مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 51-59

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی و بهینه‌سازی فاکتور آسیب در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های سه بعدی پارابیم

محمد خوران[1]، سیدمحمدحسین سیدکاشی[2*]

1- مربی، مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی اسفراین، اسفراین

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175-376، seyedkashi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 تیر 1395

پذیرش: 24 مرداد 1395

ارائه در سایت: 11 مهر 1395

کلید واژگان:

کامپوزیت با الیاف سه بعدی

سوراخ‌کاری

طراحی آزمایش

بهینه‌سازی

چکیده

کامپوزیت‌ها به دلیل نسبت استحکام به وزن و سفتی بالا، مقاومت بالا در مقابل کمانش و خستگی و بسیاری خواص مطلوب دیگر کاربرد زیادی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. کامپوزیت سه‌بعدی پارابیم، به دلیل استحکام بالای خمشی و سبکی فوق‌العاده در مقایسه با دیگر کامپوزیت‌های ساندویچی امروزه جایگاه قابل توجهی را پیدا کرده است. برای اتصال کامپوزیت‌ها به سازه‌های دیگر نیاز به سوراخ‌کاری است. در این پژوهش، به بررسی اثر سرعت دورانی، پیشروی و قطر مته بر میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت‌های سه‌بعدی پارابیم در حین عملیات سوراخ‌کاری پرداخته شده است. برای ارزیابی تأثیر پارامترهای سوراخ‌کاری بر روی این کامپوزیت‌ها از طراحی آزمایش به روش عاملی کامل استفاده و به‌منظور بررسی عیوب موجود در نمونه‌های سوراخ‌کاری از تکنیک عکاسی دیجیتال بهره گرفته شده است. برای سنجش میزان آسیب وارد شده به نمونه‌ها، از دو فاکتور تعریف شده استفاده گردید: 1- فاکتور شکست ماتریس (*MFF*)، و 2- فاکتور الیاف برش نخورده (*UCFF*). تجزیه و تحلیل نتایج تجربی نشان داد که در بین عوامل اصلی، پیشروی و سرعت دورانی به‌ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روی *MFF* با 23.83 و 0.34 درصد دارند؛ اما نتایج تجربی برای *UCFF*، حاکی از آن بود که قطر ابزار با 17.17 درصد بیشترین اثر را دارد. همچنین مشخص شد، هر دو فاکتور رفتار مشابهی را در مقابل تغییرات سرعت دورانی داشته و این پارامتر بر خروجی کمترین تأثیر را دارد. سرعت دورانی 1750 دور بر دقیقه، پیشروی 0.1 میلی‌متر بر دور و قطر مته 10 میلی‌متر به عنوان سطوح بهینه برای حداقل *MFF* و *UCFF* معرفی گردید.

Investigation and Optimization of Damage Factor in Drilling of Parabeam Three-dimensional Composites

Mohammad Khoran[1], Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi[2*]

1- Mechanical Engineering, Group, Higher Education of Esfarayen University, Esfarayen, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175-376, Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 July 2016
Accepted 14 August 2016
Available Online 02 October 2016

Keywords:
3D composites
Drilling
Design of experiment
Optimization

ABSTRACT

Composites are widely used due to their good properties such as high strength to weigh ratio, stiffness, resistance to buckling and fatigue, etc., in different industries. Parabeam three-dimensional composites have found a remarkable situation due to their high bending strength and extremely low weight compared to other sandwich composites. Drilling is necessary to connect them to other structures. In this research, the effects of rotational speed, feed rate and tool diameter have been studied regarding the amount of damage in drilling of 3D composites. A full-factorial design of experiments was used to assess the significance of drilling parameters, and digital photography technique with auto focus was used to evaluate the damages from drilling. The drilling operation was assessed based on two introduced factors including the matrix fracture factor (MFF) and uncut fiber factor (UCFF). The analysis of experimental results showed that among the main parameters, feed rate and rotational speed have the highest and lowest impact on MFF by 23.83% and 0.34%, respectively. But the experimental results for UCFF showed tool diameter with 17.17% is the most effective parameter. Both factors have similar behavior against the rotational speed which has the least impact on the output parameter. Rotational speed of 1750 rpm, feed rate of 0.1 mm/rev, and tool diameter of 10 mm were found to be optimal levels to obtain the minimum MFF and UCFF.

1- مقدمه

پنل‌های کامپوزیتی سه بعدی دارای مزایایی از جمله دارا بودن سفتی خمشی بالا، مقاومت در برابر کمانش و خستگی و ساختار سبک وزن هستند. همچنین از ویژگی‌های منحصر به‌فرد این کامپوزیت‌ها، نسبت استحکام به وزن بالا در مقایسه با کامپوزیت‌های ورقه‌ای[1] می‌باشد. این کامپوزیت که با نام تجاری پارابیم شناخته می‌شود یک نوع کامپوزیت ساندویچی می‌باشد. از سوراخ‌کاری در مواد کامپوزیتی اغلب برای ایجاد اتصالات مکانیکی مانند پیچ و پرچ در صنایع مختلف استفاده می‌شود. مکانیزم سوراخ‌کاری در قطعات

[1] Laminate composite

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Khoran, S. M. H. Seyedkashi, Investigation and Optimization of Damage Factor in Drilling of Parabeam Three-dimensional Composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 51-59, 2016 (in Persian)

کامپوزیتی تقویت شده در مقایسه با مواد همسانگرد و همگن مانند فلز، متفاوت است. در حین سوراخ‌کاری مواد مرکب عیوب مختلفی ایجاد می‌شود که در میان آنها، خروج الیاف[1]، ترک‌خوردگی ماتریس[2] و تورق[3] مرسوم‌ترین عیوب هستند. پدیده تورق در هنگام ورود و خروج مته به داخل قطعه و بویژه در لایه‌های بالایی و پایینی، رخ می‌دهد. تورق در طول سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های ورقه‌ای توسط دو مکانیزم مختلف صورت می‌گیرد: کشیدن لایه به سمت بالا[4] و فشار (هل) دادن لایه‌ی پایینی[5] [1]. با این حال، بین تورق ایجاد شده در ورق کامپوزیتی و پنل ساندویچی تفاوت وجود دارد؛ در یک پنل ساندویچی، به دلیل وجود دو ورقه یکی در سطح بالایی و دیگری در سطح پایین، چهار منطقه آسیب‌دیده در فرم تورق دیده می‌شود (پوسته‌ای شدن و هل دادن الیاف در هر دو قسمت بالا و پایین وجود دارد) درحالی‌که در سوراخ‌کاری یک کامپوزیت ورقه‌ای دو منطقه وجود دارد. شکل 1 عیوب یک کامپوزیت سوراخ شده و محل ایجاد تورق در یک کامپوزیت ورقه‌ای و ساندویچی [2] و شکل 2 شکست ماتریس بر اساس جهت گیری الیاف [3] را نشان می‌دهند. اگر زاویه بین لبه برنده ابزار برشی و جهت گیری الیاف صفر درجه باشد جهت تنش و جهت الیاف در یک راستا است، سطوح زیر لبه برشی ابزار فشرده می‌شود و شکست در راستای لبه برنده ابزار اتفاق می‌افتد. شکست‌های مجزای بر روی سطح ماشین‌کاری شده (هم در الیاف و هم در ماتریس) باقی می‌ماند. با افزایش زاویه بین لبه ابزار برشی و جهت گیری الیاف، نیروی فشاری و خمشی که بر روی الیاف بوجود می‌آید، باعث شکست ماتریس می‌شود. این عامل باعث می‌شود، شکست ماتریس و تورق حتی در لایه‌های بسیار پایین‌تر از قسمت ماشین‌کاری شده به‌وجود می‌آید. شرایط قطعه‌کار در زوایای بالاتر از 90 درجه به دلیل تبدیل نیروی فشاری به کششی بسیار بدتر خواهد شد. لذا با توجه به شرایط سطح، زاویه بین 30 تا 60 درجه پیشنهاد شده است.

شکست ماتریس به عنوان یک عیب درون لایه‌ای شناخته می‌شود [4]. چگالی ترک ماتریس بستگی به جهت‌گیری لایه با توجه به جهت نیرو، تعداد لایه‌ها و ضخامت آنها، مواد (خواص مکانیکی، چقرمگی)، میزان نیرو و تغییرات دمایی دارد که توسط محققین مختلفی ارزیابی شده است [5-7]. عیوب بوجود آمده در حین ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هوچنگ و همکاران [8] اثر هندسه مته‌های مختلف را بصورت تحلیلی بررسی کردند. آنها تورق در انواع مختلف مته را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بوسکو و همکاران [9]، اثر پارامترهای برش روی تورق را در سوراخ‌کاری یک ساندویچ پنل با هسته فولادی و صفحات تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد ارزیابی قرار دادند. ساردیتاس و همکارانش [10]، روش بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک را برای کاهش فاکتور تورق و حداکثر کردن نرخ براده‌برداری در سوراخ‌کاری ورق‌های کامپوزیتی بکار گرفتند. تسائو و همکارانش [11]، روش نوینی را برای کاهش عیوب حین سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی توسط نیروی پشتیبانی فعال ارائه کردند. روش پیشنهادی نشان داد که با نرخ تغذیه بالا می‌توان قطعات کامپوزیتی را با هزینه کم و تورق ناچیز تولید کرد. زایتون و همکارانش [12]، تأثیر پارامترهای گشتاور، نیروی محوری و کیفیت سطح را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند، نتایج تجربی حاکی از آن بود که با انتخاب مناسب پارامترهای برش، می‌توان کیفیت سوراخ‌ها را بهبود بخشید. پلانی‌کومار [13] یک روش مؤثر برای بهینه‌سازی پارامترهای سوراخ‌کاری بر اساس روش تاگوچی پیشنهاد داد. سیگ و شارما [14]، یک مدل ریاضی برای دستیابی به دینامیک فرایند سوراخ‌کاری ارائه کردند. با توجه به اینکه نیروهای سوراخ‌کاری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی عیوب به وجود آمده در کامپوزیت دارند، لذا آنها به مدل‌سازی نیروی سوراخ‌کاری کامپوزیت پرداختند. کلیکاپ [15] تأثیر پارامترهای برش (سرعت، میزان تغذیه و زاویه نوک ابزار) بر تورق را بر سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های GFRP مورد بررسی قرار داده است. کاترولوس [16] با انجام تست‌های تجربی و مدل‌سازی، شکست ماتریس زمینه را مورد مطالعه قرار داد. داتا و همکاران [17] بهینه‌سازی رفتار سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های الیاف کربنی را مورد مطالعه قرار دادند. وی نیرو، گشتاور، زبری سطح و تورق را به عنوان خروجی پژوهش خود با تغییر در قطر ابزار، سرعت دورانی و پیشروی، با استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی چون منطق فازی و الگوریتم ژنتیک بهینه نمود. نتایج تحقیق آنها علاوه بر بهینه‌سازی، قدرتمندی منطق فازی نسبت به الگوریتم ژنتیک را در یافتن پاسخ در زمان بسیار کمتر نشان داد. خوردگی ابزار نیز عامل بسیار مهمی در بوجود آمدن الیاف برش نخورده و شکست ماتریس و تورق دارد لذا محققانی، مطالعات خود را بر روی این حوزه متمرکز کردند. به طور مثال کادورین و همکاران [18] آنالیز مکانیزم عیوب و سایش ابزار در حین سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های بافته شده سه بعدی با استفاده از مایع خنک کننده درون ریز و بیرون ریز مورد مطالعه قرار دادند. آنها خاطرنشان کردند با انتخاب مناسب پارامترهای سوراخ‌کاری، نوع ابزار و استفاده از مایع خنک کننده می‌توان به شرایطی دست یافت که هیچ عیبی در اطراف سوراخ مشاهده نشود. سایش ابزار پارامتر تأثیر گذاری بوده و سرعت دورانی بر روی آن تأثیر گذار نیست.

با توجه به شرایط کامپوزیت‌های پارابیم، بحث تورق در آنها منتفی بوده ولی همچنان دو مسأله شکست ماتریس زمینه و الیاف برش نخورده باقی است. در هنگام سوراخ‌کاری، شکست ماتریس منجر به تضعیف سازه و الیاف برش نخورده نیز باعث گسترش جدا شدن الیاف شده؛ بنابراین بررسی الیاف برش نخورده و شکست ماتریس در پنل‌های کامپوزیتی یک مسأله حیاتی است.

با توجه به اهمیت بررسی عیوب بوجود آمده در کامپوزیت‌ها در اثر ماشین‌کاری و همچنین پیشینه پژوهش، لزوم مطالعه سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های ساندویچی سه‌بعدی احساس می‌گردد. لذا در این پژوهش اثر سرعت دورانی، قطر مته و مقدار پیشروی بر دو فاکتور الیاف برش نخورده و شکست ماتریس مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله، یک پنل کامپوزیتی 3D به ضخامت 1 Cm از جنس الیاف شیشه تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری (سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار برشی) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق یافتن بهترین شرایط ماشین‌کاری برای ایجاد سوراخ در کامپوزیت‌های 3D با استفاده از تعریف فاکتور شکست ماتریس *MFF*[6] و فاکتور الیاف برش نخورده *UCFF*[7] می‌باشد.

2- آزمایش‌های تجربی

2-1- مواد

کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش یک کامپوزیت بافته شده سه بعدی با نام تجاری پارابیم[8] است. در شکل3 نمایی از بافت سه بعدی این نوع

[1] Uncut fiber
[2] Matrix cracking
[3] Delamination
[4] Peeling up
[5] Pushing out

[6] Matrix Fracture Factor
[7] Uncut Fiber Factor
[8] Parabeam

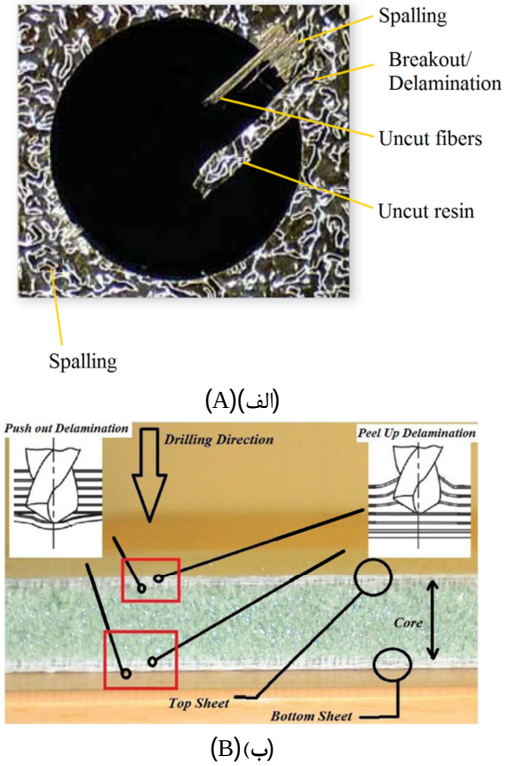

Fig. 1 (A) Several Damages in drilled composite (B) Delamination Zones in Sandwich composite [2]

شکل 1 الف) انواع عیوب موجود در یک سوراخ کامپوزیتی ب)محل‌های مختلف تورق در یک کامپوزیت ساندویچی [2]

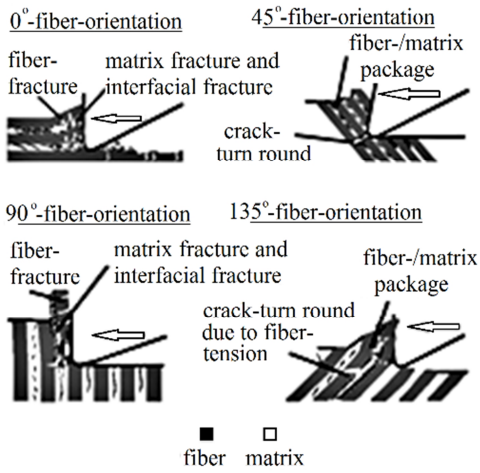

Fig. 2 Matrix crack by layer orientation [3]

شکل 2 شکست ماتریس بر اساس جهت گیری الیاف [3]

کامپوزیت دیده می‌شود. در این تحقیق، پلیمر از نوع پلی‌استر و صفحات از لایه الیاف بافته شده از جنس الیاف شیشه گرید E با چگالی 54.2 گرم بر سانتی‌متر مکعب به ضخامت 1cm ساخته شده‌اند. کامپوزیت‌های پارابیم با توجه به شرایط بافت الیاف آن همان طور که در شکل 3 نشان داده شده است فقط یک لایه بافته شده در قسمت فوقانی و یک لایه بافته شده در قسمت تحتانی خود دارد، در صورتی که کامپوزیت‌های ورقه‌ای از چندین لایه الیاف بر روی هم گذاشته شده، تشکیل شده است. تورق زمانی ایجاد می‌گردد که یکی از این لایه‌ها که توسط رزین به لایه زیرین و رویی خود چسبیده است، توسط مکانیزم‌های مختلف از یکدیگر جدا شوند. لذا با توجه به شکل الیاف این کامپوزیت‌های سه بعدی بحث تورق در آنها منتفی است. لازم به ذکر است در کامپوزیت‌های رایج ساندویچی، یک کامپوزیت ورقه‌ای در قسمت فوقانی و یکی در قسمت تحتانی وجود دارد و درون آن نیز چوب بالسا، فوم و غیره است. در صورتی که این کامپوزیت کاملا یک تیکه است. همچنین امکان دور کردن حداکثری جرم از مرکز و تحمل حداکثری ممان خمشی و همچنین امکان افزایش حداکثری نسبت استحکام به وزن در آن‌ها وجود دارد. شکل 4 سوراخ‌کاری این کامپوزیت را نشان می‌دهد.

2-2- ابزار

فرایند سوراخ‌کاری در نمونه‌ها با استفاده از مته‌های ساخته شده از فولاد تندبر[1] با روکش تیتانیوم نیتراید[2] بر اساس استاندارد DIN 338، با قطرهای 4، 7 و 10 میلی‌متر، با زاویه راس 118 درجه انجام گرفته است. به منظور اطمینان از تیز بودن و عدم وجود آستانه فرسایش که بر خروجی این پژوهش بسیار تأثیرگذار است، بعد از انجام هر 3 تست ابزار تعویض گردید. به منظور انجام فرایند سوراخ‌کاری، از یک ماشین فرز سی ان سی FP4ME استفاده شده است (شکل 5). تست‌ها به گونه‌ای انجام گرفت که پس از خروج 5 میلی‌متری ابزار از انتهای کامپوزیت، با حداکثر سرعت از سوراخ خارج شده و به نقطه اولیه خود بازمی‌گردد.

3-2- سوراخ‌کاری

سوراخ‌های موجود در پنل‌های ساندویچی با سه سرعت دورانی 500، 1750 و 3000 دور بر دقیقه، نرخ تغذیه 0.02، 0.06 و 0.1 میلی‌متر بر دور و قطر 4، 7 و 10 میلی‌متر ایجاد شده‌اند. تاکنون مطالعه علمی بر روی سوراخ‌کاری این بافت کامپوزیت صورت نگرفته است. لذا انتخاب سطوح طراحی آزمایش بر اساس تجربه نویسندگان مقاله، تجهیزات موجود در صنعت و مقالات موبوط به سوراخ‌کاری کامپوزیت، صورت گرفته است. در طول فرایند سوراخ‌کاری از مایع خنک‌کننده استفاده نشده است. به‌منظور ارزیابی الیاف برش نخورده و شکست ماتریس در اطراف سوراخ ایجاد شده، از روش عکس‌برداری دیجیتال سایبرشات با استفاده از یک دوربین با رزولوشن 14 مگاپیکسل و با قابلیت تنظیم نقطه کانونی خودکار، استفاده شده است. سوراخ‌های ایجاد شده در شکل 6 نشان داده شده‌اند. در این شکل عیوب شکست ماتریس (در اطراف سوراخ) و برش نخوردن الیاف (ریش ریش شدن الیاف در ناحیه داخل سوراخ) به‌وضوح قابل مشاهده هستند.

3- فاکتور شکست ماتریس و الیاف برش نخورده

آسیب‌های متنوعی در فرایند سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی از جمله ترک خوردگی ماتریس، خروج الیاف، الیاف برش نخورده، شکستگی الیاف و تورق وجود دارد. از بین موارد بالا با توجه به شرایط ماده مورد مطالعه، بحث الیاف برش نخورده و شکست ماتریس، اهمیت پیدا کرده، لذا در این پژوهش به این دو پرداخته شده است. الیاف برش نخورده به الیافی گفته می‌شود که پس از سوراخ‌کاری در درون حفره مشاهده می‌شود. عوامل مختلفی چون نداشتن زمان کافی برای برش، زیاد بودن نیرو، پاره کردن الیاف به‌جای برش آنها بر آن تأثیر گذار هستند. شکست ماتریس نیز همان ترک‌های ریز محیط سوراخ است که باعث کاهش استحکام مکانیکی می‌شود. شکست ماتریس منتج شده از عوامل مختلفی چون نیروی بالا، پیشروی زیاد، ارتعاشات عرضی است. در

[1] HSS
[2] TIN

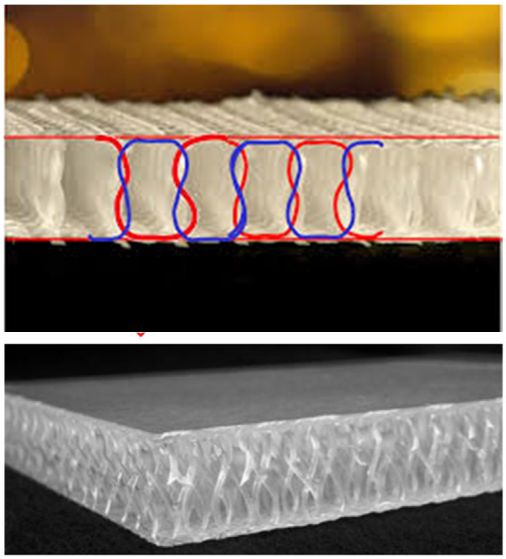

Fig. 3 Parabeam Composite view

شکل 3 نمای بافت کامپوزیت پارابیم

Fig. 4 3D composite during drilling

شکل 4 ورق کامپوزیتی 3D در حین سوراخ‌کاری

بعضی از پژوهش‌های صورت گرفته از قرار دادن قطر سوراخی به عنوان مرجع و محاسبه حداکثر قطر در حالت تورق یا شکست ماتریس محاسبات خود را انجام داده‌اند، که روش مناسبی برای بررسی تورق و یا شکست ماتریس و الیاف برش نخورده نیست. خوران و همکاران [2] برای محاسبه تورق و الیاف برش نخورده از مساحت نواحی مذکور به‌جای قطر قسمت معیوب استفاده کرده‌اند که دارای نتایج دقیق‌تری است. لذا در این مقاله به ارزیابی ترک خوردگی ماتریس و الیاف برش نخورده در پنل‌های بافته شده سه بعدی با استفاده از دو فاکتور زیر پرداخته شده است.

الف) فاکتور شکست ماتریس *MFF*

ب) فاکتور الیاف برش نخورده *UCFF*

این فاکتورها بصورت زیر تعریف شده‌اند.

$$UCFF = \frac{A_i}{A_{\text{hole}}} = \frac{A_i}{\pi R^2} \quad (1)$$

$$MFF = \frac{A_0}{A_{\text{hole}}} = \frac{A_0}{\pi R^2} \quad (2)$$

که در آن، A_{hole} مساحت دایره مربوط به قطر مته می‌باشد. A_i و A_0، همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، به‌ترتیب ناحیه بین دایره مرجع (مته) و ناحیه آسیب داخلی و ناحیه بین دایره مرجع (مته) و ناحیه آسیب خارجی می‌باشند.

Fig. 5 CNC milling machine (FP4ME)

شکل 5 دستگاه فرز CNC مدل FP4ME

Fig. 6 Matrix fracture and uncut fiber in the hole

شکل 6 شکست ماتریس و الیاف برش نخورده در سوراخ

هر دو سطح بالا و پایین برای هر نمونه با استفاده از تکنیک عکاسی دیجیتال عکس برداری شده و حداکثر آن در محاسبات لحاظ گردیده است. برای هر سوراخ سه ناحیه مختلف مطابق شکل 7 مشخص شده است. ناحیه تیره همان ناحیه شکست ماتریس است که مربوط به A_0 می‌باشد و تفاضل مساحت نامی سوراخ (مشخص شده با رنگ مشکی) و مساحت داخلی قسمت قرمز رنگ با A_i مشخص می‌شود که مربوط به الیاف برش نخورده است. همان‌طور که دیده می‌شود بعضی از الیاف برش نخورده در ناحیه قرمز رنگ آورده نشده است، این الیاف برش نخورده مربوط به سمت دیگر سوراخ است. برای این کار تمامی تصاویر به محیط نرم‌افزار اتوکد برده شده و با مرجع قرار دادن قطر دایره مته، مساحت نواحی مختلف محاسبه شده است. سپس با استفاده از روابط (1) و (2) فاکتورهای مورد ارزیابی استخراج شده‌اند.

4- طراحی آزمایش

به منظور بررسی فاکتورهای معرفی شده در این پژوهش، سرعت دورانی، قطر ابزار و نرخ پیشروی در سه سطح مطابق جدول 1 مورد بررسی قرار گرفته‌اند که جهت دستیابی به نتایج تجربی بهتر از سیستم طراحی آزمایش بصورت عاملی کامل استفاده شده است. جهت بهبود امکان برآورد خطای تجربی در سیستم، از دو تکرار استفاده گردید. با این کار قدرت آماری بیشتری (توانایی شناسایی اثرات کوچک) به دست می‌آید. پس کل آزمایش‌ها برابر $3^3 \times 2 = 54$ است. ترتیب انجام آزمایش‌ها کاملا بصورت تصادفی شده[1] (CRD) بوده است. بدین ترتیب تخصیص هر عاملی که خارج از کنترل آزمونگر است (مثل مواد، انسان‌ها، ترتیب انجام آزمایش‌ها و غیره) بصورت تصادفی انجام شود. در روش‌های آماری نیاز است که مشاهدات بصورت تصادفی و مستقل از یکدیگر باشند. تصادفی‌سازی باعث میانگین‌گیری اثر عوامل خارجی و کاهش خطاهای سیستمی موجود در آزمایش می شود.

[1] Completely Randomized Design

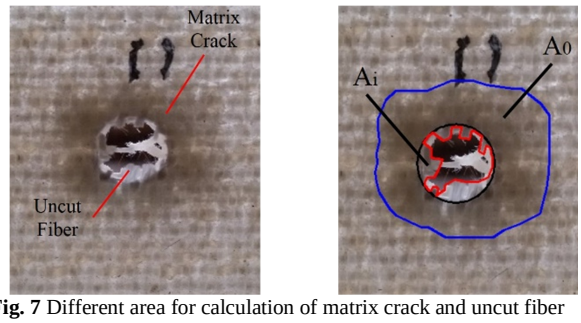

Fig. 7 Different area for calculation of matrix crack and uncut fiber factor

شکل 7 نواحی مختلف جهت محاسبه فاکتور شکست ماتریس و الیاف برش نخورده

جدول 2 نتایج مربوط به آزمون‌های تجربی برای یافتن فاکتور شکست ماتریس و فاکتور الیاف برش نخورده را با استفاده از روابط (1) و (2) بر حسب نرخ تغذیه، سرعت دورانی و قطر ابزار نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تکرار دوم آزمایش‌ها نیز کاملا تصادفی اجرا گردیده است ولی برای کاهش فضا، نتایج تکرار دوم در جدول 2 در ادامه تکرار اول آورده شده است.

5- نتایج و بحث

در سوراخ‌کاری پنل‌های کامپوزیتی پدیده شکست ماتریس در خروجی سوراخ ناشی از نیروی محوری می‌باشد که از طریق نوک مته به هر پنل وارد می‌شود و به دلیل ضخامت کم لایه‌های اولیه و انتهایی، با پیشروی مته، مقاومت قطعه در برابر نیروی محوری کاهش یافته که منجر به پاره شدن الیاف (به جای برش الیاف) می‌شود. این امر باعث ایجاد عیوب اساسی در سازه می‌شود. خصوصا در هنگام ایجاد سوراخ به‌منظور ایجاد اتصال مکانیکی، کم کردن شکست ماتریس اطراف سوراخ امری حیاتی می‌باشد. علاوه بر این، عیوب بالا، باعث تمرکز تنش و در نتیجه کاهش استحکام مکانیکی سازه کامپوزیتی می‌شوند.

5-1- تحلیل واریانس

تحلیل واریانس یک روش استنباط آماری بسیار مفید برای بررسی اثرات هر عامل، تفاوت میانگین‌ها، معناداری عوامل و درصد مشارکت هر یک از ورودی‌ها در پیش‌بینی خروجی مد نظر است. لذا در این پژوهش تلاش شده است تا با تحلیل واریانس و بحث بر روی نتایج آن، پارامترهای تأثیرگذار و درصد مشارکت آنها کاملا مشخص و بیان شود. این تحلیل زمانی صادق و قابل اعتماد است که نرمال بودن توزیع داده‌ها، برابری واریانس‌ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آنها اثبات شده باشد.

متداول‌ترین روش بررسی این فرضیات، بررسی انواع نمودار باقیمانده می‌باشد. از نمودارهای احتمال نرمال برای بررسی نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها استفاده می‌شود. در صورت نرمال بودن، مقادیر باقیمانده‌ها در امتداد خط مستقیم قرار می‌گیرد، در غیر اینصورت انحراف‌های منظمی مشاهده خواهد شد. در تشخیص مستقیم بودن الگوی نقاط در اطراف خط مستقیم، تاکید بر روی مقادیر مرکزی نمودار است و معمولا انحراف‌های معتدل جدی نیستند. از نمودار پراکندگی باقیمانده‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده یا نسبت به متغیرهای ورودی برای بررسی شرط ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها استفاده می‌شود. در صورتی که این نمودارها نیز دارای یک الگو و ساختار مشخص باشند، شرط ثابت بودن باقیمانده‌ها نقض شده است. همچنین از نمودار پراکندگی مقدار باقیمانده‌ها نسبت به دوره زمانی که جمع‌آوری شده‌اند برای بررسی استقلال باقیمانده‌ها استفاده می‌شود. وجود یک الگو و ساختار مشخص در این نمودار به معنای نقض شدن شرط استقلال است. پیش از ارائه نتایج تحلیل، به‌منظور اطمینان، سه نمودار معرفی شده باید بررسی گردند. در نمودار احتمال نرمال، انحراف جدی مشاهده نشد و نمودار پراکندگی مقدار باقیمانده‌ها در بازه زمانی که جمع آوری شده‌اند نیز فاقد یک الگو و ساختار مشخص بود. در نتیجه فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها و فرض استقلال باقیمانده‌ها معتبر و برقرار است. پراکندگی باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده از ساختار مشخصی پیروی نمی‌کند و لذا می‌توان گفت که شرط ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها نیز برقرار است. در نتیجه تحلیل واریانس قابل اعتماد است. از ارائه این نمودارها به دلیل محدودیت فضا در مقاله صرفنظر شد.

یکی از ملاک‌های بررسی عوامل معنادار بر خروجی یک آزمایش بررسی مقدار عدد P است. این عدد همان سطح معناداری است که توسط آزمونگر مشخص می‌شود و یا می‌توان P را به‌عنوان کوچک‌ترین سطح معناداری که منجر به رد فرض صفر می‌شود، تعریف نمود. اگر مقدار عدد P عاملی کمتر از 0.05 باشد، نشان-دهنده آن است که عامل مدنظر بر خروجی تحقیق تأثیر معناداری دارد.

جدول 3 تحلیل واریانس نتایج را برای *MFF* نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، پیشروی تأثیر معناداری بر شکست ماتریس زمینه دارد. تأثیر قطر مته با کمی اغماض قابل پذیرش است، ولی سرعت دورانی تأثیری معناداری بر *MFF* ندارد. تمام اثرات متقابل دوتایی و سه‌تایی نیز دارای اثرات مهمی بر خروجی هستند. میزان مشارکت اثرات اصلی، اثرات تقابلی دوتایی و اثرات تقابلی سه‌تایی به ترتیب 26.68، 42.21 و 12.39 درصد بوده است. بیشترین و کمترین مشارکت مربوط به پیشروی با 23.83 و سرعت دورانی با 0.34 درصد بوده است.

جدول 4 تحلیل واریانس داده‌ها برای *UCFF* را نشان می‌دهد. نرخ پیشروی و قطر بر نتایج خروجی تأثیر معنادار دارند. در صورتی که عدد P سرعت دورانی حاکی از عدم معناداری آن می‌باشد. تمام اثرات دوتایی و سه تایی معنادار می‌باشند. میزان مشارکت اثرات اصلی، تقابلی دوتایی و تقابلی سه تایی به ترتیب 25.79، 33.71 و 18.52 درصد بوده است. بالاترین تأثیر را بین تک تک عوامل، اثر تقابلی سه تایی به خود اختصاص داده است و کمترین آن نیز مربوط به سرعت دورانی با 0.2 درصد بوده است.

بررسی جدول تحلیل واریانس *MFF* و *UCFF* نشان دهنده آن است همان‌طور که در قبل بیان شد، سرعت دورانی بر روی هر دو خروجی تأثیر معناداری ندارد ولی نرخ پیشروی بر روی هر دو تأثیرگذار است. در صورتی که قطر مته رفتار دوگانه‌ای بر خروجی‌های مورد مطالعه این پژوهش دارد. این پارامتر بر *MFF* تأثیر گذار نیست ولی بر *UCFF* تأثیر معنادار دارد.

5-2- اثر قطر مته

با توجه به شکل 8 می‌توان دریافت که با افزایش قطر مته، فاکتور شکست ماتریس کمی افزایش، و سپس کاهش می‌یابد. اما برای قطر 10 میلی‌متر

جدول 1 طراحی آزمایش‌ها

Table 1 Design of experiments

سطح	سرعت دورانی *D* (rpm)	نرخ پیشروی *F* (mm/rev)	قطر ابزار *N* (mm)
1	500	0.02	4
2	1750	0.06	7
3	3000	0.1	10

جدول 2 نتایج تجربی

Table 2 Experimental results

*UCFF*2	*MFF*2	*UCFF*1	*MFF*1	پیشروی	قطر ابزار	سرعت دورانی	تست
0.550512	2.986949	0.540506	2.111571	0.1	4	500	1
0.207930	2.476146	0.200079	2.437948	0.1	10	1750	2
0.274421	3.588504	0.264214	3.328656	0.1	7	500	3
0.48910	3.059375	0.484019	4.098768	0.06	7	3000	4
0.371319	0.601544	0.482731	0.760703	0.02	4	3000	5
0.476899	4.385641	0.42493	3.865944	0.02	7	500	6
0.311922	4.896061	0.311922	4.480304	0.02	7	1750	7
0.478911	3.863521	0.518701	6.250915	0.06	4	1750	8
0.242559	4.49431	0.290307	4.429731	0.02	4	500	9
0.217128	2.953755	0.344453	3.335731	0.02	10	1750	10
0.389543	5.389225	0.508913	6.105443	0.02	4	1750	11
0.514802	1.118096	0.594382	1.436416	0.1	4	1750	12
0.428630	5.403432	0.431084	5.395353	0.06	4	3000	13
0.393852	5.601055	0.445822	5.315222	0.02	7	3000	14
0.394795	2.234368	0.397395	3.50762	0.06	10	1750	15
0.469008	2.612473	0.454908	2.727066	0.1	10	500	16
0.280103	4.286737	0.394696	3.54825	0.02	10	3000	17
0.330527	3.118933	0.460451	4.678022	0.06	7	500	18
0.474145	2.846638	0.50013	3.886031	0.1	7	3000	19
0.387565	2.894575	0.514891	3.493003	0.06	10	500	20
0.227543	4.35786	0.380333	5.529253	0.06	10	3000	21
0.428617	1.271367	0.524113	1.475728	0.1	4	3000	22
0.268865	2.719312	0.502728	1.314183	0.1	7	1750	23
0.312838	0.951145	0.440163	2.142668	0.02	10	500	24
0.37872	6.618096	0.53788	4.071542	0.06	4	500	25
0.294592	3.584041	0.43465	3.482181	0.1	10	3000	26
0.542537	2.645879	0.568522	3.737241	0.06	7	1750	27

مقدار آن کمترین مقدار ممکن و برای 7میلی‌متر بیشترین مقدار می‌باشد. در حالیکه با افزایش قطر مته، فاکتور الیاف برش نخورده سیری کاملا نزولی دارد. به طور کلی می‌توان گفت برای سوراخ‌کاری پنل‌های ساندویچی سه بعدی مورد مطالعه و دامنه پارامترهای ورودی این پژوهش، قطر بهینه ابزار برابر با 10 میلی‌متر می‌باشد که هم الیاف برش نخورده و هم شکست ماتریس در حداقل مقدار خود قرار دارند. نیروی ابزار و سطح تماس بین ابزار و قطعه کار با افزایش قطر مته در حال افزایش است، اما از سوی دیگر نسبت نیرو به سطح مقطع (فشار، تنش) کاهش می‌یابد که این کاهش فشار باعث کاهش نسبی آسیب وارده به الیاف و ماتریس می‌شود. از سوی دیگر با توجه به ثابت بودن پارامترهای سوراخ‌کاری (سرعت دورانی)، با افزایش قطر ابزار سرعت

جدول 3 تحلیل واریانس برای *MFF*

Table 3 Analysis of Variance for *MFF*

Source	*DF*	Seq SS	Contribution	*P*-Value
Model	27	97.98	87.11%	0.000
Blocks	1	0.923	0.82%	0.210
Linear	6	30.014	26.68%	0.000
N (Speed)	2	0.379	0.34%	0.715
F (Feed)	2	26.803	23.83%	0.000
D (Diameter)	2	2.833	2.52%	0.098
2-Way Interactions	12	53.104	47.21%	0.000
N×*F*	4	10.383	9.23%	0.006
N×*D*	4	19.78	17.58%	0.000
F×*D*	4	22.941	20.40%	0.000
3-Way Interactions	8	13.939	12.39%	0.013
N×*F*×*D*	8	13.939	12.39%	0.013
Error	26	14.503	12.89%	
Total	53	112.483	100.00%	

جدول 4 تحلیل واریانس برای *UCFF*

Table 4 Analysis of Variance for *UCFF*

Source	*DF*	Seq SS	Contribution	*P*-Value
Model	27	0.515421	89.07%	0.000
Blocks	1	0.06391	11.04%	0.000
Linear	6	0.14925	25.79%	0.000
N (Speed)	2	0.001139	0.20%	0.793
F (Feed)	2	0.048732	8.42%	0.001
D (Diameter)	2	0.099378	17.17%	0.000
2-Way Interactions	12	0.195088	33.71%	0.000
N×*F*	4	0.036259	6.27%	0.016
N×*D*	4	0.10191	17.61%	0.000
F×*D*	4	0.056919	9.84%	0.002
3-Way Interactions	8	0.107173	18.52%	0.000
N×*F*×*D*	8	0.107173	18.52%	0.000
Error	26	0.06327	10.93%	
Total	53	0.578692	100.00%	

برشی افزایش می‌یابد افزایش سرعت برشی، باعث تولید حرارت بیشتر خواهد شد. لذا همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش قطر ابزار، *MFF* و *UCFF* کاهش می‌یابند. درصد مشارکت قطر مته 2.52 درصد برای *MFF* و 17.17 درصد برای *UCFF* بوده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر قطر مته بر الیاف برش نخورده بیشتر از شکست ماتریس بوده است.

5-3- اثر سرعت دورانی

به نظر می‌رسد که سرعت دورانی اثر ناچیزی بر هر دو فاکتور شکست ماتریس و الیاف برش‌نخورده دارد و رفتار آن برای هر دو عامل کاملا یکسان است؛ اما با توجه به نتایج، می‌توان دریافت که با افزایش سرعت دورانی برای *MFF* و *UCFF* نقطه حداقل و حداکثر وجود دارد. به طور کل با افزایش سرعت دورانی در ابتدا هر دو عامل کاهش یافته و با افزایش آن هر دو عامل شروع به افزایش می‌کنند. پس می‌توان نتیجه گرفت که سرعت دورانی 1750 rpm برای *MFF* و *UCFF* یک نقطه حداقل است. در ابتدا با افزایش سرعت دورانی مساحت صفحه برش یا حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش می‌یابد (φ یا همان زاویه صفحه برش افزایش پیدا می‌کند) و نیز باعث افزایش دما می‌شود. افزایش درجه حرارت باعث می‌شود اصطکاک بر روی مته کاهش پیدا کند و سیلان ماده راحت‌تر شود و در نتیجه به دلیل نرم شدن فاز ماتریس، جدایش مواد راحت‌تر صورت می‌گیرد و شکست ماتریس نیز کاهش می‌یابد؛ ولی در سرعت‌های بالاتر مته به دلیل کاهش زمان سوراخ‌کاری و افزایش ارتعاشات عرضی ابزار، شکست ماتریس و الیاف برش‌نخورده رشد آهسته‌ای خواهد داشت. این رفتار دقیقا مشابه رفتار کامپوزیت‌های ساندویچی دیگر است درحالی‌که در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های ورقه‌ای، با افزایش سرعت دورانی موارد مذکور تمایل به کاهش دارد [10,4]. درصد مشارکت سرعت دورانی 0.34 و 0.2 به ترتیب برای *MFF* و*UCFF* بوده است که دلالت بر تأثیر کم این پارامتر بر خروجی‌های مورد مطالعه پژوهش دارد. لذا محدودیتی در انتخاب سرعت دورانی برای ایجاد سوراخ در این کامپوزیت‌ها وجود ندارد.

5-4- اثر پیشروی

در شکل 8 مشاهده می‌شود که اثر پیشروی قابل توجه‌تر از سرعت دورانی است. هر دو پارامتر سرعت دورانی و قطر مته رفتار نسبتا مشابه‌ای برای هر دو خروجی مورد مطالعه این مقاله داشته‌اند، در حالی که *UCFF* و *MFF* به ترتیب در حداقل پیشروی و حداکثر پیشروی دارای کمترین مقدار خود هستند. حداکثر *MFF* و *UCFF* در پیشروی 0.06 mm/rev مشاهده می‌شود. علت این رفتار را می‌توان اینگونه بیان کرد که در پیشروی کم، ابزار فرصت کافی برای برش دادن الیاف دارد، در نتیجه مقدار الیاف برش نخورده کم می‌شود. این در حالی است که در پیشروی‌های بالا، زمان لازم برای انتقال نیرو و ارتعاشات ابزار و در نتیجه شکست ماتریس کم شده، پس *MFF* کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر در صورتی که پیشروی بالا باشد الیاف به‌علت نداشتن زمان کافی برای برش خوردن، پاره و کنده می‌شود. در نتیجه درصد الیاف برش نخورده بیشتر خواهد شد. درصد مشارکت پیشروی 23.83 درصد برای *MFF* و 8.42 درصد برای *UCFF* بوده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که پیشروی اثر قابل ملاحظه‌تری بر شکست ماتریس نسبت به الیاف برش نخورده دارد.

5-5- اثرات متقابل

در برخی از آزمایشات ممکن است اختلاف مشاهده شده بین پاسخ‌های حاصل از سطوح یک عامل، به ازای تمام سطوح عامل دیگر یکسان نباشد. در چنین مواقعی گفته می‌شود بین عوامل اثر متقابل وجود دارد. و به‌طور کلی زمانیکه اثر متقابل بزرگ باشد، اثرات اصلی متناظر، اهمیت کمتری خواهند داشت. با توجه به شکل 9 می‌توان فهمید که اثرات متقابل وجود دارد و از جدول تحلیل واریانس میزان این اثرات قابل تشخیص است. با بررسی جداول 3 و 4 می‌توان مشاهده کرد که مقدار P اثرات تقابلی دوتایی و سه تایی هر دو خروجی این تحقیق زیر 0.05 است که نشان دهنده وجود اثرات متقابل می‌باشد. لذا همان‌طور که دیده می‌شود درصد مشارکت اثرات متقابل بیشتر از اثرات اصلی است. با بررسی اثر تقابلی در نمودار مربوط به *MFF* و جدول تحلیل واریانس اثرات تقابلی $N\times F$ دارای 9.23 درصد، $N\times D$ دارای 17.58 درصد، $F\times D$ دارای 20.4 درصد و اثر متقابل سه تایی $N\times F\times D$ دارای 12.39 درصد مشارکت بوده‌اند. در نتیجه در بین اثرات متقابل، اثر تقابلی $F\times D$ بالاترین اثر را دارد. این اثر از شکل 9 نیز کاملا مشهود است. در بین اثرات تقابلی، مجموع اثرات تقابلی دوتایی با 47.21 درصد بیشترین تأثیر را بر *MFF* نسبت به اثرات اصلی و اثر تقابلی سه تایی دارند.

با بررسی اثر تقابلی *UCFF* مشخص و مشهود است که اثرات تقابلی دوتایی $N\times F$ دارای 6.27 درصد، $N\times D$ دارای 17.61 درصد، $F\times D$ دارای 9.84 درصد و اثر تقابلی سه تایی $N\times F\times D$ دارای 18.52 درصد مشارکت بوده‌اند. در نتیجه در بین اثرات متقابل، اثر متقابل سه تایی بالاترین اثر را بر خروجی دارد. در بین اثرات تقابلی، مجموع اثرات دوتایی با 33.71 درصد بیشترین تأثیر را بر *UCFF* نسبت به اثرات اصلی و اثر تقابلی سه تایی دارند.

6- شرایط بهینه

اغلب مهندسان تمایل به بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی برای رسیدن به کیفیت مطلوب دارند. این شرایط بهینه می‌تواند شامل مقادیر حداقل و یا حداکثر برای پارامترهای ورودی باشد. برای تولید سوراخ مناسب در کاربردهای صنعتی، کنترل پارامترهای فرایندی مانند سرعت دورانی، میزان تغذیه و قطر مته مورد نیاز می‌باشد. لذا هدف مطلوب در این پژوهش رسیدن به حداقل شکست ماتریس و الیاف برش نخورده است. برای این کار از قسمت بهینه ساز پاسخ[1] نرم‌افزار مینی‌تب[2] استفاده شده است. این نرم‌افزار از روش تابع مطلوبیت[3] برای یافتن پاسخ استفاده می‌کند. مطلوبیت هر خروجی بصورت انفرادی[4] با d نمایش داده می‌شود که می‌تواند حداقل کردن، حداکثر کردن و یا رسیدن به مقداری مشخص باشد و مطلوبیت کلی با D نشان داده می‌شود که از رابطه (3) بدست می‌آید. در ابتدا مقدار هر پاسخ به عددی بین 0 تا 1 تبدیل می‌شود. میزان مطلوبیت همان نزدیک بودن پاسخ تکی هر عبارت بهینه‌سازی شده به جواب بهینه است.

$$D = (d_1 d_2 \dots d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

با اعمال قیود لازم در نرم‌افزار و انجام محاسبات، نتایج در شکل 10 آمده است. با توجه به نتایج قابل استخراج از نمودار همان‌طور که دیده می‌شود، پارامترهای بهینه برای سرعت دورانی، پیشروی و قطر مته به ترتیب برابر 1750 rpm، 0.1 mm/rev و 10 mm می‌باشد.

7- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های تجربی برای بررسی دو شاخص شکست ماتریس زمینه و الیاف برش‌نخورده در سوراخ‌کاری پنل ساندویچ سه‌بعدی پارابیم انجام گرفته است.

[1] Response Optimizer
[2] Minitab
[3] Desirability Function
[4] Individual Desirability

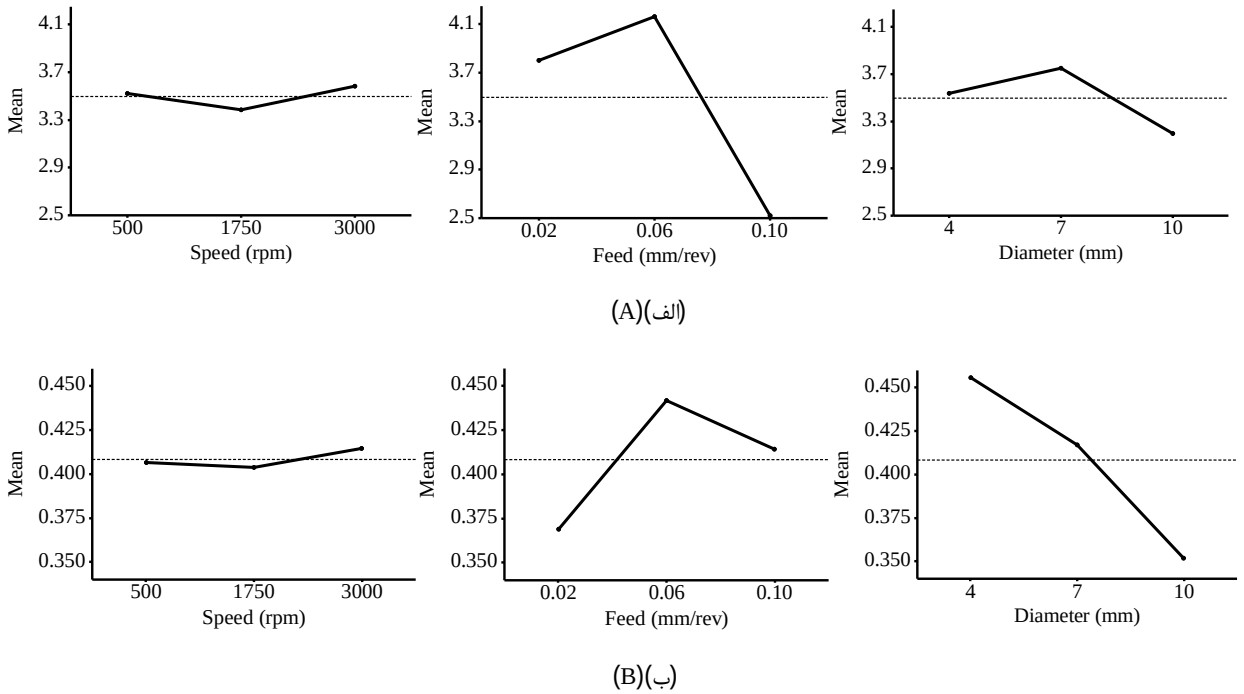

Fig. 8 Main effect plots for (A) *MFF* and (B) *UCFF*

شکل 8 نمودارهای اثرات اصلی برای (الف) *MFF* و (ب) *UCFF*

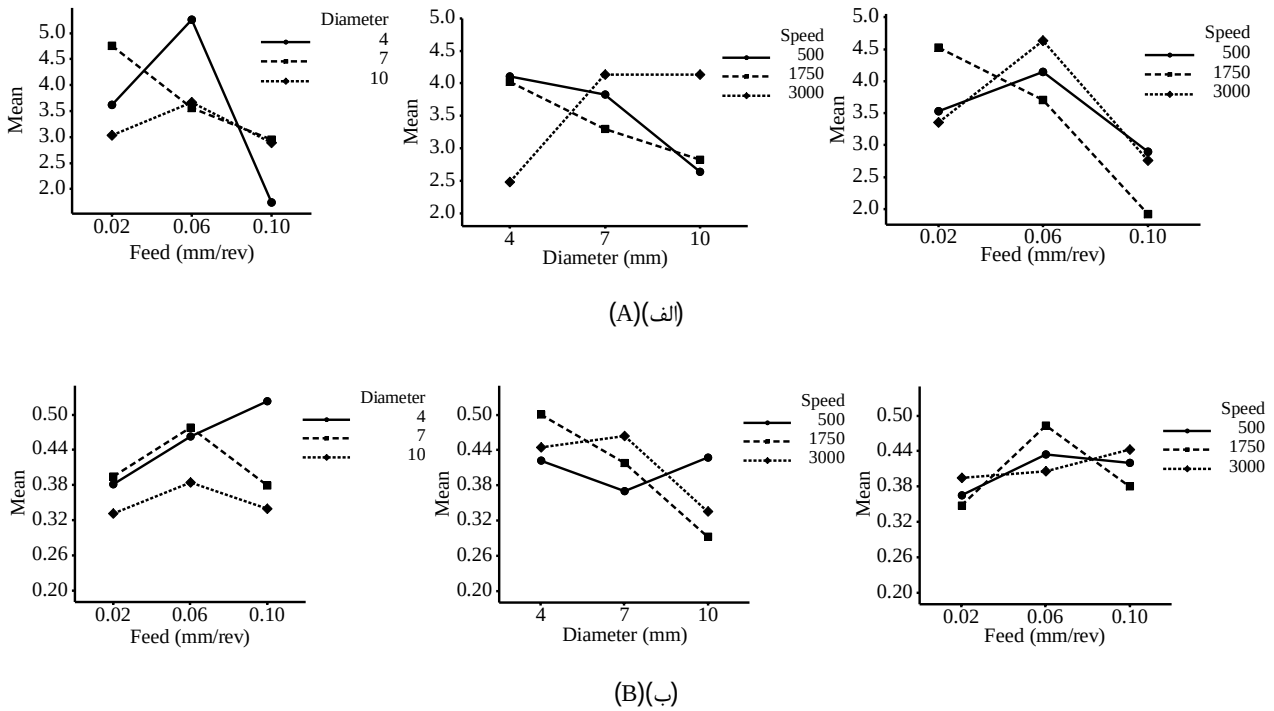

Fig. 9 Interaction plots for (A) *MFF* and (B) *UCFF*

شکل 9 نمودارهای اثر متقابل پارامترهای ورودی برای (الف) *MFF* و (ب) *UCFF*

اثر سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار بر کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. با توجه به داده‌های تجربی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- میزان تغذیه (پیشروی) عاملی است که حداکثر تأثیر را بر *MFF* داشته و بعد از آن قطر ابزار و سرعت دورانی به‌ترتیب بیشترین اثر را دارند. میزان مشارکت اثرات اصلی، اثرات تقابلی دوتایی و اثرات تقابلی سه تایی به ترتیب 26.68، 47.21 و 12.39 درصد بوده است.
- قطر ابزار برش، پیشروی و سرعت دورانی عواملی هستند که به ترتیب بیشترین اثر را بر*UCFF* دارند. میزان مشارکت اثرات اصلی، تقابلی دوتایی و تقابلی سه‌تایی عوامل به ترتیب 25.79، 33.71 و 18.52 درصد بوده است و با افزایش قطر مته کاهش می‌یابد.

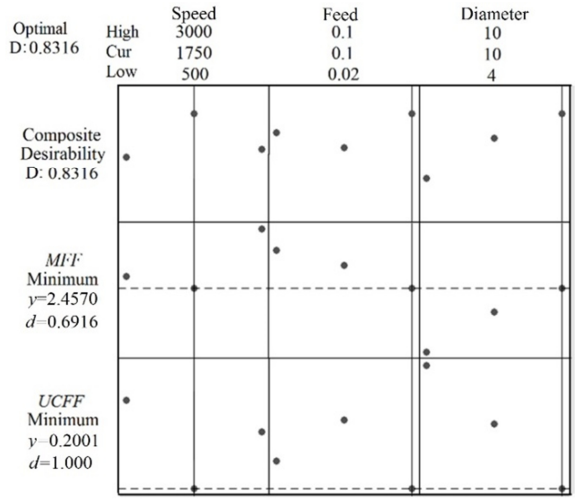

Fig. 10 Optimal Plot for *MFF* and *UCFF*

شکل 10 نمودار مقادیر بهینه برای شکست ماتریس و الیاف برش نخورده

- نتایج نشان می‌دهند که *MFF* و *UCFF* با افزایش نرخ پیشروی ابتدا افزایش، و سپس کاهش می‌یابند.
- رفتار هر دو عامل برای تغییرات سرعت دورانی یکسان است.
- بهترین کیفیت سوراخ بر اساس عامل شکست ماتریس با شرایط نرخ تغذیه 0.1 میلی متر بر دور (سطح 3)، سرعت دورانی 1750 دور بر دقیقه (سطح 2) و قطر مته 10 میلی‌متر (سطح 3) حاصل می‌شود.
- بهترین کیفیت سوراخ براساس عامل الیاف برش نخورده با شرایط نرخ تغذیه 0.02 میلی متر بر دور (سطح 1)، سرعت دورانی 1750 دور بر دقیقه (سطح 2) و قطر مته 10 میلی‌متر (سطح 3) حاصل می‌شود.
- با توجه به سطوح بهینه، سرعت دورانی 1750 دور بر دقیقه، پیشروی 0.1 میلی‌متر بر دور و قطر مته 10 میلی‌متر برای حداقل کردن هر دو خروجی این پژوهش بصورت همزمان، معرفی گردید.

8- مراجع

[1] N. S. Mohan, S. M. Kulkarni, 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.
[2] M. Khoran, P. Ghabezi, M. Farahani, M. Besharti, Investigation of drilling composite sandwich structures, *International Journal Advance Manufufacturing Technology*, Vol. 76, No. 9-12, pp. 1927–1936, 2015.
[3] F. Klocke, W. Konig, S. Rummenholler, C. Wurtz, *Milling of advanced composites*, pp. 249-265, Machining of Ceramics and Composites, Marcel Dekker, 1999.
[4] R. Talreja, *Damage characterization by internal variables*. Pipes RB Composite Materials Series: Damage Mechanics of Composite Materials, Vol. 9, 1994.
[5] J.A. Nairn, Matrix microcracking in composites, *Comprehensive Composite Materials, Polymer Matrix Composites*, Vol. 2, pp. 403-432, 2000.
[6] J. Varna, R. Joffe, NV. Akshantala, R. Talreja, Damage in composite laminates with off-axis plies. *Composite Science Technology*, Vol. 59, No. 14, pp. 2139–47, 1999.
[7] M. Kashtalyan, C. Soutis. Analysis of composite laminates with intra and interlaminar damage, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 41, No. 2, pp. 152–73, 2005.
[8] H. Hocheng, C. Tsao, Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1-3, pp. 335–339, 2003.
[9] M. Bosco, K. Palanikumar, B. D. Prasad, A. Velayudham, Influence of machining parameters on delamination in drilling of GFRP-armour steel sandwich composites, *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 758–763, 2013.
[10] R. Sardiñas, P. Reis, J.P. Davim, Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 15, pp. 3083-3088, 2006.
[11] C. Tsao, H. Hocheng, Y. C. Chen, Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 91-94, 2012.
[12] R. Zitoune, V. Krishnaraj, F. Collombet, Study of drilling of composite material and aluminium stack, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 5, pp. 1246-1255, 2010.
[13] K. Palanikumar, Experimental investigation and optimization in drilling of GFRP composites, *Measurement*, Vol. 44, No. 10, pp. 2138-2148, 2011.
[14] A. Singh, M. Sharma, Modelling of thrust force during drilling of fiber reinforced plastic composites, *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 630-636, 2013.
[15] E. Kilickap, Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 8, pp. 6116-6122, 2010.
[16] D. Katerelos, M. Kashtalyan, C. Soutis, C. Galiotis, Matrix cracking in polymeric composites laminates: Modelling and experiments, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 12, pp. 2310–2317, 2008.
[17] K. Abhishek, S. Datta, S. S. Mahapatra, Multi-objective optimization in drilling of CFRP (polyester) composites: Application of a fuzzy embedded harmony search (HS) algorithm, *Measurement*, Vol. 77, pp. 222-239, 2016.
[18] N. Cadorin, R. Zitoune, P. Seitier, F. Collombet, Analysis of damage mechanism and tool wear while drilling of 3D woven composite materials using internal and external cutting fluid, *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 22, pp. 2687-2703, 2015.