



بررسی و بهینه‌سازی فاکتور آسیب در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های سه بعدی پارابیم

محمد خوران^۱, سید محمد حسین سیدکاشی^{۲*}

۱- مری، مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی اسفراین، اسفراین

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵-۳۷۶ seyedkashi@birjand.ac.ir

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 سه بعدی پارابیم، به دلیل استحکام بالای خمشی و سبکی فوق العاده در مقایسه با دیگر کامپوزیت‌های ساندویچی امروزه جایگاه قابل توجهی را پیدا کرده است. برای اتصال کامپوزیت‌ها به سازه‌های دیگر نیاز به سوراخ کاری است. در این پژوهش، به بررسی اثر سرعت دورانی، پیش روی و قطر مته بر میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت‌های سه بعدی پارابیم در حین عملیات سوراخ کاری پرداخته شده است. برای ارزیابی تأثیر پارامترهای سوراخ کاری بر روی این کامپوزیت‌ها از طراحی آزمایش به روش عاملی کامل استفاده و به منظور بررسی عووب موجود در نمونه‌های سوراخ کاری از تکنیک عکاسی دیجیتال بهره گرفته شده است. برای سنجش میزان آسیب وارد شده به نمونه‌ها، از دو فاکتور تعریف شده استفاده گردید: ۱- فاکتور شکست ماتریس (MFF) و ۲- فاکتور الایاف برش نخوده (UCFF). تجزیه و تحلیل نتایج تجربی نشان داد که در بین عوامل اصلی، پیش روی و سرعت دورانی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روی MFF با ۲۳.۸۳٪ و ۰.۳۴٪ درصد دارند؛ اما نتایج تجربی برای UCFF، حاکی از آن بود که قطر انبار با ۱۷.۱۷٪ 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 ۱۷۵۰ دور بر دقیقه، پیش روی ۰.۱ میلی متر بر دور و قطر مته ۱۰ میلی متر به عنوان سطوح بهینه برای حداقل MFF و UCFF معرفی گردید.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۴ تیر ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۴ مرداد ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۱ مهر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

کامپوزیت با الیاف سه بعدی

سوراخ کاری

طراحی آزمایش

بهینه‌سازی

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

Mohammad Khoran¹, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi^{2*}

۱- Mechanical Engineering, Group, Higher Education of Esfarayen University, Esfarayen, Iran.

۲- 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.

۱- مقدمه

وزن بالا در مقایسه با کامپوزیت‌های ورقه‌ای^۱ می‌باشد. این کامپوزیت که با نام تجاری پارابیم شناخته می‌شود یک نوع کامپوزیت ساندویچی می‌باشد. از سوراخ کاری در مواد کامپوزیتی اغلب برای ایجاد اتصالات مکانیکی مانند پیچ و پرج در صنایع مختلف استفاده می‌شود. مکانیزم سوراخ کاری در قطعات

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

¹ Laminate composite

پارامترهای برش، می توان کیفیت سوراخها را بهبود بخشید. پلانی کومار [13] یک روش مؤثر برای بهینه سازی پارامترهای سوراخ کاری بر اساس روش تاگوچی پیشنهاد داد. سیگ و شارما [14]، یک مدل ریاضی برای دستیابی به دینامیک فرایند سوراخ کاری ارائه کردند. با توجه به اینکه نیروهای سوراخ کاری تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی عیوب به وجود آمده در کامپوزیت دارند، لذا آنها به مدل سازی نیروی سوراخ کاری کامپوزیت پرداختند. کلیکاپ [15] تأثیر پارامترهای برش (سرعت، میزان تغذیه و زاویه نوک ابزار) بر تورق را بر سوراخ کاری کامپوزیت های GFRP مورد بررسی قرار داده است. کاترولوس [16] با انجام تست های تجربی و مدل سازی، شکست ماتریس کاترولوس [16] با انجام تست های تجربی و مدل سازی، شکست ماتریس زمینه را مورد مطالعه قرار داد. داتا و همکاران [17] بهینه سازی رفتار سوراخ کاری کامپوزیت های 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 فاری و الگوریتم ژنتیک بهینه نمود. نتایج تحقیق آنها علاوه بر بهینه سازی، 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 کادرین و همکاران [18] آنالیز مکانیزم عیوب و سایش ابزار در حین سوراخ کاری کامپوزیت های بافته شده سه بعدی با استفاده از مایع خنک کننده درون ریز و بیرون ریز مورد مطالعه قرار دادند. آنها خاطرنشان کردن با انتخاب مناسب پارامترهای سوراخ کاری، نوع ابزار و استفاده از مایع خنک کننده می توان به شرایطی دست یافت که هیچ عیوبی در اطراف سوراخ مشاهده نشود. سایش ابزار پارامتر تأثیر گذاری بوده و سرعت دورانی بر روی آن تأثیر گذار نیست. با توجه به شرایط کامپوزیت های پارابیم، بحث تورق در آنها منتفی بوده ولی همچنان دو مسئله شکست ماتریس زمینه و الیاف برش نخورده باقی است. در هنگام سوراخ کاری، 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 پنل های کامپوزیت یک مسئله حیاتی است.

با توجه به اهمیت بررسی عیوب بوجود آمده در کامپوزیت ها در اثر ماشین کاری و همچنین پیشینه پژوهش، لزوم مطالعه سوراخ کاری کامپوزیت های ساندویچی سه بعدی احساس می گردد. 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 ماشین کاری (سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار بری) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق یافتن بهترین شرایط ماشین کاری برای ایجاد سوراخ در کامپوزیت های 3D با استفاده از تعریف فاکتور شکست ماتریس MFF^6 و فاکتور الیاف برش نخورده $UCFF^7$ می باشد.

2- آزمایش های تجربی

2-1- مواد

کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش یک کامپوزیت بافته شده سه بعدی با نام تجاری پارابیم⁸ است. در شکل 3 نمایی از بافت سه بعدی این نوع

کامپوزیتی تقویت شده در مقایسه با مواد همسانگرد و همگن مانند فلز، متفاوت است. در حین سوراخ کاری مواد مرکب عیوب مختلفی ایجاد می شود که در میان آنها، خروج الیاف¹، ترک خورده² ماتریس³ و تورق³ مرسوم ترین عیوب هستند. پدیده تورق در هنگام ورود و خروج مته به داخل قطعه و بویژه در لایه های بالایی و پایینی، رخ می دهد. تورق در طول سوراخ کاری کامپوزیت های ورقه ای توسعه دو مکانیزم مختلف صورت می گیرد: کشیدن لایه به سمت بالا⁴ و فشار (هل) دادن لایه پایینی⁵ [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 آسیب دیده در فرم تورق دیده می شود (پوسته ای شدن و هل دادن الیاف در هر دو قسمت بالا و پایین وجود دارد) درحالی که در سوراخ کاری یک کامپوزیت ورقه ای دو منطقه وجود دارد. شکل 1 عیوب یک کامپوزیت سوراخ شده و محل ایجاد تورق در یک کامپوزیت ورقه ای و ساندویچی [2] و شکل 2 شکست ماتریس بر اساس جهت گیری الیاف [3] را نشان می دهند. اگر زاویه بین لبه برنده ابزار بری و جهت گیری الیاف صفر درجه باشد جهت تنفس و جهت الیاف در یک راستا است، سطوح زیر لبه برشی ابزار فشرده می شود و شکست در راستای لبه برنده ابزار اتفاق می افتد. شکست های مجزای بر روی سطح ماشین کاری شده (هم در الیاف و هم در ماتریس) باقی می ماند. با افزایش زاویه بین لبه ابزار برشی و جهت گیری الیاف، نیروی فشاری و خمشی که بر روی الیاف بوجود می آید، باعث شکست ماتریس می شود. این عامل باعث می شود، شکست ماتریس و تورق حتی در لایه های بسیار پایین تر از قسمت ماشین کاری شده به وجود می آید. شرایط قطعه کار 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 عیوب درون لایه ای شناخته می شود [4]. چگالی ترک ماتریس بستگی به جهت گیری لایه با توجه به جهت نیرو، تعداد لایه ها و ضخامت آنها، مواد (خواص مکانیکی، چقرمگی)، میزان نیرو و تغییرات دمایی دارد که توسط محققین مختلفی ارزیابی شده است [7-5]. عیوب بوجود آمده در حین ماشین کاری کامپوزیت ها بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هوچنگ و همکاران [8] اثر هندسه مته های 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 سوراخ کاری یک ساندویچ پنل با هسته فولادی و صفحات تقویت شده با الیاف شیشه مورد ارزیابی قرار دادند. ساردیتاس و همکارانش [10]، روش بهینه سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک را برای کاهش فاکتور تورق و حداکثر کردن نرخ براده برداری در سوراخ کاری ورق های کامپوزیتی بکار گرفتند. تساوی و همکارانش [11]، روش نوینی را برای کاهش عیوب حین سوراخ کاری مواد کامپوزیتی توسط نیروی پشتیبانی فعال ارائه کردند. روش پیشنهادی نشان داد که با نرخ تغذیه بالا می توان 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

¹ Uncut fiber

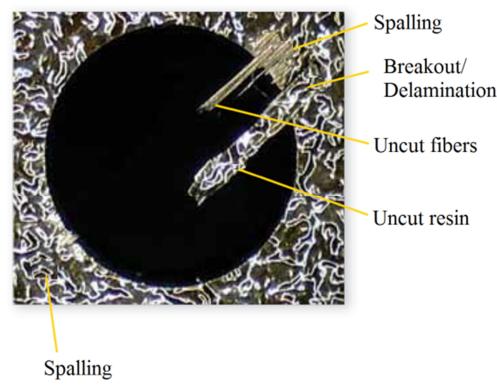
² Matrix cracking

³ Delamination

⁴ Peeling up

⁵ Pushing out

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 وغیره است. در صورتی که این کامپوزیت کاملاً 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 سوراخ کاری این کامپوزیت را نشان می‌دهد.



2-2- ابزار

فرایند سوراخ کاری در نمونه‌ها با استفاده از مته‌های ساخته شده از فولاد تندربر¹ با روکش تیتانیوم نیتراید² بر اساس استاندارد DIN 3384. با قطرهای 7.4 و 10 میلی‌متر، با زاویه راس 118 درجه انجام گرفته است. به منظور اطمینان از تیز بودن و عدم وجود آستانه فرسایش که برخوبی این پژوهش بسیار تأثیرگذار است، بعد از انجام هر 3 تست ابزار تعویض گردید. به منظور انجام فرایند سوراخ کاری، 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- سوراخ کاری

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 سوراخ کاری این بافت کامپوزیت صورت نگرفته است. لذا انتخاب سطوح طراحی آزمایش بر اساس تجربه نویسنگان مقاله، تجهیزات موجود در صنعت و مقایلهای مربوط به سوراخ کاری کامپوزیت، صورت گرفته است. در طول فرایند سوراخ کاری از مایع خنک کننده استفاده نشده است. بهمنظور ارزیابی الیاف برش نخورد و شکست ماتریس در اطراف سوراخ ایجاد شده، از روش عکس برداری 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 شدن الیاف در ناحیه داخل سوراخ) به‌وضوح قابل مشاهده هستند.

3- فاکتور شکست ماتریس و الیاف برش نخورد

آسیب‌های متنوعی در فرایند سوراخ کاری مواد کامپوزیتی از جمله ترک خوردگی ماتریس، خروج الیاف، خروج الیاف برش نخورد، شکستگی الیاف و تورق وجود دارد. از بین موارد بالا با توجه به شرایط ماده مورد مطالعه، بحث الیاف برش نخورد و شکست ماتریس، اهمیت پیدا کرده، لذا در این پژوهش به این دو پرداخته شده است. الیاف برش نخورد به الیافی گفته می‌شود که پس از سوراخ کاری در درون حفره مشاهده می‌شود. عوامل مختلفی چون نداشتن زمان کافی برای برش، زیاد بودن نیرو، پاره کردن الیاف به جای برش آنها بر آن تأثیرگذار 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

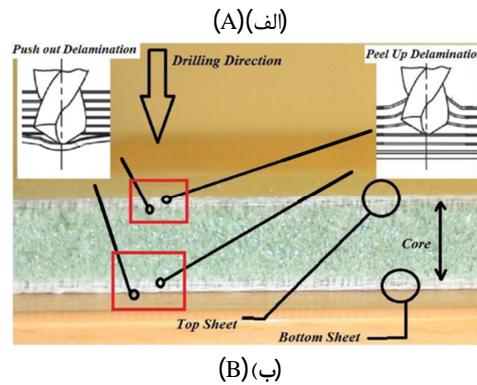


Fig. 1 (A) انواع عیوب موجود در یک سوراخ کامپوزیتی (B) محل‌های مختلف تورق در یک کامپوزیت ساندویچی [2]

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

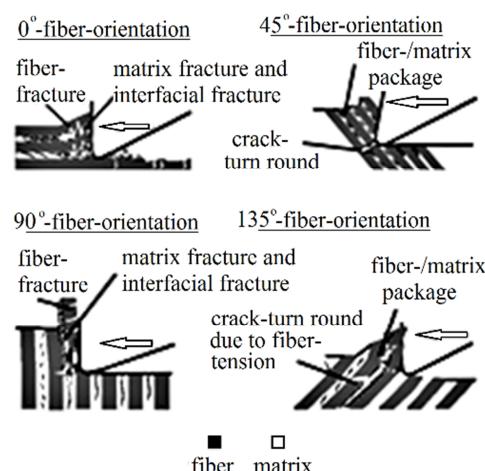


Fig. 2 شکست ماتریس بر اساس جهت گیری الیاف [3]

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 پارالیم 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 روی خود چسبیده

¹HSS
²TIN



Fig. 5 CNC milling machine (FP4ME)

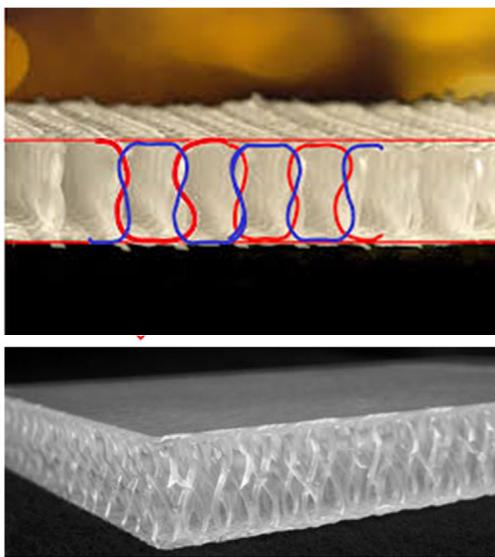


Fig. 3 Parabeam Composite view

شکل 3 نمای بافت کامپوزیت پارابیم



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 حداقل 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 بدهد شده و با مرتع فرار 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 تحریبی در سیستم، از دو تکرار استفاده گردید. با این کار قدرت آماری بیشتری (توانایی شناسایی اثرات کوچک) به دست می‌آید. پس کل آزمایش‌ها برابر $= 2^{3^3} = 54$ است. ترتیب انجام آزمایش‌ها کاملاً بصورت تصادفی شده¹ (CRD) بوده است. بدین ترتیب تخصیص هر عاملی که خارج از کنترل آزمونگر است (مثل مواد، انسان‌ها، ترتیب انجام آزمایش‌ها و غیره) بصورت تصادفی و مستقل از یکدیگر باشند. تصادفی‌سازی باعث میانگین‌گیری اثر عوامل خارجی و کاهش خطاهای سیستمی موجود در آزمایش می‌شود.



Fig. 4 3D composite during drilling

شکل 4 ورق کامپوزیتی 3D در حین سوراخ‌گاری

بعضی از پژوهش‌های صورت گرفته از قرار دادن قطر سوراخی به عنوان مرجع و محاسبه حداقل قطر در حالت تورق یا شکست ماتریس محاسبات خود را انجام داده‌اند، که روش مناسبی برای تورق یا شکست ماتریس و الیاف برش نخورده نیست. خوران و همکاران [2] برای محاسبه تورق و الیاف برش نخورده از مساحت نواحی مذکور به جای قطر قسمت معیوب استفاده کرده‌اند که دارای نتایج دقیق‌تری است. لذا در این مقاله به ارزیابی ترک خودگی ماتریس و الیاف برش نخورده در پنل‌های بافتی 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، به ترتیب ناحیه بین دایره مرجع (مته) و ناحیه آسیب داخلی و ناحیه بین دایره مرجع (مته) و ناحیه آسیب خارجی می‌باشند.

¹ Completely Randomized Design

جمع آوری 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، به منظور 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 فضای در مقاله صرف نظر 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 به عنوان کوچک‌ترین سطح معناداری که منجر به رد فرض صفر می‌شود، تعريف نمود. اگر مقدار عدد P عاملی کمتر از 0.05 باشد، نشان‌دهنده آن است که عامل مدنظر بر خروجی تحقیق تأثیر معناداری دارد.

جدول 3 تحلیل واریانس نتایج را برای MFF نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش‌روی تأثیر معناداری بر شکست ماتریس زمینه دارد. تأثیر قطر مته با کمی ا gammal اضافه 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 42.21 و 26.68 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 معناداری آن می‌باشد. تمام اثرات دوتایی و سه‌تایی معنادار می‌باشند. میزان مشارکت اثرات اصلی، تقابلی دوتایی و تقابلی سه‌تایی به ترتیب 25.79 و 33.71 و 18.52 درصد بوده است. بالاترین تأثیر را بین تک تک عوامل، اثر تقابلی سه‌تایی 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.

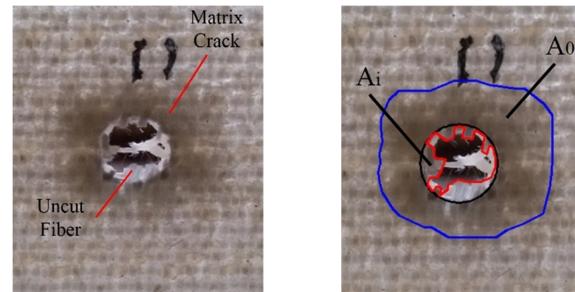
5-۱-۲-اثر قطر مته

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

جدول 1 طراحی آزمایش‌ها

Table 1 Design of experiments

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



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 کاملاً تصادفی اجرا گردیده است ولی برای کاهش فضای نتایج تکرار دوم در جدول 2 در ادامه تکرار اول آورده شده است.

5-نتایج و بحث

در سوراخ کاری 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. خصوصاً در هنگام ایجاد سوراخ به منظور 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.

5-۱- 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 مدنظر است. لذا در این پژوهش تلاش شده است تا با تحلیل واریانس و بحث بر روی نتایج آن، پارامترهای تأثیرگذار و درصد مشارکت آنها کاملاً مشخص و بیان شود. این تحلیل زمانی صادق و قابل اعتماد است که نرمال بودن توزیع داده‌ها، برای واریانس‌ها، گوسی بودن توزیع خطأ 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 عموماً 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

جدول 2 نتایج تجربی

Table 2 Experimental results

UCFF2	MFF2	UCFF1	MFF1	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

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 واردہ به الیاف و ماتریس می‌شود. از سوی دیگر با توجه به ثابت بودن پارامترهای سوراخ‌کاری (سرعت دورانی)، با افزایش قطر ابزار سرعت

مقدار آن کمترین مقدار ممکن و برای 7 میلی‌متر بیشترین مقدار می‌باشد. در حالیکه با افزایش قطر مته، فاکتور الیاف برش نخورده سیری کاملاً نزولی مدارد. به طور کلی می‌توان گفت برای سوراخ‌کاری پبل‌های 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

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%	

حاصل از سطوح یک عامل، به ازای تمام سطوح عامل دیگر یکسان نباشد. در چنین موقعی گفته می‌شود بین عوامل اثر متقابل وجود دارد، و بهطور کلی زمانیکه اثر متقابل بزرگ باشد، اثرات اصلی متناظر، اهمیت کمتری خواهد داشت. با توجه به شکل ۹ می‌توان فرمید که اثرات متقابل وجود دارد و از جدول تحلیل واریانس میزان این اثرات قابل تشخیص است. با بررسی جداول ۳ و ۴ می‌توان مشاهده کرد که مقدار P اثرات تقابلی دوتایی و سه تایی هر دو خروجی این تحقیق زیر ۰.۰۵ است که نشان دهنده وجود اثرات متقابل می‌باشد. لذا همان طور 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 ۹.۲۳ درصد، $N \times D$ دارای ۱۷.۵۸ درصد، $F \times D$ دارای ۲۰.۴ درصد و اثر متقابل سه تایی $N \times F \times D$ دارای ۱۲.۳۹ درصد مشارکت بوده‌اند. در نتیجه در بین اثرات متقابل، اثر تقابلی $F \times D$ بالاترین اثر را دارد. این اثر از شکل ۹ نیز کاملاً مشهود است. در بین اثرات تقابلی، مجموع اثرات تقابلی دوتایی با ۴۷.۲۱ درصد بیشترین تأثیر را بر MFF نسبت به اثرات اصلی و اثر تقابلی سه تایی دارد.

با بررسی اثر تقابلی $UCFF$ مشخص و مشهود است که اثرات تقابلی دوتایی $N \times F$ دارای ۶.۲۷ درصد، $D \times N$ دارای ۱۷.۶۱ درصد، $F \times D$ دارای ۹.۸۴ درصد و اثر تقابلی سه تایی $N \times F \times D$ دارای ۱۸.۵۲ 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 ۳۳.۷۱ درصد بیشترین تأثیر را بر $UCFF$ نسبت به اثرات اصلی و اثر تقابلی سه تایی دارد.

6- شرایط بهینه

اغلب مهندسان تمایل به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی 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 فرآیندی مانند سرعت دورانی، میزان تغذیه و قطر متنه 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^۱ نرمافزار مینی تب^۲ استفاده شده است. این نرمافزار از روش تابع مطلوبیت^۳ برای یافتن پاسخ استفاده می‌کند. مطلوبیت هر خروجی بصورت انفرادی^۴ 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 (۳) بدست می‌آید. در ابتدا مقدار هر پاسخ به عددی بین ۰ تا ۱ تبدیل می‌شود. میزان مطلوبیت همان نزدیک بودن پاسخ تکی هر عبارت بهینه‌سازی شده به جواب بهینه است.

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

با اعمال قیود لازم در نرمافزار و انجام محاسبات، نتایج در شکل ۱۰ آمده است. با توجه به نتایج قابل استخراج از نمودار همان‌طور که دیده می‌شود، پارامترهای بهینه برای سرعت دورانی، پیشروی و قطر متنه به ترتیب برابر 0.1 mm/rev ، 1750 rpm و 10 mm می‌باشد.

7- نتیجه‌گیری

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

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 متنه ۲.۵۲ درصد برای MFF و ۱۷.۱۷ درصد برای $UCFF$ بوده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر قطر متنه 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 برش نخورده دارد و رفتار آن برای هر دو عامل کاملاً یکسان است؛ اما با توجه به نتایج، می‌توان دریافت که با افزایش سرعت دورانی برای $UCFF$ و MFF 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 متنه 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 متنه به دلیل کاهش زمان سوراخ‌کاری و افزایش ارتعاشات عرضی ابزار، شکست ماتریس و الیاف برش نخورده رشد آهسته‌ای خواهد داشت. این رفتار دقیقاً مشابه رفتار کامپوزیت‌های ساندویچی دیگر است در حالی که در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های ورقه‌ای، با افزایش سرعت دورانی موارد مذکور تمایل به کاهش دارد [10, 4]. درصد مشارکت سرعت دورانی ۰.۳۴ و ۰.۰۲ 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 ۸ مشاهده می‌شود که اثر پیشروی قابل توجه‌تر از سرعت دورانی است. هر دو پارامتر سرعت دورانی و قطر متنه رفتار نسبتاً مشابه‌ای برای هر دو خروجی مورد مطالعه این مقاله داشته‌اند، در حالی که MFF و $UCFF$ به ترتیب در حداقل پیشروی و حداکثر پیشروی دارای کمترین مقدار خود هستند. حداکثر MFF و $UCFF$ در پیشروی مشاهده ۰.۰۶ mm/rev می‌شود. علت این رفتار را می‌توان اینگونه بیان کرد که در پیشروی کم، ابزار فرست 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 به علت نداشتن زمان کافی برای برش خوردن، پاره و کنده می‌شود. در نتیجه درصد الیاف برش نخورده بیشتر خواهد شد. درصد مشارکت پیشروی ۲۳.۸۳ درصد برای MFF و ۸.۴۲ 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

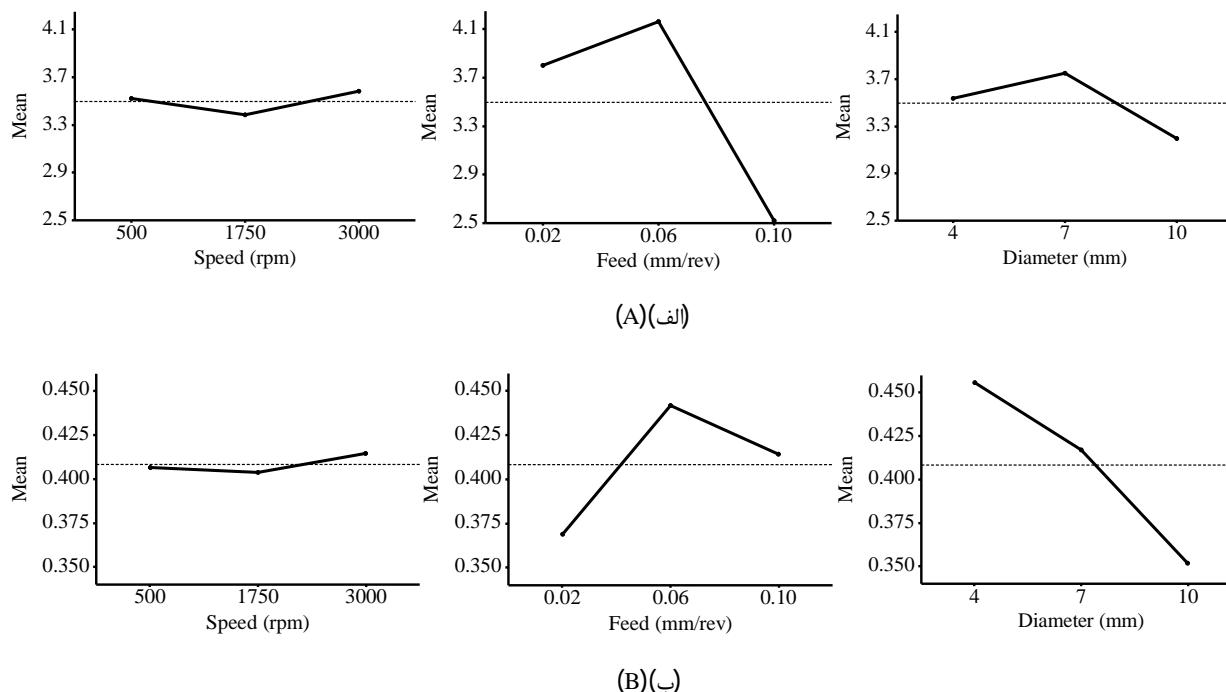


Fig. 8 Main effect plots for (A) MFF and (B) UCFF

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

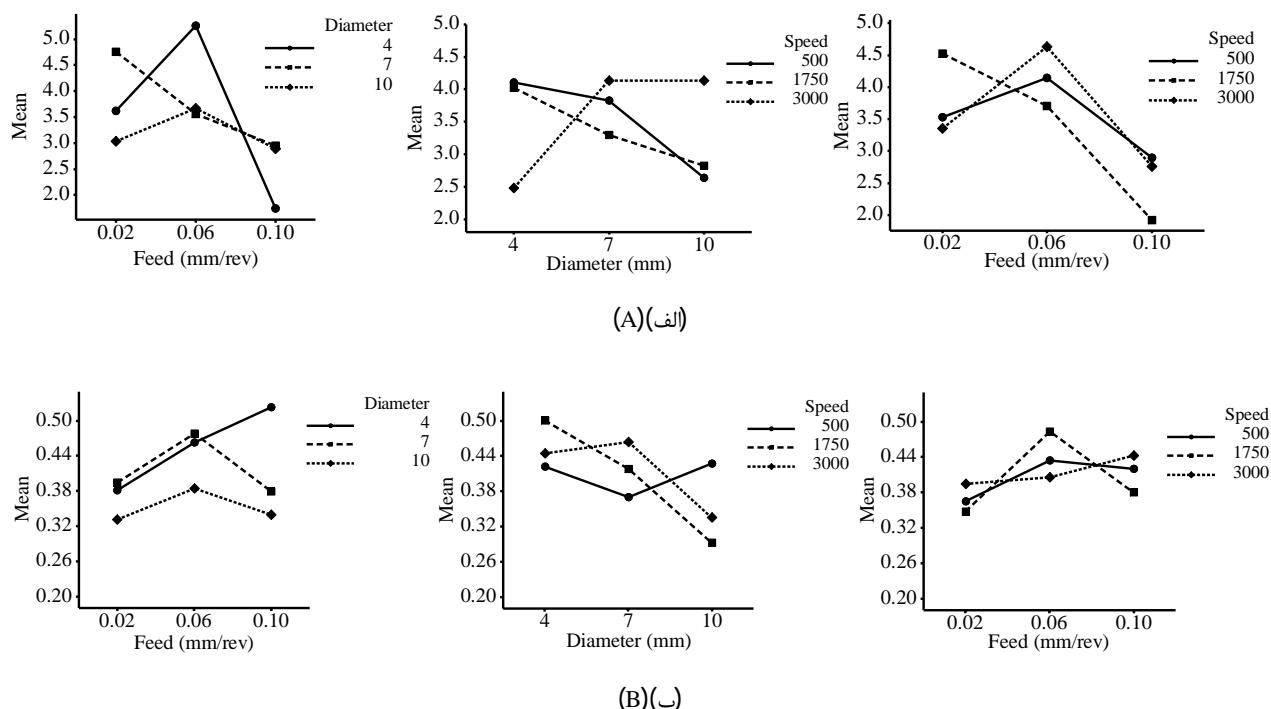


Fig. 9 Interaction plots for (A) MFF and (B) UCFF

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

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 سه تایی عوامل به ترتیب 33.71، 25.79 و 18.52 درصد بوده است و با افزایش قطر متنه کاهش می یابد.

اثر سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار بر کیفیت سوراخ های ایجاد شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. با توجه به داده های تجربی، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- میزان تغذیه (پیشروی) عاملی است که حداقل تأثیر را بر MFF داشته و بعد از آن قطر ابزار و سرعت دورانی به ترتیب بیشترین اثر را دارند. میزان مشارکت اثرات اصلی، اثرات تقابلی دوتایی و

-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. Beshart, Investigation of drilling composite sandwich structures, *International Journal Advance Manufacturing 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. Galiots, 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. Cadonin, R. Zitoune, P. Seifert, 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.

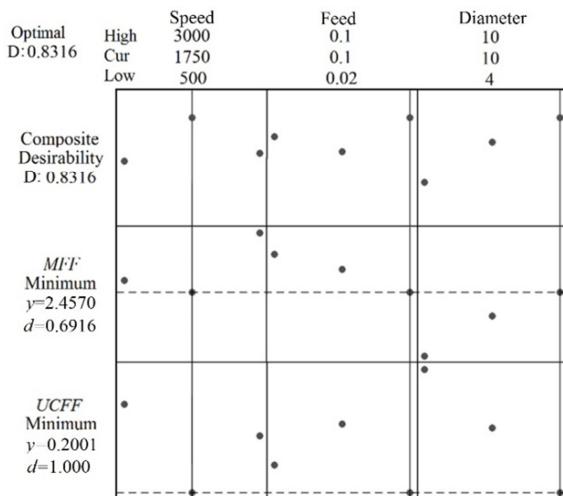


Fig. 10 Optimal Plot for MFF and UCFF

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

- نتایج نشان می دهند که MFF و UCFF با افزایش نرخ پیشروی
- ابتدا افزایش، و سپس کاهش می یابند.
- 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 متنه 10 میلی متر (سطح 3) حاصل می شود.
- بهترین کیفیت سوراخ بر اساس 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 متنه 10 میلی متر (سطح 3) حاصل می شود.
- با توجه به سطوح بهینه، سرعت دورانی 1750 دور بر دقیقه، پیشروی 0.1 میلی متر بر دور و قطر متنه 10 میلی متر برای حداقل کردن هر دو خروجی این پژوهش بصورت همزمان، معرفی گردید.