



## مدل‌سازی ریاضی و تحلیل حساسیت سوبل در بهینه‌سازی پارامترهای سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی

مظاهر سلامت طلب<sup>1\*</sup>، وحید طهماسبی<sup>1</sup>، مهدی صفری<sup>2</sup>، علی زین العابدین بیگی<sup>3</sup>

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* اراک، صندوق پستی 38181-41167، salamattalab@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 11 دی 1400 داوری اولیه: 26 دی 1400 پذیرش: 14 بهمن 1400	در تحقیق حاضر، اثر پارامترهای مختلف عملیات سوراخکاری مانند سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار بر میزان آسیب ایجاد شده در محل سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی به صورت آزمایشگاهی و تحلیل آماری مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی 12 لایه با پارچه بافته شده شیشه با بافت ساده و با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته شده و با انجام عملیات سوراخکاری با استفاده از ماشین فرز کنترل عددی، مورد آزمایش قرار گرفتند. آنگاه متغیر آسیب تعریف شده و با استفاده از میکروسکوپ نوری، نواحی آسیب شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل، به بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای یاد شده در بالا، بر متغیر آسیب تورقی ایجاد شده در ناحیه سوراخکاری پرداخته شده است. نتایج آماری نشان می‌دهند که برای تحلیل متغیر آسیب، می‌بایست اثر همزمان سرعت پیشروی به همراه سرعت دورانی ابزار را در نظر گرفت به طوری که در قطرهای پایین، کاهش سرعت پیشروی به همراه کاهش سرعت دورانی موجب کمینه شدن متغیر آسیب شده و این در حالی است که در قطرهای بالا، افزایش همزمان دو متغیر یاد شده موجب کمینه شدن آسیب تورقی در لایه‌های خروجی چندلایه کامپوزیتی می‌گردد. تحلیل حساسیت سوبل انجام شده نشان می‌دهد که قطر ابزار، سرعت پیشروی و سرعت دورانی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر متغیر آسیب خواهند داشت.
کلیدواژگان: تورق سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی آسیب تحلیل حساسیت سوبل	

## Mathematical Modeling, Sobol Sensitivity Analysis and Optimization of Main Parameters in Drilling of E-glass/epoxy Laminated Composites

Mazaher Salamat-talab<sup>1\*</sup>, Vahid Tahmasbi<sup>1</sup>, Mehdi Safari<sup>1</sup>, Ali Zeinolabedin Beygi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 38181-41167 Arak, Iran, salamattalab@arakut.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 1 January 2022  
First Decision: 16 January 2022  
Accepted: 3 February 2022

### Keywords:

Delamination  
Drilling  
Laminated composites  
Damage  
Sobol sensitivity analysis

### Abstract

In the present study, the effect of different parameters including of tool rotational speed, feed rate and tool diameter on the damage caused by drilling operations near the drilling hole in the E-glass/epoxy composite laminates with twelve layers of plain woven fabric manufactured using hand lay-up method was investigated and the experimental tests conducted on them. Then, using the Sobol statistical sensitivity analysis method, the effect of the above-mentioned parameters on the induced damage near the drilling hole was investigated. The statistical and experimental results show that for analyzing the damage variable, the simultaneous effect of rotational velocity in conjunction with feed rate of the drilling tool should be taken into account in order to minimize the damage variable, so that in the low velocities, the reduction of feed rate along with the reduction of the rotational speed causes the damaged variable to be minimized, while at the same time, in the high diameters, the simultaneous increase of the two mentioned parameters, minimizes delamination induced damage in laminated composites. The Sobel sensitivity analysis shows that the diameter of the tool, the velocity, and the rotational speed will have the greatest effect on damage variable in laminated composites, respectively.

### 1- مقدمه

ساخت قطعات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. معروف‌ترین

انواع کامپوزیت‌های مورد استفاده در صنعت شامل کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن، کامپوزیت

مواد کامپوزیتی به علت خواص مکانیکی و فیزیکی عالی، به تدریج جایگزین بسیاری از فلزات و آلیاژهای فلزی شده‌اند که در

Please cite this article using:

M. Salamat-talab, V. Tahmasbi, M. Safari, A. Zeinolabedin Beygi, Mathematical Modeling, Sobol Sensitivity Analysis and Optimization of Main Parameters in Drilling of E-glass/epoxy Laminated Composites, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 11, pp. 43- 53, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در زمان ورود دریل به کامپوزیت و تورق ناشی از فشار ابزار در زمان خروج دریل از قطعه کار در چندلایه کامپوزیتی شیشه/پوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که سرعت دورانی ابزار اثر مشخصی بر اندازه تورق ندارد در حالیکه اندازه ناحیه تورق با افزایش سرعت پیشروی، افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند که تورق ناشی از خروج مته از قطعه کار شدیدتر از تورق در لایه‌های ورودی می‌باشد. موهان و همکاران [11] آزمایش‌های سوراخکاری روی چندلایه‌های کامپوزیتی گرمانرم تقویت شده با الیاف شیشه را در پارامترهای مختلف سوراخکاری و ماده مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ضخامت قطعه و سرعت دورانی اثر واضح و مشخصی بر تورق در لایه ورودی قطعه داشته در حالیکه ضخامت قطعه و سرعت پیشروی، اثر قابل ملاحظه‌ای بر تورق لایه خروجی دارند. ابرائو و همکاران [12] اثر هندسه مته و پارامترهای ماده را بر نیروی عمودی و میزان آسیب تورق در سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/پوکسی بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که بر خلاف مطالعات صورت گرفته پیشین، رابطه مستقیمی بین نیروی عمودی و تورق وجود ندارد و در محدوده سوراخکاری‌های آزمایش شده، ناحیه تورق به طور قابل توجهی با سرعت پیشروی و نسبتاً با سرعت دورانی افزایش می‌یابد. پالانیکومار [13] پارامترهای سوراخکاری کامپوزیت‌های گرمانرم با الیاف شیشه، نظیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی را با توجه به شاخصه‌هایی نظیر نیروی عمودی، زبری سطح قطعه و تورق بهینه نمودند. سورتینو و همکاران [14] اثر پارامترهای سوراخکاری را در فرآیند سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و کربن بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که نیروی عمودی در چندلایه‌های کامپوزیتی گرمانرم با الیاف شیشه و کربن، با افزایش سرعت‌های دورانی و پیشروی افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند که در سرعت‌های پیشروی کمتر از 0/1 میلیمتر بر دور، شاخص تورق تقریباً مستقل از سرعت دورانی بوده در حالیکه به طور قابل توجهی با افزایش سرعت پیشروی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر برای سرعت‌های پیشروی بالا، شاخص تورق با افزایش هر دوی سرعت‌های دورانی و پیشروی افزایش می‌یابد. تان و همکارانش [15] دریافتند که آسیب تورق به طور قابل توجهی تحت تاثیر سرعت پیشروی و هندسه ابزار نسبت به سرعت دورانی می‌باشد. راگوناس و همکاران [16] اثرات افزودن نانوذرات کلی بر شاخص تورق را در فرآیند سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی گرمانرم با الیاف شیشه، با استفاده از روش سطح پاسخ، بهینه نمودند. بدین

های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و چندلایه‌های کامپوزیت-فلز می‌باشند. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف در صنایع دفاعی، حمل و نقل و نیروگاه‌های تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند [1-3]. خواص ویژه کامپوزیت‌ها، ماشینکاری آن‌ها را در مقایسه با سایر مواد همگن سخت‌تر نموده است [4]. فرآیند سوراخکاری یک عملیات ماشینکاری ثانویه بسیار رایج برای تسهیل مونتاژ کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف می‌باشد. فرآیند سوراخکاری بدون نقص با توجه به اینکه یک عملیات نهایی محسوب شده و معمولاً پس از آن عملیات دیگری روی کامپوزیت‌ها انجام نمی‌شود بسیار مهم می‌باشد [5]. لاجود و همکاران [6] عیوب فرآیند دریل کاری مواد کامپوزیتی را در چهار دسته طبقه بندی نمودند: تورق در لایه ورودی، تورق در لایه‌های خروجی، عیوب هندسی و آسیب‌های حرارتی. تورق یک آسیب بسیار مهم بوده که چندلایه‌های کامپوزیتی در فرآیند سوراخکاری با آن مواجه می‌شوند. در حدود 60 درصد از موارد عدم تایید مونتاژهای مورد استفاده در صنایع هوافضا، مربوط به ایجاد عیب تورق کامپوزیت می‌باشد. در عملیات سوراخکاری، تورق در کامپوزیت معمولاً در هر دوی لایه‌های ورودی و لایه‌های خروجی قطعه کامپوزیتی رخ می‌دهد.

دی الیو و همکاران [7] با بررسی سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف آرامید، نشان دادند که در لایه ورودی سوراخ، رابطه‌ای بین کیفیت سوراخ و شرایط سوراخکاری وجود ندارد در حالیکه در لایه‌های خروجی سوراخ، یک ارتباط مهم بین آسیب و ماکزیمم نیروی عمودی وجود دارد. داویم و ریس [8] با بررسی اثر پارامترهای سوراخکاری بر چندلایه‌های کامپوزیتی گرمانرم تقویت شده با الیاف کربن، دریافتند که تورق با افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند که ابزار کاربیدی عملکرد بهتری در مقایسه با ابزار فولاد تندبر دارد. داویم و همکاران [9] در تحقیقی دیگر به بررسی پارامترهای گفته شده در سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی گرمانرم تقویت شده با الیاف شیشه که به روش لایه‌چینی دستی ساخته شده بوده پرداختند. نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آماری این محققان نشان می‌دهد که سرعت دورانی، بیشترین اثر را بر اندازه ناحیه آسیب داشته است. خشابا و همکاران [10] به بررسی اثر پارامترهایی مانند سرعت پیشروی، سرعت دورانی بر میزان نیرو و گشتاور مورد نیاز به منظور سوراخکاری کامپوزیت‌های با الیاف خرد شده با کسر حجمی مختلف الیاف پرداختند. همچنین این محققان به بررسی اثر پارامترهای سوراخکاری بر تورق ایجاد شده ناشی از کشش

همینطور صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های بالای آزمایشات تجربی، تشخیص دقت و رفع عیوب آن، از روش طراحی آزمایش استفاده می‌نمایند. در این بین، روش سطح پاسخ به دلیل داشتن ویژگی‌هایی چون تبیین دقیق آزمایش، مدل‌سازی ریاضی معادله حاکم بر مسئله، ارائه نمودارهای برهم‌کنش متغیرهای ورودی، بهینه‌سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها، مورد استفاده بسیاری از محققان قرار گرفته است [20]. همچنین روش سطح پاسخ، قادر است رابطه‌ای بین ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله حاکم نموده و آن را به صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم ارائه نماید. فرم کلی معادله با توجه به متغیرها و برهم‌کنش‌های مؤثر به صورت رابطه (1) می‌باشد [21].

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

در رابطه (1)،  $y$  به عنوان پاسخ خروجی برحسب ورودی‌های آزمایش بیان می‌گردد که در این رابطه ثابت‌های  $\beta$  به عنوان ضرایب معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم،  $x_i$  ضرایب اصلی ورودی آزمایش،  $x_i^2$  توان دوم ضرایب ورودی آزمایش و  $x_i x_j$  اثر برهم‌کنش مرتبه دوم ضرایب ورودی آزمایش می‌باشد [22]. مدل ارائه شده در رابطه بالا، در صورت مناسب بودن می‌تواند رفتار خروجی مسئله را برحسب پارامترهای ورودی مسئله در تمام بازه آزمایش‌ها پیش‌بینی نموده و نقاط بهینه را به منظور تفسیر و تحلیل بهتر نتایج ارائه نماید [23].

## 2-1- روش‌های تحلیل حساسیت

به منظور بررسی سیستم‌ها و تعیین میزان اثر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی سیستم‌ها در مسائل مهندسی می‌توان از روش تحلیل حساسیت به عنوان ابزاری سودمند استفاده نمود. تحلیل حساسیت را می‌توان به چند بخش طبق‌بندی نمود که برحسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا برحسب شکل مدل، به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری طبقه‌بندی می‌شود. در روش تحلیل حساسیت ترسیمی، حساسیت را با استفاده از فرم‌هایی به صورت نمودار، جداول و سطوح نمایش می‌دهند. همچنین به منظور نشان دادن تغییرات پاسخ‌های خروجی تحت تأثیر متغیرهای ورودی‌ها از روش گرافیکی استفاده می‌شود. در روش ریاضیاتی، حساسیت را با استفاده از تغییرات پاسخ خروجی برحسب تغییرات متغیرهای ورودی به دست می‌آورند. در این روش، پاسخ خروجی به ازای مقدار اندکی

منظور آن‌ها با استفاده از الگوی طراحی آزمایش باکس-بنکن اثر پارامترهایی نظیر سرعت دورانی، سرعت پیشروی، اندازه مته و نانو ذره یاد شده را بر میزان تورق کامپوزیت مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت پیشروی مهمترین اثر را بر تورق در بین سایر پارامترها دارد. آن‌ها دریافتند که تورق در کامپوزیت با افزودن نانو ذره، تا درصد مشخصی کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفتند که توزیع مناسب نانو ذره می‌تواند درصد تورق را با کاهش بیشتری مواجه کند که دلیل این موضوع نیز چسبندگی بهتر بین لایه‌های کامپوزیت می‌باشد. بهرا و همکاران [17] با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی همزمان تورق و زبری سطح کامپوزیت‌های گرمانرم تقویت شده با الیاف شیشه در فرآیند سوراخکاری پرداختند. پارامترهای مورد بررسی، شامل ضخامت قطعه، قطر مته، سرعت دورانی و سرعت پیشروی بودند. مدل آن‌ها نشان داد که زبری سطح با افزایش سرعت پیشروی و افزایش قطر مته افزایش می‌یابد. همچنین کاهش سرعت پیشروی، تورق را نیز کاهش می‌دهد. علی و همکارانش [18] به مقایسه فرآیندهای سوراخکاری و فرزکاری جهت ایجاد سوراخ در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در سرعت‌های دورانی بالا و سرعت‌های پیشروی پایین، فرآیند فرزکاری مناسب‌تر از فرآیند دریل کاری جهت ایجاد سوراخ می‌باشد.

همان‌گونه که بررسی‌های بالا نشان می‌دهند، باوجود مطالعات انجام شده در زمینه سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه، شامل بررسی اثر پارامترهای فرآیند و ماده بر تورق لایه‌های ورودی و خروجی کامپوزیت، تاکنون طراحی آزمایش و مدل‌سازی آماری مناسب و بهینه‌سازی پارامترها با بهره‌گیری از دقیق‌ترین مدل‌های آماری در این حوزه صورت نگرفته است. بدین منظور، در تحقیق حاضر، با ساخت چندلایه کامپوزیتی شیشه/پوکسی با پارچه بافته شده شیشه با بافت ساده، به بررسی جامع آسیب تورق شامل تحلیل‌های آماری، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند و تعیین مهمترین پارامترهای تأثیر گذار و به ویژه، تحلیل حساسیت پارامترها پرداخته شده است.

## 2- طراحی آزمایش

در تحلیل مسائل مهندسی که پاسخ مسئله تحت تأثیر متغیرهای ورودی است، استفاده از روش آماری به منظور مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی فرآیند، کمک شایانی می‌نماید. در این زمینه یکی از بهترین روش‌های آماری، روش سطح پاسخ می‌باشد [19]. محققان به منظور بهبود و اصلاح آزمایش و

به طور مشخص نمی توان این تحلیل حساسیت را استخراج کرد. به عنوان مثال ممکن است یک فاکتور ورودی در مدل رگرسیون استخراج شده در یک ترم ضریب و علامت مشخص داشته باشد و در یک ترم دیگر یک ضریب و علامت مخالف و در این صورت نمی توان به میزان دقیق تاثیر گذاری پی برد.

### 3- خصوصیات و شرایط آزمایش

#### 3-1- تعیین فاکتورهای ورودی و پاسخ های خروجی

به منظور بررسی تورق در عملیات سوراخکاری کامپوزیت، متغیرهای سرعت دورانی ابزار (v)، نرخ پیشروی (f) و قطر ابزار (d) به عنوان فاکتورهای ورودی فرآیند در نظر گرفته شده است زیرا میزان آسیب ایجاد شده در لایه های بیرونی در چندلایه کامپوزیتی به پارامترهای یاد شده وابستگی دارد. به منظور تعیین میزان آسیب در چندلایه، نسبت قطر ناحیه آسیب به قطر داخلی سوراخ در لایه های خروجی به عنوان پاسخ خروجی فرآیند مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

#### 3-2- ساخت چندلایه کامپوزیتی

چندلایه های کامپوزیتی با پارچه بافته شده شیشه با بافت ساده از جنس شیشه/اپوکسی و با چگالی سطحی 200 گرم بر مترمربع با لایه چینی  $[0]_{12}$  ساخته شده اند. همچنین رزین مورد استفاده برای ساخت چندلایه، LY-5052 با سخت کننده HY-5052 بوده که با نسبت 100 به 38 مخلوط شده اند. علاوه بر این، پخت نمونه ها در دمای محیط به مدت 7 روز صورت گرفته است. سپس چندلایه ساخته شده با استفاده از واترجت با ابعاد 25 میلیمتر عرض و 254 میلیمتر طول، برش کاری شده اند. ضخامت چندلایه ساخته شده 2/5 میلیمتر می باشد.

#### 3-3- سوراخکاری و اندازه گیری متغیر آسیب

مته های ابزار استفاده شده در این فرآیند از سری مته های استاندارد فولاد تند بر انتخاب شده است و به منظور حذف اثر سایش ابزار از مته های نو به قطرهای 2، 4 و 6 میلی متر استفاده شده است. همچنین از یک دستگاه ماشین فرز کنترل عددی (CNC) آزمایشگاهی دقیق جهت انجام فرآیند سوراخ کاری بهره گرفته شده است. تجهیز آزمایشگاهی برای سوراخکاری چندلایه کامپوزیتی در شکل 1 نشان داده شده است. به منظور اندازه گیری قطر ناحیه آسیب، از یک میکروسکوپ نوری (NSIZE-200) استفاده شده است. ابتدا با استفاده از خط کش های کالیبراسیون، دستگاه کالیبره شده است. با این دستگاه

تغییر در ورودی با استفاده از روش های محاسباتی صورت می گیرد. در روش آماری، تحلیل حساسیت به صورت توزیع احتمالی به شبیه سازی متغیرهای ورودی سیستم می پردازد، سپس تاثیر متغیرهای ورودی را بر پاسخ سیستم ارزیابی می کند. در این روش ها همچنین می توان اثر متقابل بین چندین متغیر مختلف ورودی را بر روی پاسخ نهایی سیستم مشخص نمود. تحلیل حساسیت آماری سوبل یکی از روش های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه ی تجزیه واریانس می باشد. از این روش می توان برای توابع و مدل های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده نمود [24].

#### 2-2- روش تحلیل حساسیت سوبل

در روش تحلیل حساسیت سوبل ابتدا برای مدل تعریف شده با تابع  $Y = F(X)$ ، که  $Y$  خروجی مدل و  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  بردار پارامترهای ورودی، واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس های هر ترم تجزیه شده به صورت رابطه زیر ارائه می گردد.

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq m} V_{ij} + \dots + V_{1, \dots, n} \quad (2)$$

که در رابطه (2)،  $(V_i = V[E(Y|x_i)])$  تاثیر مرتبه ی اول برای هر پارامتر ورودی و  $(V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_{ij})] - V_i - V_j)$  تا  $V_{1,2, \dots, n}$  برهم کنش بین n پارامتر را نشان می دهند. همچنین می توان گفت، شاخص های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می آیند.  $S_i = \frac{V_i}{V}$  شاخص حساسیت مرتبه ی اول،  $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$  شاخص حساسیت مرتبه ی دوم و  $S_{Ti}$  شاخص حساسیت کلی یا همان تاثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه ی مرتبه های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه (3) استخراج می گردد.

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (3)$$

معادلات و روابط روش تحلیل سوبل در مرجع [24] به طور کامل ارائه شده است.

یکی از مهمترین مزایای روش آنالیز حساسیت سوبل بیان دقیق و کمی میزان تاثیر مستقل هر یک از پارامترهای ورودی بر روی پاسخ خروجی است و به طور دقیق می توان دریافت که میزان حساسیت پاسخ نسبت به تغییر هر یک از پارامترهای ورودی در بازه آزمایش چقدر است و این مورد جزء مزایای خاص روش سوبل است. در خصوص تاثیر میزان پارامترهای معادله رگرسیون روش های مختلف آماری، نکاتی را بیان می کنند ولی

دورانی ابزار و سرعت پیشروی ابزار به عنوان متغیرهای ورودی و با مدل‌سازی فرآیند به روش سطح پاسخ و با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD)، تعداد 17 حالت مختلف ترکیبی از قطر ابزار، سرعت دورانی و سرعت پیشروی، به عنوان 17 حالت آزمایش بدست آمده است.

در جدول 1 بازه تغییرات متغیرهای ورودی در فرآیند سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است که هر متغیر دارای 3 سطح می‌باشد.

با توجه به طراحی آزمایش‌های صورت گرفته، برای هر 17 آزمایش انجام شده، متغیر آسیب اندازه‌گیری شده و در جدول 2 گزارش شده است. ذکر این نکته نیز الزامی است که با انجام تصادفی آزمایش‌ها، سعی گردیده است تا از ایجاد خطاهای پیش‌بینی نشده جلوگیری گردد [25]. همچنین به منظور تحلیل و تفسیر نتایج حاصله و استخراج ضرایب معادله ریاضی رگرسیون حاکم بر آزمایش از نرم‌افزار مینی‌تب<sup>1</sup> نسخه 18 و نرم افزار دیزاین اکسپرت<sup>2</sup> نسخه 11 استفاده شده است.

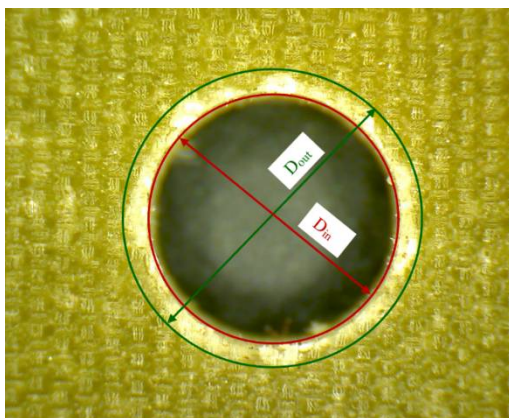


Fig. 2 Measurement of damage area in laminated composites, damage of outer layers in different drilling diameters

شکل 2 اندازه‌گیری ناحیه آسیب در چندلایه‌کامپوزیتی، آسیب لایه‌های خروجی در قطرهای مختلف سوراخکاری

جدول 3 مقادیر کد شده متغیرهای ورودی بر اساس روش سطح پاسخ

Table 1 Coded values of input variables based on the response surface method

-1	0	+1	ضرایب
1000	2000	3000	سرعت دورانی (rpm)
50	100	150	سرعت پیشروی (mm/min)
2	4	6	قطر (mm)

با استفاده از روش سطح پاسخ یاد شده و تحلیل داده‌های آزمایش، یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای پاسخ

می‌توان تا 0/01 میلی‌متر را اندازه‌گیری نمود. کامپوزیت‌های پایه پلیمری به علت شفافیت نسبی، نور را تا حد زیادی از خود عبور می‌دهند ولی به طور کلی هنگامی که پرتوی نورانی وارد یک قطعه کامپوزیتی می‌شود در آن پخش شده و قطعه را به طور یکنواخت روشن می‌سازد. حال اگر یک ناپیوستگی مانند یک ترک، در قطعه باشد، این ناپیوستگی مطابق شکل 2 از پخش شدن نور در تمامی نمونه جلوگیری می‌کند و در این بخش از قطعه سایه ایجاد می‌گردد. حال به منظور اندازه‌گیری پارامتر آسیب، دو دایره به مرکز هم که یکی از آن‌ها بر قطر داخلی مماس بوده،  $D_{in}$  و دیگری بر ناحیه بیرونی آسیب،  $D_{out}$  با استفاده دستگاه آزمایش (میکروسکوپ) رسم می‌گردد و سپس پارامتر آسیب،  $D_f$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$D_f = \frac{D_{out}}{D_{in}} \quad (4)$$



(الف)



(ب)

Fig. 1 a) Experimental equipment for laminated composites drilling b) Drill

شکل 1 الف) تجهیز آزمایشگاهی به منظور سوراخکاری چندلایه کامپوزیتی (ب) مته سوراخکاری

### 3-4- مدل‌سازی ریاضی و روش انجام آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، سه پارامتر قطر مته سوراخکاری، سرعت

<sup>1</sup> Minitab

<sup>2</sup> Design Expert

بدست آمده بدین منظور اصلاح گردد. آنالیز واریانس مدل ریاضی خطی مرتبه دوم اصلاح شده در جدول 4 ارائه شده است.

**Table 3** Analysis of variance of damage index in terms of effective parameters in laminated composites drilling

**جدول 3** تحلیل واریانس اندیس آسیب بر حسب مؤلفه های مؤثر در سوراخکاری چندلایه های کامپوزیت

P-Value	F-Value	میانگین مربعات MS	جمع مربعات SS	درجه آزادی DF	ترمها
0/000	19/79	0/033924	0/305314	9	مدل
0/197	2/03	0/003477	0/003477	1	v
0/127	2/99	0/005132	0/005132	1	f
0/000	127/39	0/218319	0/218319	1	d
0/634	0/25	0/000424	0/000424	1	v <sup>2</sup>
0/87	0/03	0/000050	0/000050	1	f <sup>2</sup>
0/007	13/91	0/023837	0/023837	1	d <sup>2</sup>
0/021	8/76	0/015004	0/015004	1	v.f
0/300	1/25	0/002148	0/002148	1	v.d
0/016	9/86	0/016893	0/016893	1	f.d

مقدار خطای مجموع مربعات<sup>2</sup> مدل منطبق شده بر داده ها در تحلیل های آماری، مقدار دقت معادله رگرسیون حاکم بر مسئله را مشخص می نماید که در مبحث طراحی آزمایش ها از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. به طوری که هر میزان، مقدار خطای گفته شده در مدل های قابل انطباق بر داده ها کمتر باشد، مدل مربوطه دارای خطای پیش بینی کمتری است و در این تحقیق کمترین عدد این مؤلفه برای مدل رگرسیون مرتبه دوم کامل<sup>3</sup> دست آمد. با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطای مجموع مربعات برای مدل مرتبه دوم خطی برابر 1/80477، معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر متغیر آسیب در فرآیند سوراخکاری چندلایه های کامپوزیتی به صورت معادله (5) می باشد.

$$D_f = 1.54 + 0.000068v + 0.004023f - 0.2339d + 0.02575d^2 - 0.000001fv \quad (5)$$

با توجه به به دست آمدن مقادیر  $R^2 = 95.34\%$  و  $R^2(\text{adj}) = 92.54\%$  برای مدل بالا و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده ها با توجه به شکل 3، می توان گفت که مدل سازی صورت گرفته از دقت بسیار مناسبی برخوردار می باشد.

خروجی مسئله (متغیر آسیب) بر حسب متغیرهای ورودی مسئله منطبق شده است و سپس بر اساس مدل حاصله، تفسیر نتایج، تحلیل حساسیت و همچنین بهینه سازی مورد نظر بر روی مدل انجام شده است.

**جدول 2** انجام آزمایشات بررسی اثر پارامترهای سوراخکاری بر آسیب چندلایه های کامپوزیتی

**Table 2** Experiments to investigate the effect of drilling parameters on the damage of laminated composites

شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	قطر (mm)	متغیر آسیب، $D_f$
1	1000	50	2	1/342
2	3000	50	2	1/421
3	1000	150	2	1/644
4	3000	150	2	1/416
5	1000	50	6	1/165
6	3000	50	6	1/176
7	1000	150	6	1/150
8	3000	150	6	1/121
9	1000	100	4	1/215
10	3000	100	4	1/195
11	2000	50	4	1/197
12	2000	150	4	1/197
13	2000	100	2	1/420
14	2000	100	6	1/154
15	2000	100	4	1/215
16	2000	100	4	1/194
17	2000	100	4	1/172

#### 4- داده ها و تفسیر مدل سازی فرآیند

پس از استخراج نتایج بدست آمده از میزان آسیب در چندلایه های کامپوزیتی در زمان سوراخکاری، نتایج حاصل از تحلیل واریانس در جدول 3 ارائه شده است. آنالیز واریانس میزان تاثیر پارامترهای معادله رگرسیون را مشخص می نماید و در تحلیل و مدلسازی آزمایش ها نقش به سزایی دارد. جدول تحلیل واریانس در طراحی آزمایش ها، می تواند میزان اثرگذاری فاکتورهای ورودی و برهم کنش های آن ها را بر روی پاسخ خروجی مسئله مشخص نماید [25].

با توجه به قابلیت اطمینان 95 درصد در آزمایش های مهندسی، مقدار  $P^1$  کمتر از 0/05 به منظور تعیین اثر مؤلفه های مدل در نظر گرفته می شود [25]. در نتیجه می بایست مدل

<sup>2</sup> Press

<sup>3</sup> Full quadratic

<sup>1</sup> P-value

ورودی بر پاسخ سیستم یا به عبارت دیگر متغیر آسیب توری، به بررسی و تحلیل منحنی‌های اثر مؤلفه‌های اصلی مانند سرعت دورانی ابزار، قطر و سرعت پیشروی آن که از تحلیل روش سطح پاسخ و تحلیل آماری سوبل حاصل شده و همچنین منحنی‌های برهم کنش و کانتور پلات‌های اثر برهم کنش، فاکتورهای مؤثر به دقت مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرند. نمودار رویه پاسخ متغیر آسیب به تغییر همزمان سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار در شکل 4 قابل مشاهده است.

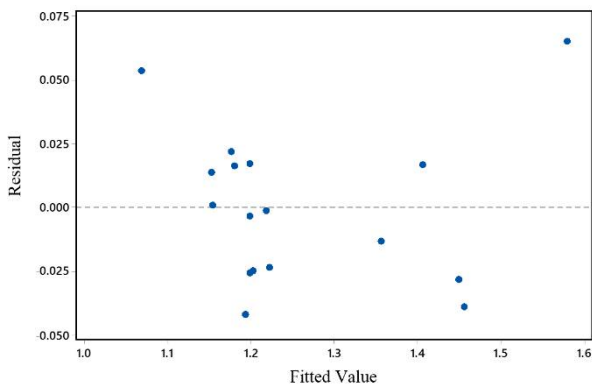


Fig. 3 Distribution of residuals corresponding to the fitted model  
 شکل 3 پراکندگی باقیمانده‌ها نسبت به مدل منطبق شده

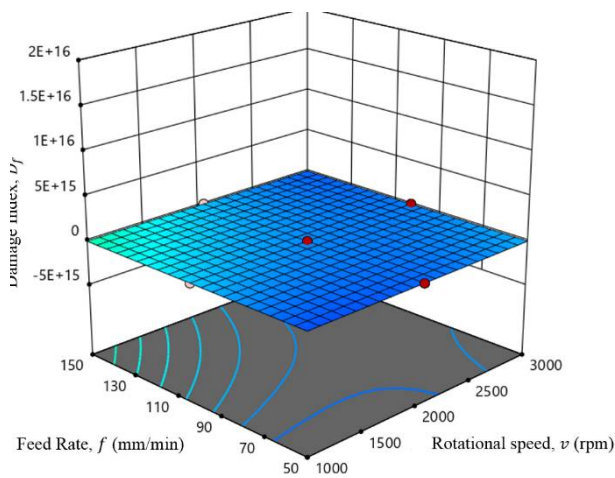


Fig. 4 Damage variable response of the surface plot based on the simultaneous behavior of rotational speed and feed velocity  
 شکل 4 نمودار رویه پاسخ متغیر آسیب بر اساس رفتار همزمان سرعت چرخشی و سرعت پیشروی

نمودارهای شکل 5 رفتار توری نمونه را بر اساس هر یک از متغیرهای ورودی فرآیند طبق مدل سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ ارائه می‌دهند. یکی از مواردی که باید در بررسی مؤلفه‌های مؤثر بر پاسخ در نظر گرفته شود این است که اگر هر دو اثر فاکتور اصلی و برهم کنش فاکتورها موثر واقع شد، تحلیل و بررسی رفتارها و بیان نتایج می‌بایست از روی نمودارهای اثر

Table 4 Analysis of variance of the effect of selected parameters on the damage variable of laminated composites in the drilling process

جدول 4 تحلیل واریانس اثر پارامترهای منتخب در متغیر آسیب چندلایه‌های کامپوزیتی در فرآیند سوراخکاری

P-value	F-value	میانگین مربعات (MS)	جمع مربعات (SS)	جمع مربعات متوالی Seq SS	درجه آزادی DF	ترم‌ها
0/156	2/35	0/003477	0/003477	0/003477	1	v
0/092	2/99	0/005132	0/005132	0/005132	1	f
0/000	147/59	0/218319	0/218319	0/218319	1	d
0/000	29/54	0/043693	0/043693	0/043693	1	d <sup>2</sup>
0/010	10/14	0/015004	0/015004	0/015004	1	v.f
0/007	11/42	0/016893	0/016893	0/016893	1	f.d

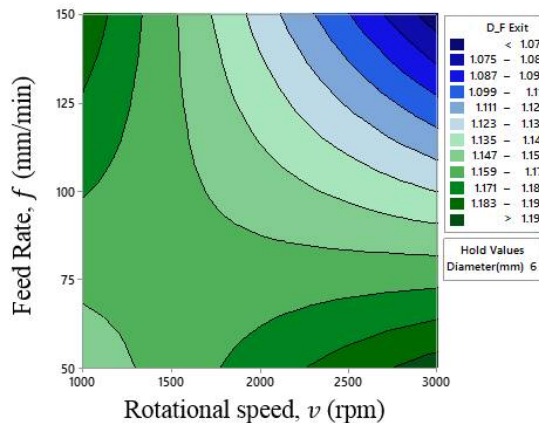
این نکته نیز می‌بایست لحاظ گردد که در مبحث طراحی آزمایش‌ها، مقدار بالای  $R^2$ ، یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را تعیین می‌نماید. هر مقدار مؤلفه یاد شده به عدد 1 و یا 100 درصد نزدیک باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش‌بینی مدل آماری رگرسیون منطبق شده بر داده‌ها دقیق‌تر خواهد بود [25]. علاوه بر مورد بالا، استفاده از بحث تحلیل پراکندگی باقیمانده‌ها<sup>1</sup> نیز از دیگر مواردی است که دقت مدل سازی انجام شده و نتایج گرفته شده را آشکار می‌سازد. مدلی که به داده‌های آزمایشگاهی منطبق شده، می‌بایست از بین مقادیر آزمایشگاهی عبور کرده و همچنین فاصله داده‌های آزمایشگاهی از مدل رگرسیون منطبق شده، کم و تصادفی باشد. کم بودن این مقدار را  $R^2$  مشخص می‌نماید. در نتیجه با توجه به نمودار شکل 3 می‌توان دریافت که در تحقیق حاضر، هم مدل خوب منطبق شده و هم نظم خاصی در توزیع باقیمانده‌ها مشاهده نمی‌شود که از این نظر بسیار مناسب می‌باشد.

## 5- تحلیل حساسیت پارامترها و بررسی اثر متغیرهای ورودی در میزان آسیب در فرآیند سوراخ کاری چند لایه‌های کامپوزیتی

در بخش حاضر سعی می‌گردد تا با استفاده از مدل سازی ریاضی صورت گرفته بر مسئله در بخش‌های پیشین و انطباق مناسب آن بر داده‌های آزمایشگاهی و همچنین با توجه به مؤلفه‌های مؤثر بر مدل حاضر، به بررسی نقش هر یک از متغیرهای ورودی مانند سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و قطر ابزار بر رفتار توری چندلایه کامپوزیتی پرداخته شود. بدین منظور علاوه بر بررسی میزان حساسیت هر یک از پارامترهای

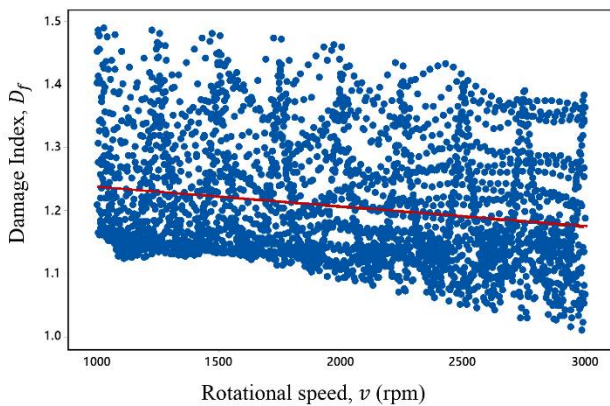
<sup>1</sup> Residual fitted value





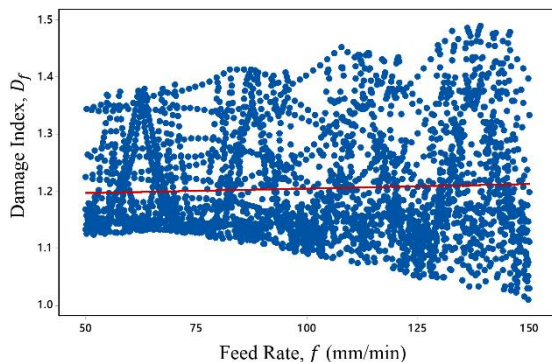
**Fig. 6** Interaction diagrams of feed rate and rotational speed of the tool at different diameters on the damage variable during drilling process

شکل 6 نمودارهای برهم‌کنش نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار در قطرهای مختلف بر متغیر آسیب در حین فرایند سوراخکاری



**Fig. 7** The effect of tool rotational speed factor diagram on damage variable

شکل 7 نمودارهای اثر فاکتور سرعت دورانی ابزار بر متغیر آسیب



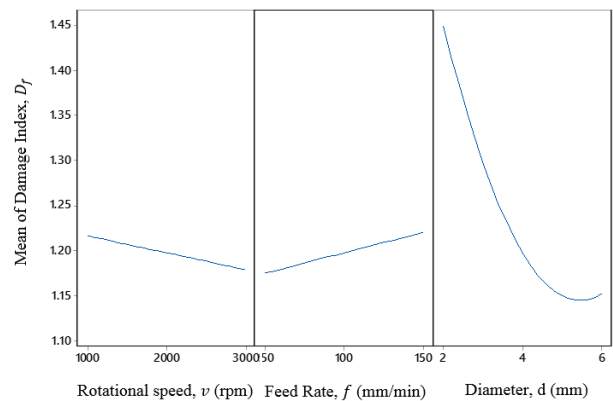
**Fig. 8** The effect of feed velocity factor diagram on damage variable

شکل 8 نمودارهای اثر فاکتور سرعت پیشروی بر متغیر آسیب

در روش سوبل بر خلاف روش‌های گرافیکی، که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به طور همزمان تغییر می‌نمایند.

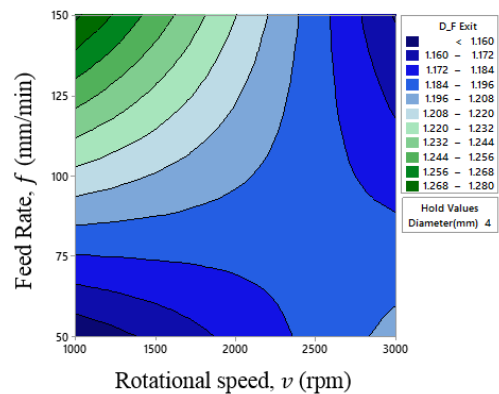
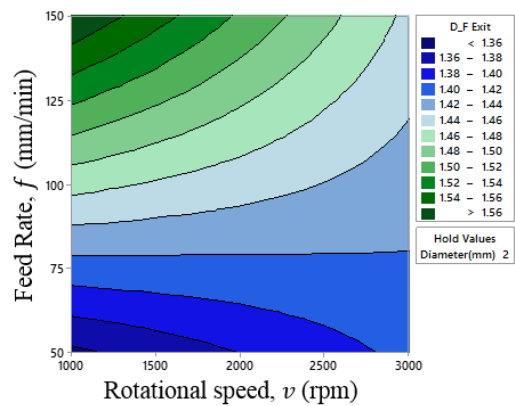
برهم‌کنش بیان گردد و نمودارهای اثر فاکتور اصلی در تحلیل و تفسیر نتایج حاصله از اهمیت کمتری برخوردار بوده و در اولویت بعد قرار دارد [26].

نمودار بر هم‌کنش مؤثر فاکتورهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار در قطرهای مختلف در شکل 6 ارائه شده است. شکل‌های 7، 8 و 9 پراکندگی نقاط پاسخ‌های متغیر آسیب با تغییرات همزمان پارامترهای ورودی را نشان می‌دهند. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیملب<sup>1</sup> و به روش سوبل استخراج شده‌اند.



**Fig. 5** The effect of the main input factors on the laminated composites damage variable

شکل 5 اثر فاکتورهای اصلی ورودی بر متغیر آسیب چندلایه کامپوزیتی



<sup>1</sup> Simlab



آسیب تورقی وابستگی زیادی به سرعت پیشروی ابزار در حین سوراخکاری دارد. بنابر این به منظور کاهش آسیب ناشی از سوراخکاری، می‌بایست سرعت پیشروی کاهش یابد؛ زیرا افزایش سرعت پیشروی موجب افزایش نیروی عمودی به تبع آن موجب ایجاد تورق در نواحی محل سوراخکاری می‌گردد. البته ذکر این نکته نیز الزامی است که تأثیر پارامتر سرعت پیشروی نباید به صورت مستقل در نظر گرفته شود زیرا مطابق با آنچه در زیر بخش پیشین بیان شد، در قطرهای بالا و سرعت دورانی بالا، افزایش سرعت پیشروی موجب کاهش متغیر آسیب خواهد شد.

### 5-3- تحلیل اثر قطر ابزار بر متغیر آسیب در حین سوراخکاری چندلایه کامپوزیتی

با توجه به نمودارهای 5 و 9 می‌توان دریافت که با افزایش قطر ابزار، متغیر آسیب کاهش یافته است. یکی از دلایل کاهش متغیر آسیب با افزایش قطر ابزار را می‌توان، انتقال مناسب براده به بیرون از سوراخ و کاهش دمای محلی در حین سوراخکاری دانست که این خود می‌تواند موجب بهبود فرآیند سوراخکاری و کاهش اثرات آسیب ناشی از این عملیات ماشین‌کاری گردد.

### 5-4- جمع بندی تحلیل سوبل در بررسی حساسیت مؤلفه‌های

مؤثر بر متغیر آسیب، در سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی با توجه به نتایج موجود در شکل‌های 5 تا 9 و در تحلیل حساسیت تورق در فرآیند سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی و تحلیل آنالیز واریانس روش سطح پاسخ، مشخص می‌گردد که در بازه‌های در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی مانند سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر ابزار، به طور کلی و با در نظر گرفتن تغییرات هم‌زمان همه پارامترها در رفتار آسیب ایجاد شده در ناحیه سوراخکاری، قطر ابزار، سرعت پیشروی و سرعت دورانی به ترتیب بیشترین اثر را بر متغیر آسیب داشته‌اند. البته باید این نکته را نیز یادآورد شد که شیب تغییرات نمودارهای نشان داده شده در زیر بخش‌های پیشین، مؤید این موضوع است که همه پارامترهای یاد شده دارای اثر محسوس در رفتار تورقی در ناحیه سوراخکاری بوده‌اند.

در شکل 10، نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی با استفاده از روش سوبل ارائه گردیده است که مؤید تفاسیر بیان شده پیشین می‌باشد. همان‌طور که در شکل 10 مشخص است، درصد‌های مستخرج از تحلیل به روش سوبل که با استفاده از نرم‌افزار سیمبل که با الگوریتمی خاص پارامترهای ورودی را به طور همزمان تغییر داده و اثر آن را بر پاسخ سیستم مورد بررسی

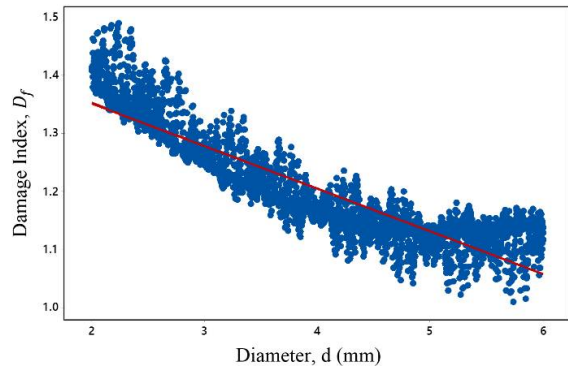


Fig 9. The effect of diameter factor diagram on damage variable

شکل 9 نمودارهای اثر فاکتور قطر بر متغیر آسیب

### 5-1- تحلیل اثر سرعت دورانی بر متغیر آسیب

در این بخش به بررسی تأثیر سرعت دورانی ابزار بر متغیر آسیب در عملیات سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی پرداخته خواهد شد. با توجه به نمودار شکل 5، در صورتی که به بررسی مستقل اثر پارامتر سرعت دورانی بر متغیر آسیب پرداخته شود، نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی، متغیر آسیب کاهش می‌یابد. این درحالی است که رفتار آسیب با در نظر گرفتن همزمان سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار در قطرهای مختلف (نشان داده شده در شکل 6) نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، در قطرهای پایین، متغیر آسیب با کاهش همزمان سرعت دورانی و سرعت پیشروی کاهش می‌یابد. علاوه بر این رفتار آسیب در قطرهای بالاتر متفاوت از رفتار آن در قطرهای پایین می‌باشد، به طوری که در قطر 6 میلیمتر، با افزایش سرعت دورانی و سرعت پیشروی، کمترین مقدار آسیب در عملیات سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی ایجاد می‌گردد. قطر 4 میلیمتر را می‌توان حالت گذار در نظر گرفت؛ زیرا در این قطر در دو حالت 1- کاهش سرعت دورانی همزمان با کاهش سرعت پیشروی، متغیر آسیب کمینه خود را اختیار می‌نماید. نتایج بدست آمده در این بخش را می‌توان اینگونه تفسیر نمود که در قطرهای پایین و سرعت پیشروی پایین، به دلیل اینکه خروج براده از سوراخ به سهولت صورت نگرفته، بهتر است به منظور کاهش متغیر آسیب، سرعت دورانی نیز کم باشد و این در حالی است که در قطرهای بالا عکس این حالت اتفاق افتاده و بهتر است به منظور کمینه نمودن متغیر آسیب، زمان مواجهه را کاهش داد (سرعت پیشروی) و از طرفی دیگر، همزمان سرعت دورانی را نیز افزایش داد.

### 5-2- تحلیل اثر سرعت پیشروی

با بررسی شکل‌های 5 و 8 این نکته را می‌توان دریافت که متغیر

چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/پوکسی با استفاده از روش سطح پاسخ یکی از اهداف اصلی تحقیق حاضر بوده است. بدین منظور سه پارامتر قطر ابزار، سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند. سپس با ساخت چندلایه کامپوزیتی با پارچه بافته شده شیشه با بافت ساده، به بررسی تأثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر متغیر آسیب تورق در حین سوراخکاری پرداخته شده است. نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آماری انجام شده نشان می‌دهند که به منظور کاهش میزان تورق در چندلایه کامپوزیتی در قطرهای پایین، بهتر است سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار کمینه مقدار خود را داشته تا خروج براده به سهولت انجام شده و میزان تورق کمتر گردد. همچنین در قطرهای بالا، برعکس قطرهای پایین ابزار، می‌بایست با افزایش سرعت دورانی و سرعت پیشروی (کاهش زمانه مواجهه ابزار با چندلایه کامپوزیتی) به طور همزمان، متغیر آسیب را کاهش داد.

با در نظر گرفتن سرعت دورانی 3000 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 150 میلی‌متر بر دقیقه و قطر ابزار 5/8 میلی‌متر می‌توان به کمترین میزان آسیب تورق یعنی مقدار 1/0676 دست یافت.

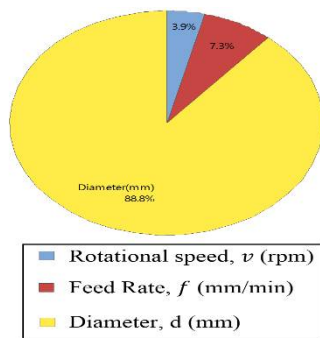


Fig 10. Pie chart of the effect of input parameters on the damage variable

شکل 10 نمودار درصد تأثیر پارامترهای ورودی بر متغیر آسیب

قرار می‌دهد، در فرآیند سوراخکاری چندلایه‌های شیشه/پوکسی کامپوزیتی ساخته شده از پارچه بافته شده شیشه با بافت ساده، قطر ابزار سوراخکاری دارای اثر 88/8 درصدی و سپس سرعت پیشروی و سرعت دورانی به ترتیب دارای تأثیر 7/3 و 3/9 درصدی بوده‌اند.

یکی از مزایای تحلیل حساسیت سوبل نسبت به تحلیل واریانس این است که علاوه بر مشاهده تأثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پاسخ سیستم، می‌توان تأثیر کمی و دقیق این پارامترها را به طور همزمان به دست آورده و فاکتورهای با تأثیرگذاری بالا و کم را شناسایی نمود. همچنین البته باید توجه داشت که در تحلیل اثر بر هم کنش رفتار پارامترها و تحلیل دقیق رفتارهای پیچیده روش سطح پاسخ تحلیلی کامل‌تری را ارائه می‌نماید.

### 5-5- بهینه‌سازی متغیر آسیب در سوراخکاری کامپوزیت

با توجه به نتایج بدست آمده از بخش‌های پیشین، در این بخش عملیات سوراخکاری به منظور استخراج کمینه آسیب بهینه سازی شده است. با در نظر گرفتن حد کمینه متغیر آسیب در مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها و لحاظ نمودن حد مطلوبیت<sup>1</sup>، بهینه سازی صورت گرفته که نتایج آن به شرح ذیل می‌باشد. با در نظر گرفتن سرعت دورانی 3000 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 150 میلی‌متر بر دقیقه و قطر 5/8 میلی‌متر، کمینه میزان آسیب برابر با 1/0676 در حین سوراخکاری در چندلایه کامپوزیتی شیشه/پوکسی مورد مطالعه در تحقیق حاضر، ایجاد خواهد شد. نتایج بیان شده در زیر بخش حاضر، در شکل 11 نشان داده شده است.

### 6- نتیجه‌گیری

تحلیل حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند سوراخکاری

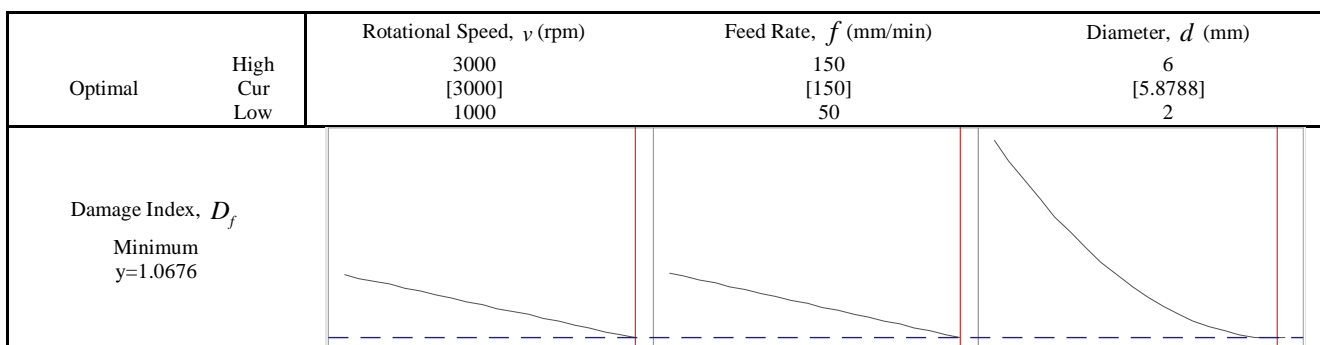


Fig 11. Optimization in order to achieve the minimum variable of damage during drilling process

شکل 11 بهینه‌سازی صورت گرفته به منظور دستیابی به کمینه متغیر آسیب در حین فرآیند سوراخکاری

<sup>1</sup> Desirability

- plastic composite, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 2, pp. 508-513, 2008.
- [13] K. Palanikumar, Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites, *Measurement*, Vol. 44, No. 10, pp. 2138-2148, 2011.
- [14] L. Sorrentino, S. Turchetta, and C. Bellini, A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control, *Composite Structures*, Vol. 186, pp. 154-164, 2018.
- [15] C. Tan, A. Azmi, and N. Muhammad, Delamination and surface roughness analyses in drilling hybrid carbon/glass composite, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, No. 10, pp. 1366-1376, 2016.
- [16] S. Ragunath, C. Velmurugan, and T. Kannan, Optimization of drilling delamination behavior of GFRP/clay nano-composites using RSM and GRA methods, *Fibers and Polymers*, Vol. 18, No. 12, pp. 2400-2409, 2017.
- [17] R. R. Behera, R. K. Ghadai, K. Kalita, and S. Banerjee, Simultaneous prediction of delamination and surface roughness in drilling GFRP composite using ANN, *International Journal of Plastics Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 424-450, 2016.
- [18] H. M. Ali, A. Iqbal, and L. Liang, A comparative study on the use of drilling and milling processes in hole making of GFRP composite, *Sadhana*, Vol. 38, No. 4, pp. 743-760, 2013.
- [19] R. K. Pandey and S. Panda, Multi-performance optimization of bone drilling using Taguchi method based on membership function, *Measurement*, Vol. 59, pp. 9-13, 2015.
- [20] R. K. Pandey and S. Panda, Drilling of bone: A comprehensive review, *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-30, 2013.
- [21] A. Nekahi and K. Dehghani, Modeling the thermomechanical effects on baking behavior of low carbon steels using response surface methodology, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 8, pp. 3845-3851, 2010.
- [22] M. Moradi, M. Ghoreishi, J. Frostevarg, and A. F. Kaplan, An investigation on stability of laser hybrid arc welding, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, No. 4, pp. 481-487, 2013.
- [23] M. Moradi, M. Ghoreishi, and M. Torkamany, Modelling and optimization of Nd: YAG laser and tungsten inert gas (TIG) hybrid welding of stainless steel, *Lasers in Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 211-230, 2014.
- [24] I. Sobol, Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models Mathematical Modeling and Computational Experiments 1, 1993.
- [25] R. K. Pandey and S. S. Panda, Optimization of multiple quality characteristics in bone drilling using grey relational analysis, *Journal of orthopaedics*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-45, 2015.
- [26] D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments. *John wiley & sons*, 2017.
- همچنین در پایان با تحلیل حساسیت سوبل به روش سطح پاسخ، میزان تأثیر هر یک از پارامترهای بر متغیر آسیب تورق در حین سوراخکاری بدست آمده و میزان قطر ابزار، سرعت پیشروی و سرعت دورانی بهینه به منظور کاهش تورق در لایه‌های خروجی چندلایه کامپوزیتی ارائه شده است که درصد تأثیر آن‌ها به ترتیب 88/8، 7/3 و 3/9 می‌باشد.

## 7- مراجع

- [1] C. Soutis, Fibre reinforced composites in aircraft construction, *Progress in aerospace sciences*, Vol. 41, No. 2, pp. 143-151, 2005.
- [2] V. Nagarajan and J. S. Rajadurai, A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 8, pp. 3153-3159, 2012.
- [3] N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz, F. Campa, A. F. Valdivielso, and I. Etxeberria, Design and test of a multitooth tool for CFRP milling, *Journal of composite materials*, Vol. 43, No. 26, pp. 3275-3290, 2009.
- [4] A. M. Abrão, P. E. Faria, J. C. Rubio, P. Reis, and J. P. Davim, Drilling of fiber reinforced plastics: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1-3, pp. 1-7, 2007.
- [5] U. Khashaba, Delamination in drilling GFR-thermoset composites, *Composite structures*, Vol. 63, pp. 313-327, 2003.
- [6] F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, and L. Surcin, Drilling of composite structures, *Composite structures*, Vol. 52, No. 3-4, pp. 511-516, 2001.
- [7] A. Di Ilio, V. Tagliaferri, and F. Veniali, Tool life and hole quality in drilling aramid and fibrous composites, *Composite Material Technology*, pp. 203-207, 1991.
- [8] J. P. Davim and P. Reis, Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, *Composite structures*, Vol. 59, No. 4, pp. 481-487, 2003.
- [9] J. P. Davim, P. Reis, and C. C. Antonio, Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 2, pp. 289-297, 2004.
- [10] U. Khashaba, M. Seif, and M. Elhamid, Drilling analysis of chopped composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 1, pp. 61-70, 2007.
- [11] N. Mohan, S. Kulkarni, and A. Ramachandra, Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1-3, pp. 265-271, 2007.
- [12] A. Abrão, J. C. Rubio, P. Faria, and J. Davim, The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced