باشد و با توجه به وجود نقطه ی تلاقی در این ترسیمه، تداخل مخالف وجود دارد. در بررسی تعامل میان دو پارامتر A, C، برای دو سطح بالا و پایین A, C، خطوط موازی بوده که نمایانگر عدم وجود تداخل میان دو پارامتر A, C می باشد و بیشینه ترین مقدار برای حالتی مشاهده شد که A, C، در سطح پایین خود قرار گرفته است. در تعامل میان B, C، در سطح بالای C مقدار بیشینه تنش تسلیم متعلق به سطح پایین B می باشد و در حالت کلی بیشترین مقدار متعلق به سطح پایین C و مقدار میانه B می باشد.



شکل ۲ بررسی تاثیر های تعاملی میان فاکتورهای ساخت در تنش تسلیم

۴-۲- بررسی ترسیمه های رویه ای موثر بر استحکام تسلیم

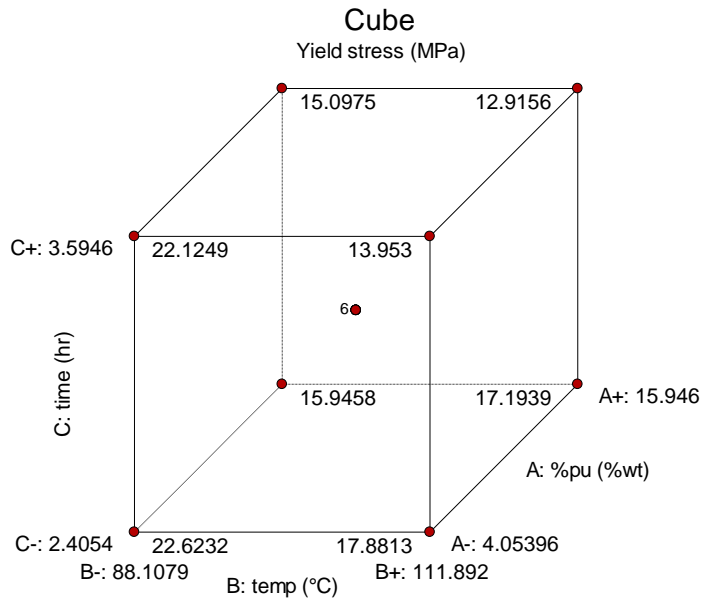
در شکل ۳، ترسیمه های رویه ای (سه بعدی) موثر بر استحکام تسلیم نشان داده شده است.



شکل ۳ ترسیمه های رویه ای موثر بر استحکام تسلیم

همانطور که مشاهده می گردد مقدار بیشینه استحکام تسلیم با رنگ قرمز مشخص گردیده است که این مقدار به ازای سطح پایین A و سطح پایین B و همچنین A و C در سطح پایین خود قرار گرفته اند. علاوه بر این مشاهده می گردد که تغییرات استحکام تسلیم نسبت به تغییرات این دو پارامتر از حساسیت ویژه ای برخوردار نیست و این تغییرات نسبت به حالت های دیگر خیلی کمتر می باشد. بیشترین مقدار متعلق به سطح پایین C و مقدار میانه B می باشد. شکل ۴، ترسیمه ای مکعبی استحکام تسلیم را نشان می دهد. با توجه به ترسیمه ای مکعبی فوق نتیجه گیری می شود که بیشترین استحکام تسلیم برای حالتی است که تمامی پارامترها در سطح پایین خود قرار دارند که نتیجه بدست آمده با مراجع [۸، ۱۶] نیز مطابق است.

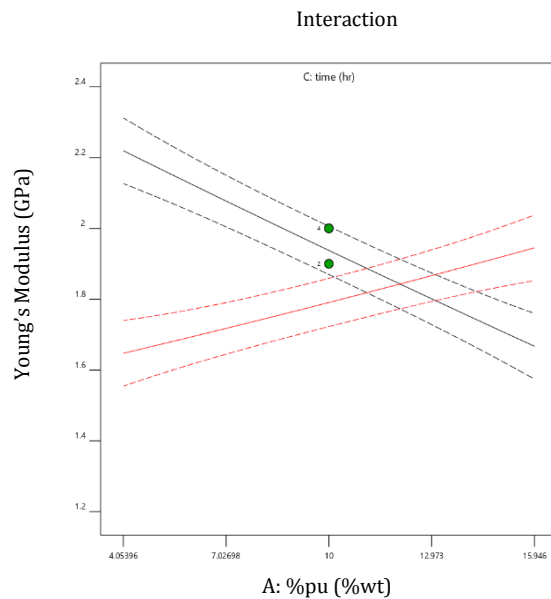
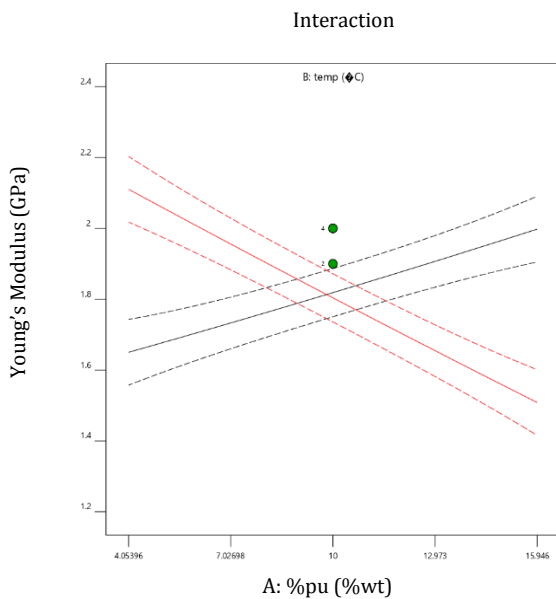
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Yield stress (MPa)
 X1 = B: temp
 X2 = C: time
 X3 = A: %pu

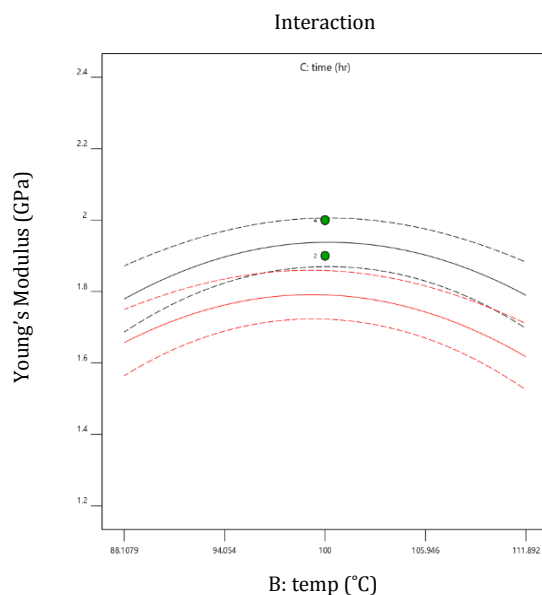


شکل ۴ ترسیمه‌ی مکعبی مربوط به استحکام تسلیم

۳-۴- بررسی ترسیمه‌های تعاملی پارامترهای فرایند در مدول یانگ

شکل ۵ بررسی تاثیرهای تعاملی میان فاکتورهای ساخت در مدول یانگ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تاثیر پارامتر A, B از نوع تاثیر تعاملی تداخلی مخالف بوده و دارای نقطه تلاقی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که بیشترین مقدار مدول یانگ برای حالتی است که پارامتر A در سطح پایین خود قرار دارد و پارامتر B در سطح بالای خود قرار دارد. با توجه به ترسیمه میان A, C مشاهده می‌گردد که تاثیر تداخلی مخالف بین این دو پارامتر موجود است و دارای نقطه‌ی تلاقی می‌باشند. همچنین مشاهده می‌گردد که مقدار بیشینه برای مدول یانگ حالتی است که پارامتر C در سطح پایین خود قرار داشته و پارامتر A نیز در سطح پایین خود می‌باشد. تعامل میان دو پارامتر B, C متفاوت از دو حالت قبلی بوده و خطوط با هم موازی می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تعامل میان این دو پارامتر وجود نداشته و قابل نظر کردن می‌باشد. همچنین بیشینه مقدار مدول یانگ مربوط به سطح میانی B و سطح پایین C می‌باشد.

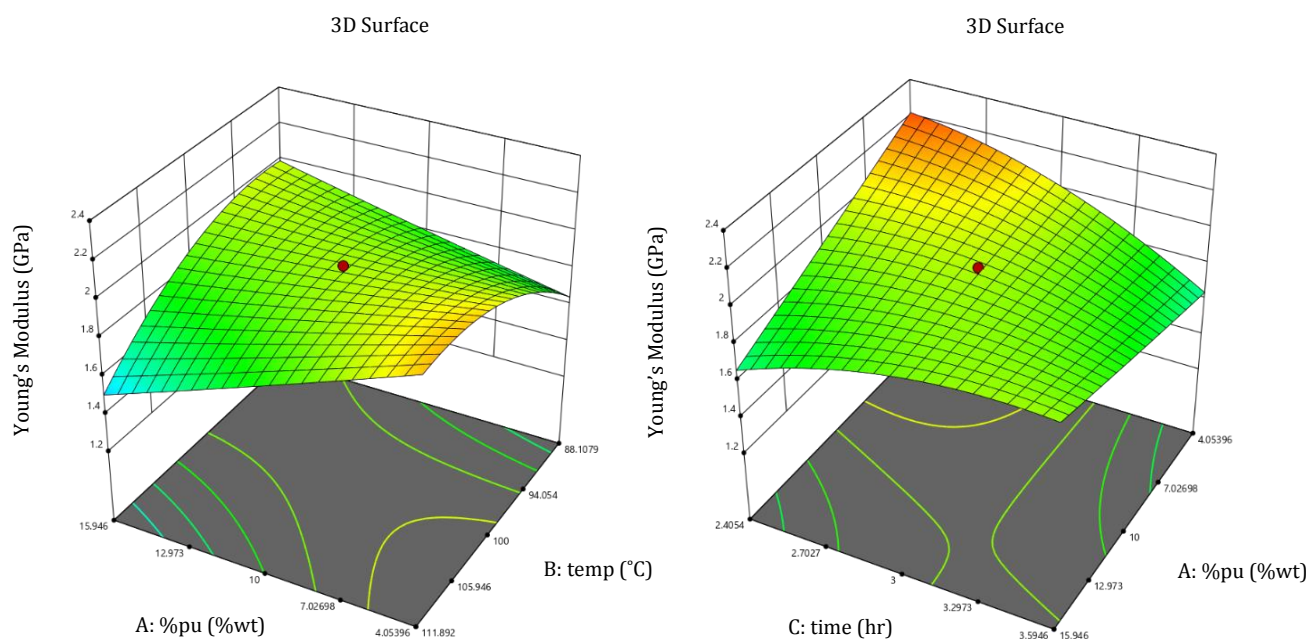


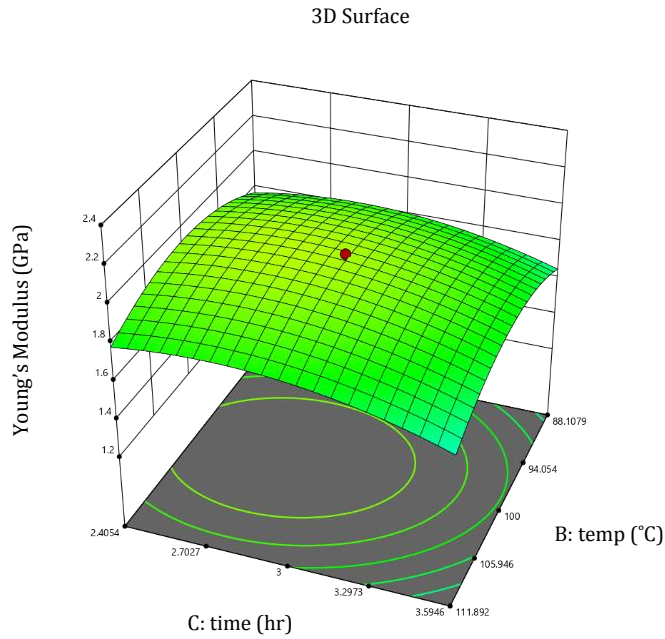


شکل ۵ بررسی تاثیرهای تعاملی میان فاکتورهای ساخت در مدول یانگ

۴-۴- بررسی ترسیمه های رویه ای موثر بر مدول یانگ

در شکل ۶، ترسیمه های رویه ای (سه بعدی) موثر بر مدول یانگ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ نتیجه گیری می شود که بیشینه مدول یانگ مربوط به حالتی است که پارامتر A در سطح پایین و پارامتر B در سطح بالای خود قرار دارد و بیشینه مقدار مدول یانگ مربوط به حالتی است که C در سطح پایین خود قرار گرفته و A در سطح پایین خود می باشد. همانطور که مشاهده می شود در ترسیمه ی رویه ای B, C مدول یانگ به تعامل این دو عامل وابستگی آنچنانی نداشته و بیشینه مقدار آن برای حالتی است که B در مقدار میانه خود قرار گرفته است. لازم به ذکر است که به کمک ترسیمه های رویه ای به صورت سه بعدی تغییرات مربوط به مدول یانگ بهتر و مشهودتر می باشد.

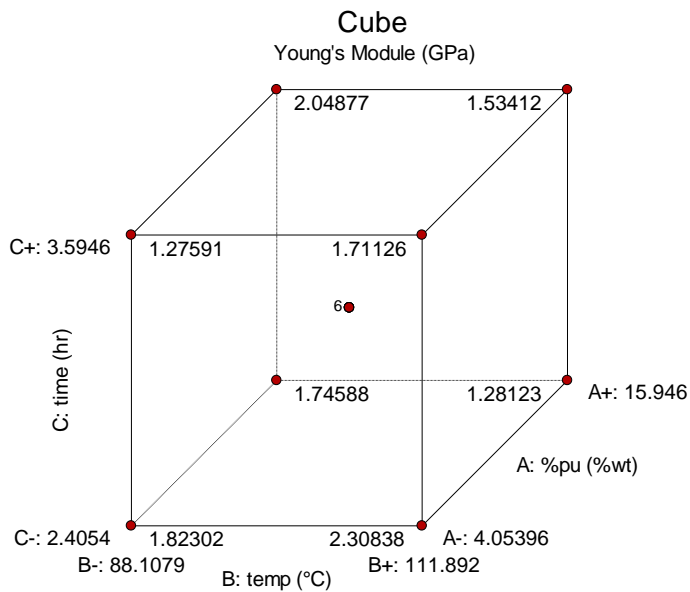




شکل ۶ ترسیمه های رویه ای موثر بر استحکام تسلیم

با توجه ترسیمه ۷، مقادیر مختلف مدول یانگ به ازای سطوح مختلف سه عامل مورد نظر به صورت واضح مشخص است، می‌توان از آن برای تشخیص بهینه‌ترین حالت ممکن در طراحی مورد نظر استفاده می‌کنیم. ترسیمه ی مکعبی برای مدول یانگ به صورت زیر می‌باشد:

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Young's Module (GPa)
 X1 = B: temp
 X2 = C: time
 X3 = A: %pu

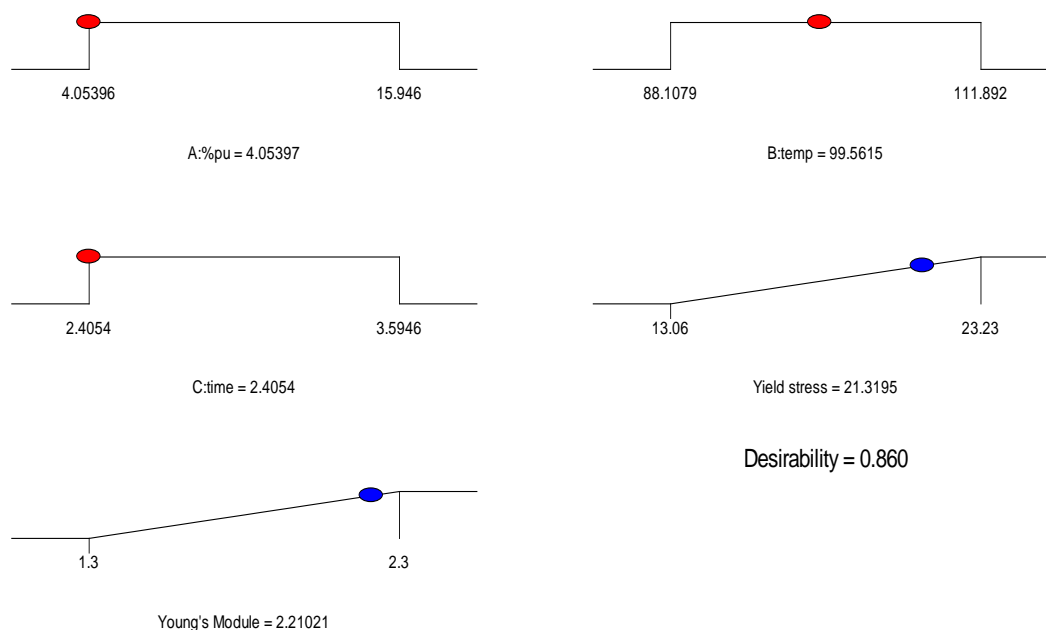


شکل ۷ ترسیمه‌ی مکعبی مربوط به ضریب یانگ

با توجه به ترسیمه‌ی فوق می‌توان نتیجه گرفت که به ازای سطح پایین پارامتر A, C و سطح بالای پارامتر B می‌توان به بهینه‌ترین حالت، یعنی بیشینه مدول یانگ رسید.

۵- بهینه‌سازی پارامترهای ساخت اپوکسی

با توجه به آن که هدف در این مقاله، بهینه‌سازی مقادیر استحکام تسلیم و مدول یانگ می‌باشد، لازم است با کمک نرم افزار Design expert توابع هدف تعیین گردد و مقادیر بیشینه برای بهینه‌سازی آن دو انتخاب شود. همچنین نیاز است که درجه اهمیت آن‌ها بیشترین حد ممکن انتخاب شود. حال با توجه به تعریف مقادیر فوق می‌توان مقادیر بهینه شده بدست آورد. شکل ۸ مقادیر بهینه به همراه شاخص رضایت را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که شاخص رضایت مورد اهمیت بوده و هر پارامتری که بیشترین شاخص رضایت را دارا باشد بهینه‌ترین حالت ممکن می‌باشد.



شکل ۸ مقادیر بهینه مربوط به پارامترهای ساخت اپوکسی به همراه شاخص رضایت

جدول ۴ نتایج تحلیل فاکتورهای ساخت اپوکسی با تابع هدف استحکام تسلیم

شاخص رضایت	مدول یانگ	تنش تسلیم	زمان	دما	%pu
0.860	2.210	21.317	2.405	99.572	4.054

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بهینه‌سازی فرایند ساخت ماتریس اپوکسی/پلی‌اورتان پرداخته شد. اپوکسی به تنهایی، به عنوان یک ماده ماکرومولکولی که خاصیت گرما سختی دارد، علاوه بر مزایای خاص خود، دارای معایبی است که مهمترین آن، ترد و شکننده بودن آن پس از پخت است که با اضافه نمودن پلی‌اورتان که یک پلیمر الاستیک است به عنوان اصلاح کننده خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. دو تابع هدف که عبارت بودند از ضریب الاستیک (یانگ) و استحکام تسلیم به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از روش طراحی آزمایش، آزمایش‌های موردنیاز طراحی شد. در ادامه، با استفاده از روش سطح پاسخ یا RSM، به تحلیل نتایج پرداخته شد. تحلیل واریانس به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف شامل درصد پلی‌اورتان، دما و زمان اعمال گردید و بعلاوه، ترسیمه‌های تعاملی این پارامترها ارائه شد. در نهایت نیز، بهینه‌سازی به منظور بدست آوردن مقادیر بهینه ورودی انجام گرفت و بهینه‌ترین حالت برای بیشینه کردن توابع هدف انتخاب گردید.

References

- [1] Ray BC, Rathore D. Durability and integrity studies of environmentally conditioned interfaces in fibrous polymeric composites: Critical concepts and comments. *Advances in colloid and interface science*. 2014 Jul 1;209:68-83. doi: [10.1016/j.cis.2013.12.014](https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.12.014)
- [2] Aruniit A, Jaan KE, Krumme A, Poltimäe T, Kaspar TA. Preliminary study of the influence of post curing parameters to the particle reinforced composite's mechanical and physical properties. *Materials science*. 2012 Sep 11;18(3):256-61. doi: [10.5755/j01.ms.18.3.2435](https://doi.org/10.5755/j01.ms.18.3.2435)
- [3] Furtos G, Silaghi-Dumitrescu L, Moldovan M, Baldea B, Trusca R, Prejmerean C. Influence of filler/reinforcing agent and post-curing on the flexural properties of woven and unidirectional glass fiber-reinforced composites. *Journal of Materials Science*. 2012 Apr;47:3305-14. doi: [10.1007/s10853-011-6169-1](https://doi.org/10.1007/s10853-011-6169-1)
- [4] Stark W. Investigation of the curing behaviour of carbon fibre epoxy prepreg by Dynamic Mechanical Analysis DMA. *Polymer Testing*. 2013 Apr 1;32(2):231-9. doi: [10.1016/j.polymertesting.2012.11.004](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.11.004)
- [5] Kumar DS, Shukla MJ, Mahato KK, Rathore DK, Prusty RK, Ray BC. Effect of post-curing on thermal and mechanical behavior of GFRP composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015 Feb;75(1):12012. doi: [10.1088/1757-899X/75/1/012012](https://doi.org/10.1088/1757-899X/75/1/012012)
- [6] Hua FJ, Hu CP. Interpenetrating polymer networks of epoxy resin and urethane acrylate resin: 2. Morphology and mechanical property. *European Polymer Journal*. 2000 Jan 1;36(1):27-33. doi: [10.1016/S0014-3057\(99\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(99)00027-0)
- [7] Kuboki T, Jar PY, Forest TW. Influence of interlaminar fracture toughness on impact resistance of glass fibre reinforced polymers. *Composites science and technology*. 2003 May 1;63(7):943-53. doi: [10.1016/S0266-3538\(02\)00316-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00316-0)
- [8] Wang XQ, Huang ZX, Zheng JL, Mei QL. Study on the synthesis and properties of EP/PU composite. *Advanced Materials Research*. 2011 May 31;221:135-9. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.221.135](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.221.135)
- [9] Hill WJ, Hunter WG. A review of response surface methodology: a literature survey. *Technometrics*. 1966 Nov 1;8(4):571-90.
- [10] De Oliveira LG, de Paiva AP, Balestrassi PP, Ferreira JR, da Costa SC, da Silva Campos PH. Response surface methodology for advanced manufacturing technology optimization: theoretical fundamentals, practical guidelines, and survey literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Oct;104:1785-837. doi: [10.1007/s00170-019-03809-9](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03809-9)
- [11] Rezaei S, Askari A. Investigating metal injection molding of AISI-4605 low alloy steel feedstock: parametric optimization of the injection stage using RSM technique. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 May 21;11(3):13-25. doi: [10.22034/ijme.2024.440630.1926](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.440630.1926) [In Persain]
- [12] Sharifzadeh M, Bani Mostafa Arab N, Refahi Oskouei A. Statistical analysis and optimization of friction stir additive manufacturing process variables for aluminum silicon carbide nanocomposite using the response surface method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jan 21;10(11):24-38. doi: [10.22034/ijme.2024.431334.1888](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.431334.1888) [In Persain]
- [13] Myers RH, Montgomery DC, Vining GG, Borror CM, Kowalski SM. Response surface methodology: a retrospective and literature survey. *Journal of quality technology*. 2004 Jan 1;36(1):53-77. doi: [10.1080/00224065.2004.11980252](https://doi.org/10.1080/00224065.2004.11980252)
- [14] Rezaee V, Sadeghi MH, Hashemi SP. Optimization of the Lorentz force in an electromagnetic pump by the surface response method with numerical solution of Maxwell equations in three dimensions and comparison with experimental results. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Nov 22;8(9):14-22. [In Persain]
- [15] Wang G, Zhang S, Li T, Xu X, Zhong Q, Chen Y, Deng O, Li Y. Application of response surface methodology for the optimization of lead removal from contaminated soil using chelants. *RSC advances*. 2015;5(71):58010-8. doi: [10.1039/C5RA06977G](https://doi.org/10.1039/C5RA06977G)
- [16] Sarafrazi M, Hamadani M, Ghasemi AR. Optimize epoxy matrix with RSM/CCD method and influence of multi-wall carbon nanotube on mechanical properties of epoxy/polyurethane. *Mechanics of Materials*. 2019 Nov 1;138:103154. doi: [10.1016/j.mechmat.2019.103154](https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103154)