



بررسی تجربی تأثیر پارامترهای سوراخکاری لیزری بر زاویه مخروطی شدن و قطر سوراخ در چندلایه‌های الیاف-فلز آلومینیوم 5052 و الیاف شیشه

اردوان آناهید¹، محسن حامدی^{2*}

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-4563، mhamedi@ut.ac.ir

چکیده:

اطلاعات مقاله:

چندلایه‌های الیاف-فلز به خاطر شکل‌پذیری خوب، استحکام بالا و مقاومت خوب در برابر آسیب در در صنایع دریایی و هوافضا کاربرد گسترده‌ای دارند. سوراخکاری این قطعات با ابزار برشی جهت اتصال آن‌ها با پیچ و یا پرچ متداول است اما این روش سنتی با اعمال تنش‌های مکانیکی ممکن است به تورق، کشیدگی الیاف و تخریب ماتریس بینجامد. روش نوین سوراخکاری لیزری با پرهیز از ایجاد این عیوب، گسترش یافته است. پژوهش کنونی به دو عامل مهم کیفیت سوراخ یعنی زاویه مخروطی شدن و قطر سوراخ، در نمونه‌های 6/2 الیاف-فلز از آلومینیوم 5052-الیاف شیشه با رزین اپوکسی و پخت‌شده در دمای محیط می‌پردازد. لیزر مورد استفاده از نوع CO₂ با طول موج 10.64 میکرومتر و حداکثر توان 6 کیلووات است. با رویکرد طراحی آماری آزمایش‌ها شامل تحلیل واریانس و سه تکرار، در 64 آزمون، تأثیر پارامترهای فرآیند شامل توان لیزر، فشار گاز کمکی و سرعت پیشروی بر زاویه مخروطی شدن دیواره سوراخ و تغییرات اندازه قطر بررسی شد. مشخص شد که توان لیزر بیشترین تأثیر را بر زاویه مخروطی شدن و تغییرات قطر سوراخ داشته و پس از آن اثر تعاملی دوگانه توان لیزر-فشار گاز کمکی و سپس فشار گاز کمکی و سرعت پیشروی قرار می‌گیرند. کمترین مقدار زاویه مخروطی شدن با توان 3 کیلووات، فشار گاز کمکی 10 بار و سرعت پیشروی 7600 میلی متر بر دقیقه به دست آمد. کمترین تغییرات اندازه قطر سوراخ نیز با توان 2.5 کیلووات، فشار گاز 6 بار و دور 7600 حاصل شد. این نتایج برای صنایع استفاده کننده از چندلایه‌های الیاف-آلومینیوم-الیاف شیشه کاربرد دارد.

دریافت: 1404/08/08

پذیرش: 1404/09/17

کلیدواژگان

زاویه مخروطی شدن سوراخ، سوراخکاری لیزری، کامپوزیت الیاف-فلز آلومینیوم، رزین اپوکسی

Experimental study on the effect of laser drilling parameters on hole taper angle and diameter in Aluminum 5052 and glass fiber FML composites

Ardavan Anahid¹, Mohsen Hamedi^{1*}

1 - School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* Tehran, P.O. Box 11155-4563, mhamedi@ut.ac.ir

Keywords

Tapered angle of hole,
Kerf,
Laser Cutting,
FML,
Epoxy Resin

Abstract

Fiber-metal laminates (FMLs) are increasingly utilized in marine and aerospace applications due to their favorable formability, high strength, and robust damage tolerance. Mechanical drilling, commonly used for fastening these components with bolts or rivets, often induces delamination and structural degradation due to tool-induced stresses. Laser drilling has emerged as a promising alternative, minimizing such defects. This study evaluates two critical quality metrics—hole taper angle and diameter variation—in laser-drilled specimens composed of aluminum 5052 and glass fiber-reinforced epoxy resin cured at ambient temperature. A CO₂ laser with a wavelength of 10.64 μm and a maximum power of 6 kW was employed. Using a statistically designed experimental framework (ANOVA with three replicates across 64 trials), the effects of laser power, assist gas pressure, and feed rate on hole geometry were systematically analyzed. Results indicate that laser power exerts the most significant influence on both taper angle and diameter variation, followed by the interaction between laser power and gas pressure, and then gas pressure and feed rate. Optimal conditions for minimal taper angle (3 kW power, 10 bar gas pressure, 7600 mm/min feed rate) and minimal diameter variation (2.5 kW power, 6 bar gas pressure, 7600 mm/min feed rate) were identified. These findings offer direct applicability for industries employing aluminum-glass fiber composite components.

Please cite this article using:

Anahid, A., Hamedi, M., "Experimental study on the effect of laser drilling parameters on hole taper angle and diameter in Aluminum 5052 and glass fiber FML composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 2, pp. 2768-2777, 2026.
https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2073334.1938

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

چندلایه‌های الیاف-فلز¹ تشکیل شده از لایه‌های برهم نهاده شده فلز و پلیمر و تقویت‌شده با الیاف، به دلیل مقاومت بالا در برابر آسیب، استحکام ویژه بالا و دوام خستگی مطلوب، در صنایع هوافضا، دریایی و خودروسازی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند [1]. در میان انواع مختلف ساختارها، چندلایه‌های الیاف-فلز تشکیل شده از ترکیب آلومینیوم و الیاف شیشه گزینه مقرون به‌صرفه‌ای برای سازه‌هایی که در آن‌ها وزن و دوام اهمیت دارند، تشخیص داده شده است.

پیشرفت‌های اخیر در حوزه ساختارهای چندلایه الیاف-فلز موجب گسترش کاربرد آن‌ها در صنایع هوافضا، خودروسازی و دفاعی شده و زمینه‌ساز تحقیقات متنوعی در خصوص رفتار مکانیکی، فرایندهای ساخت و مونتاژ و کنترل کیفیت این مواد شده است. در این راستا، پژوهش شماره [2] به بررسی نفوذ ضربه‌ای در ساختارهای آلومینیوم-الیاف شیشه² و تأثیر ترتیب لایه‌های آلومینیومی بر مقاومت ضربه‌ای پرداخته است. همچنین اهمیت روش‌های بازرسی برای کنترل کیفیت ساختارهای مورد استفاده در صنایع هوافضا نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [3].

تعامل لیزر فرابنفش با کامپوزیت‌های پیک تقویت‌شده با الیاف کربن نیز مورد تحقیق قرار گرفته است [4]. ضمناً تنش‌های پسماند در فرآیند سوراخکاری چندلایه‌های الیاف-فلز نیز محاسبه شده است [5]. رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با ساختارهای الیاف-فلز تحت شرایط مرزی آزاد و پیچیدگی سازه‌ای این ترکیبات برجسته شده است [6]. در پژوهش مروری [7] به‌صورت جامعی فرآیند تولید تا پردازش پایدار این ساختارها بررسی شده است. در حوزه ماشین‌کاری لیزری کامپوزیت‌ها نیز توجه فزاینده‌ای مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که رویکرد بهینه‌سازی سوراخکاری لیزری نانوآئینه‌ای در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن بررسی شده است [8]. ضمناً بررسی سایش و کیفیت سطح در فرزکاری کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی تقویت شده با ذرات نیز مورد بررسی قرار گرفته است [9]. مرورهای ارائه‌شده در منابع [10-11]، نقش پارامترهای لیزر در کیفیت سطح و برش در زیرلایه‌های فلزی و کامپوزیتی را تحلیل کرده‌اند. همچنین، پژوهش‌های مرتبط با شیمی سطح آلومینیوم و فرایندهای اتصال‌دهی نیز به اطلاعات ارزشمندی درباره سازوکارهای چسبندگی در ناحیه اتصال فلز-کامپوزیت منجر شده است [12-15]. در پژوهشی دیگر با مدل‌سازی فرآیند برش چندمرحله‌ای لیزری در کامپوزیت‌های الیاف طبیعی، بر ضرورت کنترل دقیق پارامترهای فرآیندی در سیستم‌های ترکیبی تأکید شده است [16]. همچنین تأثیر روش‌های متفاوت عملیات روی سطح بر رفتار شکست پیوندهای چسبی کامپوزیت-آلومینیوم نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [17]. مجموعه این مطالعات، پایه‌ای برای درک تعامل میان فرآیند لیزری، معماری لایه‌ای و رفتار ناحیه اتصال فراهم می‌سازد. از آنجا که پژوهش حاضر به سوراخکاری چندلایه‌های الیاف-فلز اختصاص دارد ذکر ضرورت این پژوهش و بررسی پیشینه پژوهش‌های مرتبط ضروری است. روش متداول ایجاد سوراخ برای اتصال در این نوع قطعات، سوراخکاری مکانیکی است [18]. با این حال، فرایندهای سنتی سوراخکاری اغلب با وارد ساختن تنش‌های مکانیکی به ایجاد تورق، کشیدگی الیاف و ترک‌خوردگی ماتریس، به‌ویژه در ناحیه تماس بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی، منجر می‌شوند. برای رفع این مشکلات، روش‌های ماشین‌کاری غیرسنتی مانند سوراخکاری با کمک فراصوت، ماشین‌کاری با جت آب ساینده و سوراخکاری لیزری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که سوراخکاری لیزری می‌تواند سوراخ‌هایی با کیفیت بالاتر و آسیب مکانیکی کمتر در چندلایه‌های الیاف-فلز ایجاد کند. به‌عنوان مثال، سوراخکاری فراصوتی در لایه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه باعث کاهش نیروی پیشروی شده اما بهبود قابل‌توجهی در کیفیت سطح ایجاد نکرده است [19]. مرور

مطالعات موجود در زمینه ماشین‌کاری غیرسنتی نیز نشان می‌دهد که سوراخکاری لیزری گزینه‌ای نویدبخش است، اما داده‌های تجربی دقیق و چارچوب‌های بهینه‌سازی آماری در این حوزه محدود هستند [20]. همچنین، بیشتر تحقیقات موجود بر روی ساختارهایی با آلومینیوم نوع خاص و رزین‌های پخت‌شده در دمای بالا تمرکز داشته‌اند و توجه کمی به الیاف‌های جایگزین آلومینیوم یا کامپوزیت‌های پخت‌شده در دمای محیط شده است. حفظ یکنواختی قطر سوراخ در فرآیند سوراخکاری لیزری مواد کامپوزیتی، به‌ویژه در ساختارهای چندلایه الیاف-فلز، نقش حیاتی در تضمین یکپارچگی سازه‌ای، مقاومت در برابر خستگی و عملکرد مطمئن اتصال‌دهنده‌ها دارد. در سیستم‌های ترکیبی مانند آلومینیوم-الیاف شیشه، تغییرات قطر می‌تواند منجر به توزیع نامتعادل تنش در میان لایه‌ها شده و باعث تورق موضعی یا ترک‌خوردگی در ناحیه تماس فلز و کامپوزیت شود. یکنواختی هندسی سوراخ به‌ویژه در کاربردهای هوافضا اهمیت دارد، جایی که تolerانس‌های ابعادی دقیق برای جلوگیری از لقی، شل‌شدگی ناشی از ارتعاش و تمرکز تنش در اطراف اتصال‌ها ضروری است. مطالعات مروری نشان می‌دهند که دقت ابعادی، از جمله یکنواختی قطر، یکی از عوامل کلیدی در عملکرد مکانیکی و دوام بلندمدت قطعات کامپوزیتی است، به‌ویژه زمانی که سوراخ‌ها برای اتصال پیچ یا پرچ استفاده می‌شوند [20].

با این حال، بسیاری از پژوهش‌ها تمرکز خود را بر زبری سطح یا میزان لایه لایه شدن قرار داده‌اند و تأثیر تغییرات قطر در فرایندهای لیزری کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. این خلأ پژوهشی، نیاز به کنترل پارامتری و بهینه‌سازی آماری برای دستیابی به سوراخ‌هایی با کیفیت بالا و قابل تکرار در ساختارهای ترکیبی فلز-کامپوزیت را برجسته می‌سازد. در مطالعات پیشین پیرامون سوراخکاری لیزری مواد کامپوزیتی، تمرکز عمده بر کیفیت سطح، ناحیه متأثر از حرارت و میزان تورق بوده است، در حالی که یکنواختی قطر سوراخ کمتر به‌صورت کمی بررسی شده است. به‌عنوان نمونه، پژوهش [21] به بررسی جامع تأثیر پارامترهای لیزر دی‌اکسیدکربن بر کیفیت سطح و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداخته است. این پژوهش با استفاده از طراحی کامل آزمایش‌ها و تحلیل واریانس، شاخص‌هایی مانند زبری سطح، زاویه مخروطی شدن و استحکام کششی را بهینه‌سازی کرده است. با این حال، ساختار مورد بررسی در آن مطالعه از نوع الیاف شیشه بوده و فاقد لایه‌های فلزی است.

از سوی دیگر، در سوراخکاری قطعات با لیزر پدیده‌ای به نام مخروطی شدن دیواره سوراخ وجود دارد که در کامپوزیت‌ها نیز این امر وجود دارد. زاویه مخروطی شدن در این عملیات مهم است زیرا باعث می‌شود قطر ورودی و خروجی سوراخ یکسان نباشد که این موضوع در هنگام مونتاژ قطعات یا اتصالات پیچی، می‌تواند به ایجاد لقی و کاهش استحکام اتصال منجر شود. همچنین، زاویه مخروطی زیاد نقش مهمی در تمرکز تنش و لایه‌ای شدن یا تورق در لایه‌های کامپوزیتی در اطراف سوراخ دارد که امکان آغاز خرابی را افزایش می‌دهد [21-22]. در طراحی قطعات پیشرفته، به‌ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی که تolerانس ابعادی اهمیت بالایی دارد، افزایش غیراستاندارد این زاویه می‌تواند استانداردهای کیفی محصول و یکپارچگی سازه در طول عمر محصول را به خطر اندازد [23]. در بسیاری موارد افزایش زاویه مخروطی شدن سوراخ در هنگام سوراخکاری با لیزر نشانگر نامناسب بودن پارامترهای فرآیند در سوراخکاری و برشکاری لیزری است [24].

در انتها با بررسی پژوهش‌های منتشرشده، مشخص گردید چند خلأ پژوهشی مهم وجود دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. نخست، مطالعات اندکی به بررسی سوراخکاری لیزری در ترکیب آلومینیوم 5052 و رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه پخت شده در دمای محیط، پرداخته‌اند؛ ترکیبی که از نظر صنعتی و اقتصادی به خصوص در محیط‌های خورنده بسیار سودمند است. دوم، در حالی که برخی

² Glass Fiber Reinforced Polymer

¹ FML: Fiber Metal Laminate

کمک پیچ‌های متعددی که دور تا دور آن وجود دارد به یکدیگر محکم شده و لایه‌های آلومینیوم و پارچه الیاف شیشه در بین دو قسمت قالب کاملاً فشرده شده و به ضخامت 2.8 میلی‌متر تا 3 میلی‌متر می‌رسد.

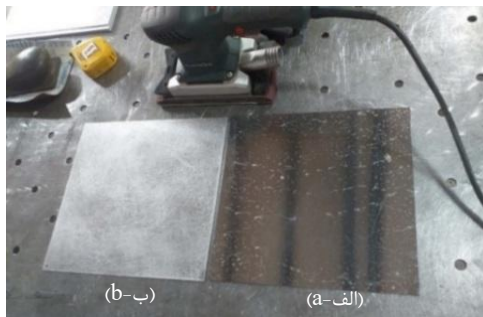


Fig. 1 Two cut aluminum sheet specimens of 5052 alloy; a) Smooth and polished. b) Rough and sanded.

شکل 1 دو نمونه ورق آلومینیوم برش خورده الیاف 5052: الف) صاف و صیقلی. ب) زبر و سمباده خورده.

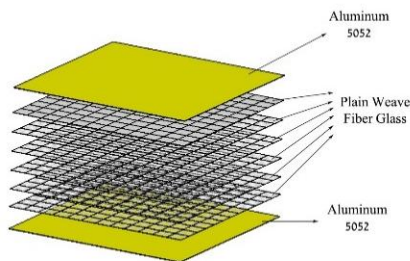


Fig. 2 Laminates stacking sequence

شکل 2 چیدمان لایه‌های فلز و الیاف بافته شده



Fig. 3 Tools and materials used for hand lay-up.

شکل 3 لوازم و مواد مورد استفاده برای لایه چینی دستی.

برای اینکه مواد داخل قالب بیش از حد فشرده نشود و تمام رزین از داخل لایه‌ها خارج نشود، اسپیسرهایی به ضخامت 2.8 میلی‌متر در بین دو کفه قالب قرار گرفته است تا ضخامت کامپوزیت کمتر از 2.8 میلی‌متر نشود. قطعه کامپوزیتی بعد از پخت به علت سرازیر شدن اضافات رزین به شدت به قالب فولادی می‌چسبد و تمیز کردن قالب و جدا نمودن قطعه از قالب کار دشواری است. لذا برای رفع این مشکل از ورقه‌های پلی‌آمیدی با ضخامت 30 میلی‌متر برای ساخت قالب استفاده شد. در شکل 4، قطعه پخته شده بعد از 24 ساعت تحت فشار بودن در قالب فولادی و در شکل 5 قطعه پخته شده بعد از 24 ساعت تحت فشار بودن در قالب پلی‌آمیدی مشاهده می‌شود.

مطالعات به مشاهدات کیفی از کیفیت سوراخ پرداخته‌اند، ارزیابی کمی شاخص‌هایی مانند زاویه مخروطی شدن و تغییرات قطر سوراخ که برای طراحی درست اتصالات و عملکرد بالا در خستگی ضروری هستند، به ندرت انجام شده است. سوم، فقدان طراحی آماری آزمایش‌ها برای بررسی اثرات تعاملی پارامترهای کلیدی فرآیند مانند توان لیزر، فشار گاز کمکی و سرعت پیشروی مشهود است. در این پژوهش بررسی تجربی زاویه مخروطی شدن و قطر سوراخ در سطح رویی ماده در هنگام سوراخکاری با تغییرات پارامتر لیزر CO₂ مدنظر قرار گرفته است. از رویکرد طراحی آماری آزمایش‌ها با طرح عاملی کامل و تحلیل واریانس استفاده می‌شود تا از طریق ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تأثیر سه عامل توان لیزر، فشار گاز کمکی و پیشروی و اثرات تعاملی این پارامترها بر زاویه مخروطی شدن و قطر سوراخ را بررسی و تحلیل شود.

2- مواد و روش

2-1- ساخت کامپوزیت آلومینیوم - شیشه

نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش‌های این پژوهش از کامپوزیت آلومینیوم با ترکیب لایه‌های الیاف شیشه بافته شده با دانسیته 300 گرم بر متر مربع و ورق آلومینیوم الیاف 5052 به ضخامت 0.5 میلی‌متر ساخته شده است. به روش لایه چینی دستی، 6 لایه پارچه الیاف شیشه بافته شده¹ در بین دو قطعه ورق آلومینیوم به ابعاد 250 میلی‌متر در 250 میلی‌متر در زیر و روی پارچه‌ها، به پیکربندی ماده خام مورد نظر به ضخامت 2.8 تا 3 میلی‌متر منجر شده است. برای ساخت این نوع کامپوزیت نیاز به نوع خاصی از رزین اپوکسی دو جزئی است که قابلیت چسبندگی به سطح آلومینیوم را داشته باشد. رزین اپوکسی دو جزئی دارای سخت کننده می‌باشد که برای فرایند پخت ضروری است. رزین مورد استفاده از نوع رزین اپوکسی سیکومین 1280 با کد SD4775 و سخت کننده مخصوص آن است که طبق دستورالعمل سازنده سخت کننده باید 27% وزنی ترکیب را تشکیل دهد. یکی دیگر از مواد اصلی نمونه مورد بررسی، فلز آلومینیوم است که سطح آن به سرعت اکسید می‌شود و یک لایه محافظ روی آن تشکیل می‌شود. این لایه محافظ باعث می‌شود که سطح آلومینیوم، در تماس با رزین چسبندگی مناسب را نداشته باشد و مانع چسبندگی سطحی مناسب در مواجهه با انواع چسب‌ها و رزین‌ها می‌شود. بنابراین در ابتدا باید سطح صاف و صیقلی ورق آلومینیوم را به کمک سمباده زنی به حالت زبر تغییر داده و بعد از آن برای چسبندگی سطحی بهتر، سطح مورد نظر باید کروماته شود [16-25]. در شکل 1 دو قطعه ورق آلومینیوم 5052 به ضخامت 0.5 میلی‌متر مشاهده می‌شود که قبل از کروماته شدن به خوبی سطح آن زبر شده است. ورق آلومینیوم (الف-ا) دارای سطح صیقلی بوده و (ب-ب) به کمک دستگاه سمباده و بیره و سمباده 200 کاملاً زبر شده است. بعد از سمباده زنی، سطوح آلومینیوم اچ شده و کروماته زرد (آلوداین) می‌شوند تا از اکسیداسیون مجدد جلوگیری شود و خاصیت چسبندگی به رزین بهبود یابد. در صنعت، کروماته زرد برای چسبندگی رنگ و چسب به سطح آلومینیوم بیشتر مرسوم است [25].

پارچه بافته شده 0/90 از نوع الیاف شیشه نیز با قیچی به مقدار مورد نیاز به همان ابعاد ورق آلومینیوم برش زده شد و آماده برای لایه چینی دستی گردید. در شکل 2 چیدمان لایه‌ها نشان داده شده است.

رزین و سخت کننده به نسبت توصیه شده توسط سازنده، ترکیب شده و از زمان ترکیب آن‌ها تقریباً 30 دقیقه فرصت استفاده از رزین می‌باشد و بعد از آن، ترکیب رزین و سخت کننده شروع به سفت شدن و گرم‌زایی می‌نماید. در هنگام لایه چینی دستی استفاده از ماسک، دستکش و عینک ایمنی الزامی است. در شکل 3 لوازم و مواد مورد استفاده برای لایه چینی دستی در داخل کارگاه و قالب فولادی اولیه برای اعمال فشار به لایه‌های کامپوزیت مشاهده می‌شود. دو قسمت زیرین و رویی قالب فولادی به

¹ Plain weave

2-2- سوراخکاری با لیزر

الگوی برش برای انجام آزمایش به نحوی آماده شد که بتوان برای سه عامل توان لیزر، فشار گاز کمکی و سرعت پیشروی هر یک با سه سطح و سه تکرار برای هر سطح، یک آزمایش عاملی کامل برای تحلیل واریانس تدارک دید. در مجموع 81 سوراخ برای این طرح آزمایشی بر روی قطعات کامپوزیتی توسط لیزر سوراخکاری شد به نحوی که هر قطعه از سه قطعه مربعی شکل 250 میلی متری با یک توان منحصر به فرد بریده شد و تمام حالات تنظیمات سه سطح فشار گاز کمکی و سه سطح سرعت پیشروی برای سوراخکاری روی آن قطعه اجرا شد. در شکل 8 الگوی برشکاری با لیزر و تمامی حالات آزمایش و تنظیمات برش مشاهده می شود. در شکل 9 قطعه شماره 3 در الگوی برش، نمایش داده شده است. همانطور که در الگوی برش مشخص است توان لیزر برای سوراخکاری این قطعه 2.5 کیلووات بوده و پارامترهای فشار گاز کمکی (نیترژن) و سرعت پیشروی در سه سطح تغییر کرده اند و با هر سطح از تنظیمات، سه تکرار یا سه سوراخ زده شده است. همچنین برای اینکه اپراتور برشکاری، قطعه را دقیقاً در جهتی که در نقشه برش تعیین شده است، روی میز دستگاه قرار دهد و پارامترهای دستگاه را مطابق الگوی برش تنظیم نماید، روی نقشه برش و قطعه کامپوزیتی یک سوراخ کوچک در گوشه قطعه زده شده است تا بعد از برشکاری از خطاهای احتمالی در ثبت نتایج جلوگیری شود.

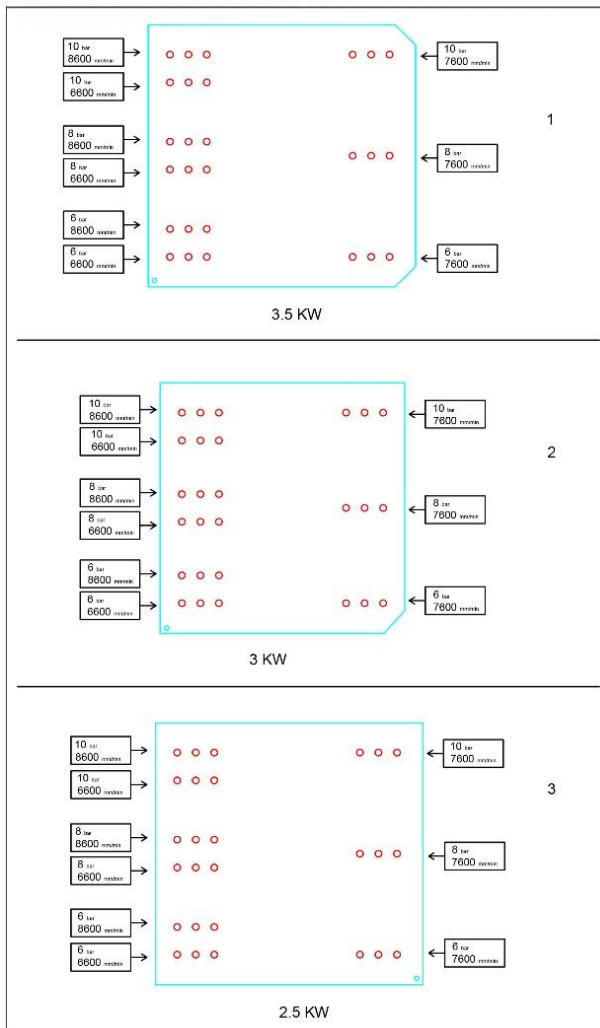


Fig. 8 The drilling pattern and all of the laser drilling setup configurations for conducting the experiment.

شکل 8 الگوی سوراخکاری و تمام حالات تنظیمات سوراخکاری با لیزر برای اجرای آزمایش.

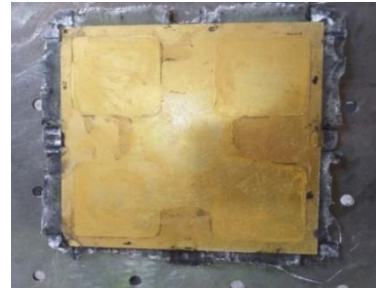


Fig. 4 The cured part in the steel mold in room temperature.

شکل 4 قطعه پخته شده در قالب فولادی در دمای اتاق.

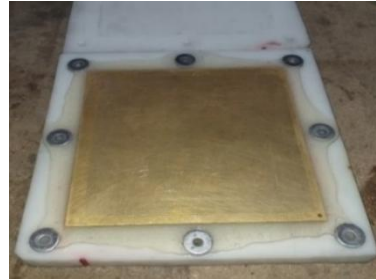


Fig. 5 The cured part in the polyamide mold in room temperature.

شکل 5 قطعه پخته شده در قالب پلی آمیدی در دمای اتاق.

همچنین در شکل 6 کیفیت ظاهری دو قطعه کامپوزیتی پخته شده در قالب فولادی و پلی آمیدی قابل مشاهده است. شکل (الف) قطعه را در قالب فولادی، و شکل (ب) قطعه را در قالب پلی آمیدی که هر دو تحت فشار مکانیکی پخت شده اند نشان می دهد. در شکل 7 شماتیک قالب پلی آمیدی با پشت بند فولادی و همچنین دو لایه ورق آلومینیوم و شش لایه پارچه بافته شده ایاف شیشه در بین آن نمایش داده شده است.

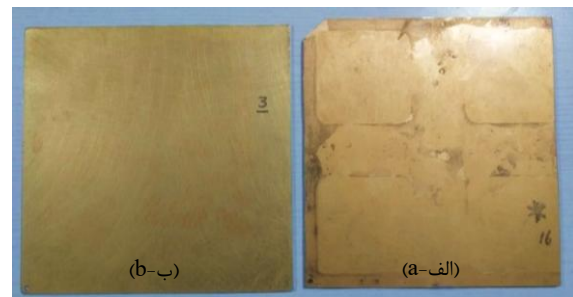


Fig. 6 The visual difference between the two manufactured parts; a) Cured in the steel mold. b) Cured in the Polyamide molds.

شکل 6 تفاوت ظاهری بین دو قطعه: (الف) پخته شده در قالب فولادی. (ب) پخته شده در پلی آمیدی.

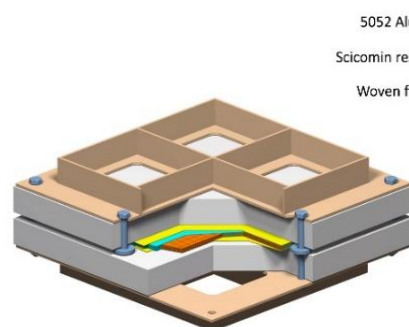


Fig. 7 Schematic of the polyamide mold with a steel backing plate.

شکل 7 شماتیک قالب پلی آمیدی با پشت بند فولادی.

3-2- انتخاب روش مناسب تصویربرداری

در ابتدا گمان می‌رفت که به روش لایه‌نگاری و همچنین روش تصویربرداری با اشعه ایکس و آشکارساز دیجیتالی با قدرت تفکیک میکرونی می‌توان اطلاعات مورد نظر را برداشت نمود. اما بعد از تصویربرداری به هر دو روش و بررسی دقیق عکس‌ها، نتیجه گرفته شد که این نوع تصویربرداری علاوه بر حجم زیاد تصاویر و هزینه بالای آن، نتایج مطلوبی برای ادامه آزمایش ارائه نمی‌دهد. در تصویربرداری به روش میکروسیستی از نمونه در سه راستای طولی، عرضی و محوری عکس‌های متعدد و فراوانی به کمک اشعه ایکس گرفته می‌شود و بعد از بازسازی تصاویر دستگاه، در هر راستا تعداد زیادی تصویر در مقاطع به فواصل یکسان، استخراج می‌شود.

در شکل 11 تصویر خروجی نمونه سوراخکاری شده با توان 3.5 کیلو وات، فشار گاز کمکی 6 بار و سرعت پیشروی 6600 میلی‌متر بر دقیقه به کمک دستگاه میکروسیستی مشاهده می‌شود. در تصویربرداری دقیق با اشعه ایکس که به میکروسیستی نیز معروف است عکس‌های خروجی در برخی حالات به بیش از هزار عدد می‌رسد که بررسی آن‌ها بسیار زمان نیاز دارد. مزیت استفاده از این روش، عدم تخریب نمونه بود اما تصاویر خروجی مطلوب نبوده و در تمامی آن‌ها به دلیل وجود آلومینیوم آرتیفکت مشاهده شده در نتیجه نواحی اطراف سوراخ قابل ارزیابی نبود.

در شکل 12 تصویربرداری با اشعه ایکس از همان نمونه به روش لایه‌نگاری مشاهده می‌شود که در اینجا آرتیفکت مشاهده نشده اما وضوح تصاویر خروجی مطلوب نبوده در نتیجه تصاویر قابل ارزیابی نبودند.

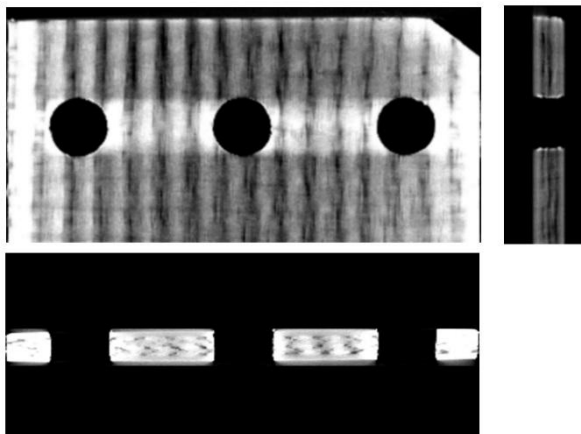


Fig. 11 Output images from the micro-CT imaging device.

شکل 11 تصاویر خروجی از دستگاه تصویربرداری به روش میکروسیستی.

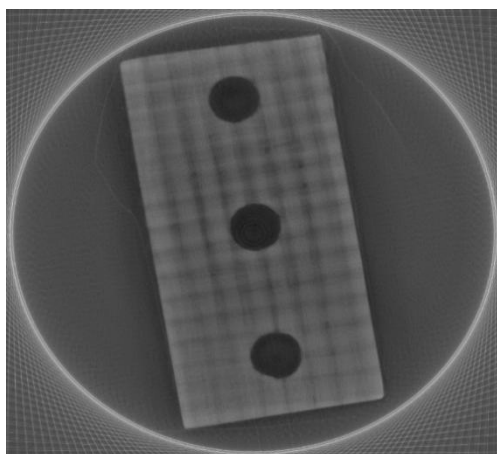


Fig. 12 Output image from the laminography imaging device.

شکل 12 تصویر خروجی دستگاه تصویربرداری به روش لایه‌نگاری.

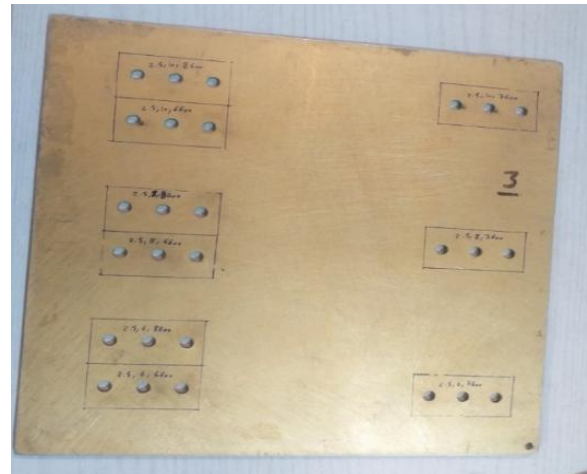


Fig. 9 laser drilled part 3 in cutting pattern.

شکل 9 اجرای سوراخکاری قطعه شماره 3 از الگوی برش با لیزر.

در جدول 1 مشخصات اشعه لیزر مورد استفاده برای اجرای آزمایش، نشان داده شده است. در جدول 2 تعداد عوامل و سطوح آن برای بررسی زاویه مخروطی شدن تغییرات قطر سوراخ به کمک جدول تحلیل واریانس نمایش داده شده است.

جدول 1 مشخصات لیزر مورد استفاده برای سوراخکاری

Table 1 The specifications of the laser used for drilling

نوع لیزر	طول موج	حداکثر توان لیزر
طول موج پیوسته - CO ₂	10.64 میکرومتر	6 کیلو وات

جدول 2 طرح آزمایش عاملی کامل و سطوح آن

Table 2 Factors and Levels

عامل	سطح 1	سطح 2	سطح 3
توان لیزر (kw)	2.5	3	3.5
فشار گاز کمکی نیتروژن (bar)	6	8	10
پیشروی (mm/min)	6600	7600	7600

این آزمایش‌ها برای تعیین عوامل مؤثر بر زاویه مخروطی شدن و قطر سوراخ طراحی شده است. برای بررسی ناحیه اطراف سوراخ‌ها ابتدا بر سه قطعه کامپوزیتی بزرگ به ابعاد 250 میلی‌متر به قطعات کوچک‌تر مستطیلی تقسیم شده به نحوی که هر سه سوراخ که با یک تنظیمات منحصر به فرد سوراخکاری شده بودند در یک مستطیل کوچک به ابعاد 25 میلی‌متر در 50 میلی‌متر قرار گرفته تا برای تصویربرداری آماده شود. در شکل 10 یک نمونه از این تقسیم‌بندی‌ها نمایش داده شده است.



Fig. 10 Classification of the specimens into suitable dimension for imaging.

شکل 10 تقسیم‌بندی نمونه‌ها در ابعاد مناسب برای تصویربرداری.

3- نتایج و بحث

3-1- زاویه مخروطی شدن سوراخ

مقطع نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی عکس‌برداری شدند و هر سوراخ با بزرگنمایی‌های 20، 30 و 60 عکس‌برداری شده و مورد بررسی قرار گرفت. زاویه دیواره سوراخ با سطح افقی ماده به کمک نرم‌افزار ImageJ اندازه‌برداری می‌شود تا بتوان پارامترهای تأثیرگذار بر متغیر پاسخ را مشخص نمود. در شکل 15 تصویر مقطع سوراخ نمونه‌ای که با توان 2.5 کیلووات، فشار گاز کمکی 6 بار و پیشروی 8600 میلی‌متر بر دقیقه بریده شده، به همراه زاویه دیواره سوراخ، نمایش داده شده است. در شکل 16 تصویر سمت چپ همین سوراخ مشخص می‌باشد و زاویه دیواره سوراخ با سطح افقی ماده نیز مشخص شده است.

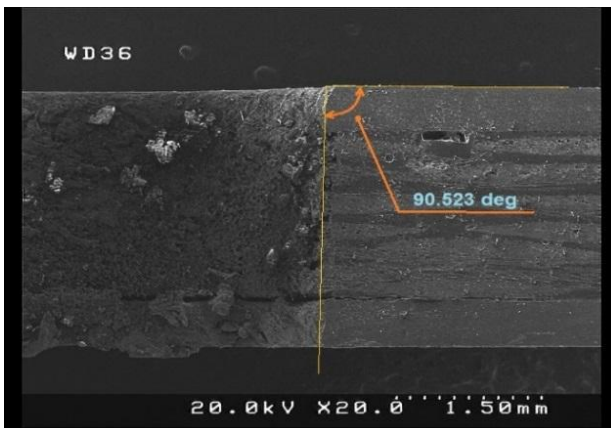


Fig. 15 the right side of the cross-section of a hole cut at a power of 2.5 kW, with an assist gas pressure of 6 bar and a feed rate of 8600 mm/min.

شکل 15 تصویر سمت راست مقطع سوراخی که با توان 2.5 kW و فشار گاز کمکی 6 بار و پیشروی 8600 mm/min بریده شده است.

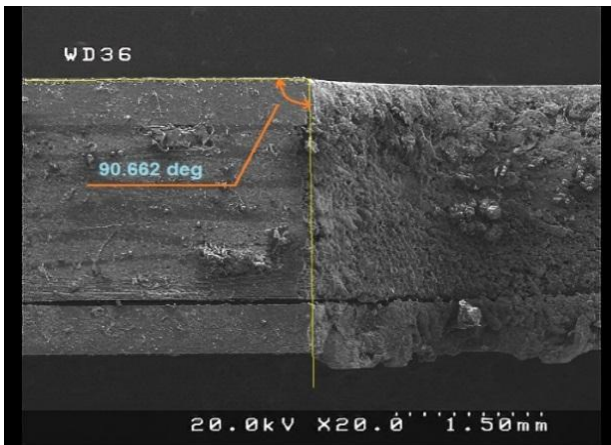


Fig. 16 the left side of the cross-section of a hole cut at a power of 2.5 kW, with an assist gas pressure of 6 bar and a feed rate of 8600 mm/min.

شکل 16 تصویر سمت چپ مقطع سوراخی که با توان 2.5 kW و فشار گاز کمکی 6 بار و پیشروی 8600 mm/min بریده شده است.

با مقایسه دو شکل 15 و 16 با یکدیگر، مشاهده می‌شود که زاویه‌های مخروطی شدن حدوداً 0.1 درجه با یکدیگر اختلاف دارند که می‌تواند به علت خطاهای اندازه‌گیری و یا ناهمگن بودن ماده یا متغیر بودن ضخامت آن باشد. همچنین نحوه مقطع زدن نمونه‌ها نیز می‌تواند تا حدودی روی این اختلاف تأثیرگذار باشد. برای تعیین میزان زاویه مخروطی شدن این سوراخ، میانگین هر دو زاویه سمت چپ و راست

روش دیگری که برای تصویربرداری از نمونه‌ها برای مشاهده نواحی متأثر از حرارت و زاویه مخروطی شدن مقطع برش مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌باشد. در این مطالعه به منظور بررسی زاویه مخروطی شدن و تغییرات قطر سوراخ نیاز به تخریب نمونه‌ها، برش آن‌ها از خط طولی گذرنده از مراکز سوراخها و صیقلی نمودن مقطع برش خورده می‌باشد. در شکل 13 دو نمونه برش خورده حالت عمودی (الف-a) و تمام نمونه‌ها در حالت افقی (ب-b) نشان داده شده و روی هر نمونه مشخصات تنظیمات توان لیزر، فشار گاز کمکی و سرعت پیشروی نوشته شده است.

بعد از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی‌های 20، 30 و 45 از هر سه سوراخ، همه تصاویر با نرم‌افزار ImageJ مورد بررسی و اندازه‌برداری قرار گرفت و اطلاعات مربوط به زاویه مخروطی شدن برای انجام مراحل بعدی ثبت و ذخیره شد. همچنین قبل از تخریب نمونه و مقطع زنی، قطر تمامی سوراخ‌ها با کولیس رزولوشن 0.01 میلی‌متر، اندازه‌برداری شده و نتایج ثبت شد. در شکل 14 الگوی کلی اجرای آزمایش از ابتدا تا مرحله تصویربرداری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی به طور شماتیک نمایش داده شده است.



(الف-a)



(ب-b)

Fig. 13 Specimens cut in half for SEM imaging; a) Vertical state. b) Horizontal state.

شکل 13 نمونه‌های برش خورده از وسط به منظور عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی: (الف) حالت عمودی. (ب) حالت افقی.

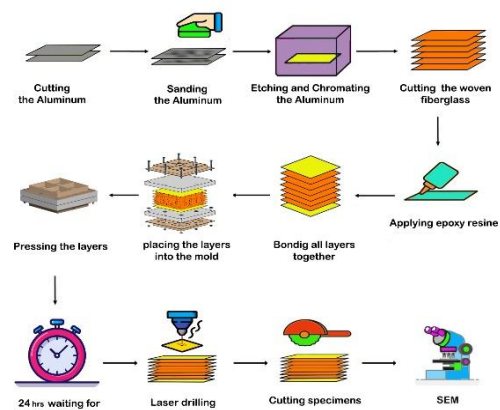


Fig. 14 General schematic of experiment procedure.

شکل 14 الگوی کلی اجرای آزمایش.

با توجه به جدول 3 و مقادیر آماره فیشر¹ برای متغیرها، مشاهده می‌شود این مقدار برای فشار گاز کمی کمترین مقدار در بین سایر متغیرهای اصلی بوده و نشان می‌دهد که فشار گاز کمی کمترین تأثیر را بر زاویه مخروطی شدن داشته اما همچنان اثر معناداری بر نتیجه دارد. همچنین مقدار آماره فیشر برای متغیر توان دستگاه، بیشترین مقدار بوده و نشان می‌دهد که توان لیزر، بیشترین اثر را بر زاویه مخروطی شدن داشته است. به همین ترتیب می‌توان در مورد سایر متغیرهای اصلی و اثرات تعاملی آن‌ها نیز دریافت که کدام عوامل یا متغیرها از لحاظ اثرگذاری بر زاویه مخروطی شدن از اهمیت بیشتری برخوردار است. شکل 18 نمودار پارتو برای تعیین عواملی است که در زاویه مخروطی شدن سوراخ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عواملی که در پشت شاخص خط چین قرمز رنگ قرار گرفته‌اند، اثر معناداری بر روی زاویه مخروطی شدن سوراخ نداشته‌اند. همانطور که در این نمودار مشخص است، توان لیزر بیشترین اثر و اثر تعاملی فشار گاز کمی - سرعت پیشروی کمترین اثر معنادار را بر روی زاویه مخروطی شدن داشته‌اند.

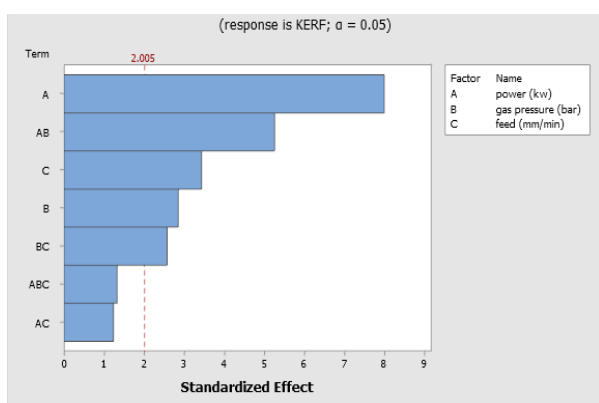


Fig. 18 Pareto chart for the factors investigated in the variations of taper angle.

شکل 18 نمودار پارتو برای عوامل مؤثر بر تغییرات زاویه مخروطی شدن.

در شکل 19 نیز تغییرات عوامل اصلی و تأثیر آن بر زاویه مخروطی شدن مشاهده می‌شود. محور عمودی نمایانگر زاویه دیواره سوراخ با سطح رویی نمونه بوده و محور افقی نیز نمایانگر مقادیر اصلی آزمایش می‌باشد. همانطور که در این نمودار مشخص است، زاویه مخروطی با تغییرات توان از 2.5 kW به 3 kW به مقدار کمینه خود رسیده و با افزایش توان از 3 kW به 3.5 kW، زاویه کمی افزایش پیدا کرده است. گمان می‌رود این پدیده به علت حذف کامل مواد مذاب و تصعید مواد به علت حرارت بسیار بالا در توان 3.5 kW باشد که باعث می‌شود دیواره سوراخ گشادتر شود و زاویه مخروطی شدن سوراخ کمی کاهش یابد. همچنین با افزایش فشار گاز کمی، زاویه مخروطی شدن سوراخ کمی کاهش می‌یابد و این امر به علت خروج بیشتر مواد مذاب از دیواره سوراخ است. با افزایش سرعت پیشروی نیز، انرژی وارد شده به قطعه کمتر می‌شود و گمان می‌رود که این کاهش انرژی وارد شده به قطعه می‌تواند در افزایش زاویه مخروطی شدن مؤثر باشد. در شکل 20 نمودار جعبه‌ای برای زاویه مخروطی شدن و بازه تغییرات آن مشخص شده است. در برخی تنظیمات زاویه مخروطی شدن منفی شده و این به این معنی است که در سمتی که پرتو لیزر از ماده خارج شده، قطر سوراخ ایجاد شده بزرگتر از سمت ورود پرتو لیزر بوده است و در مواردی که زاویه مخروطی شدن مثبت است یعنی قطر سوراخ در سمت ورود پرتو لیزر بزرگتر از سمت خروج پرتو لیزر از ماده است.

سوراخ در نظر گرفته شده و میانگین زاویه مخروطی شدن معادل 0.525 درجه به دست آمد. در شکل 17 تصویر سمت راست (الف-a) و چپ (ب-b) سوراخی با بزرگنمایی 20 که با توان لیزر 3.5 کیلووات، فشار گاز کمی 8 بار و سرعت پیشروی 6600 میلی‌متر بر دقیقه بریده شده است، مشاهده می‌شود. با دقت در این شکل، علاوه بر مشاهده مخروطی شدن دیواره سوراخ، سوختگی اطراف سوراخ نیز مشاهده می‌شود که همان ناحیه متأثر از حرارت است.

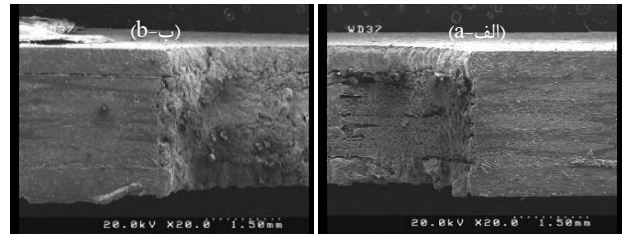


Fig. 17 The cross-section of a hole cut at a power of 3.5 kW, with an assist gas pressure of 8 bar and a feed rate of 6600 mm/min; a) Right side of the hole. b) Left side of the hole.

شکل 17 تصویر مقطع سوراخی که با توان 3.5 kW و فشار گاز کمی 8 bar و پیشروی 6600 mm/min بریده شده است: (الف) سمت راست سوراخ. (ب) سمت چپ سوراخ.

در نهایت همه زاویه‌های مخروطی شدن به کمک نرم‌افزار ImageJ محاسبه شد و به کمک نرم‌افزار مینی تب، نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفته، جدول تحلیل واریانس برای زاویه مخروطی شدن به همراه نمودارهای مربوطه استخراج شد. در جدول 3 جدول تحلیل واریانس برای نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود.

جدول 3 جدول تحلیل واریانس برای نتایج زاویه مخروطی شدن سوراخ

Table 3 ANOVA table for tapered angle of hole (kerf) results

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	25.5063	0.9810	6.64	0.000
Linear	6	14.6730	2.4455	16.56	0.000
power (kw)	2	10.7403	5.3702	36.37	0.000
gas pressure (bar)	2	1.6586	0.8293	5.62	0.006
feed (mm/min)	2	2.2740	1.1370	7.70	0.001
2-Way Interactions	12	9.0990	0.7582	5.14	0.000
power (kw)*gas pressure (bar)	4	6.1516	1.5379	10.42	0.000
power (kw)*feed (mm/min)	4	0.8746	0.2186	1.48	0.221
gas pressure (bar)*feed (mm/min)	4	2.0727	0.5182	3.51	0.013
3-Way Interactions	8	1.7344	0.2168	1.47	0.191
power (kw)*gas pressure (bar)*feed (mm/min)	8	1.7344	0.2168	1.47	0.191
Error	54	7.9735	0.1477		
Total	80	33.4798			

¹ Fisher Statistic

جدول 4 جدول تحلیل واریانس برای تغییرات اندازه قطر سوراخ

Table 4 ANOVA table for hole diameter size variations

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	0.029956	0.001152	9.43	0.000
Linear	6	0.010889	0.001815	14.85	0.000
power (kw)	2	0.006274	0.003137	25.67	0.000
gas pressure (bar)	2	0.003941	0.001970	16.12	0.000
feed (mm/min)	2	0.000674	0.000337	2.76	0.072
2-Way Interactions	12	0.008022	0.000669	5.47	0.000
power (kw)*gas pressure (bar)	4	0.001385	0.000346	2.83	0.033
power (kw)*feed (mm/min)	4	0.005096	0.001274	10.42	0.000
gas pressure (bar)*feed (mm/min)	4	0.001541	0.000385	3.15	0.021
3-Way Interactions	8	0.011044	0.001381	11.30	0.000
power (kw)*gas pressure (bar)*feed (mm/min)	8	0.011044	0.001381	11.30	0.000
Error	54	0.006600	0.000122		
Total	80	0.036556			

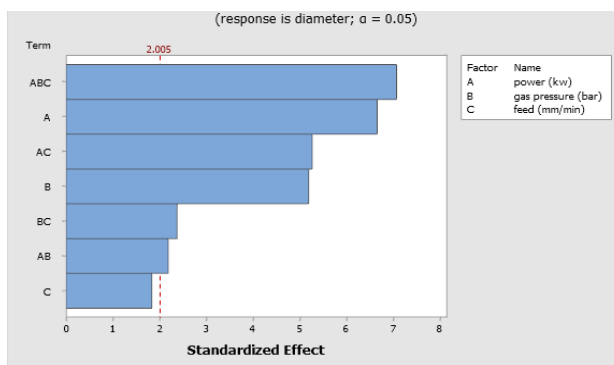


Fig. 21 Pareto chart for the factors investigated in the variations of hole diameter size.

شکل 21 نمودار پارتو برای بررسی عوامل تأثیرگذار در تغییرات اندازه قطر سوراخ.

با توجه به این نمودار پارتو مشخص است که تقریباً تمام عوامل مورد آزمایش، در اندازه قطر سوراخ تأثیرگذار بوده‌اند و حتی عامل پیشروی نیز که در زیر شاخص نقطه‌چین است، بسیار نزدیک به شاخص خط‌چین قرمز رنگ بوده و می‌تواند تا حدودی بر تغییرات قطر سوراخ تأثیرگذار باشد. اثر سه‌گانه عامل‌های توان - فشار گاز کمکی - سرعت پیشروی و عامل توان لیزر جزء تأثیرگذارترین عوامل بر اندازه قطر سوراخ می‌باشد. در شکل 22 تغییرات عوامل اصلی و تأثیر آن بر اندازه قطر سوراخ مشاهده می‌شود. محور عمودی نمایانگر اندازه قطر سوراخ و محور افقی نمایانگر مقادیر اصلی آزمایش است.

در شکل 23 نمودار کانتور تغییرات اندازه قطر سوراخ بر حسب تغییرات توان لیزر و فشار گاز کمکی و در شکل 24 نمودار کانتور پلات تغییرات اندازه قطر سوراخ بر حسب تغییرات توان لیزر و پیشروی نشان داده شده است. همانطور که در نمودارهای دوبعدی مشخص است در توان، فشار گاز کمکی و سرعت‌های پیشروی پایین‌تر، سوراخی که بریده می‌شود به اندازه نامی نقشه نزدیک‌تر است.

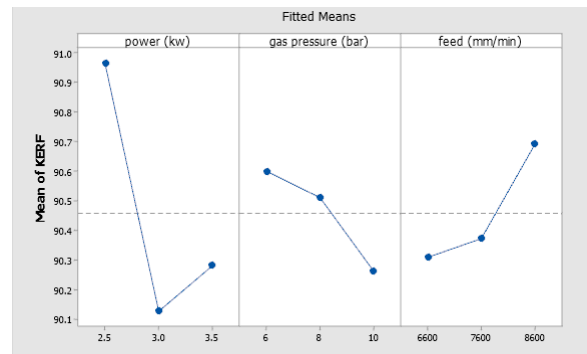


Fig. 19 Chart of taper angle (kerf) variations against variations in the main factors.

شکل 19 نمودار تغییرات زاویه مخروطی شدن سوراخ بر حسب تغییرات عوامل اصلی.

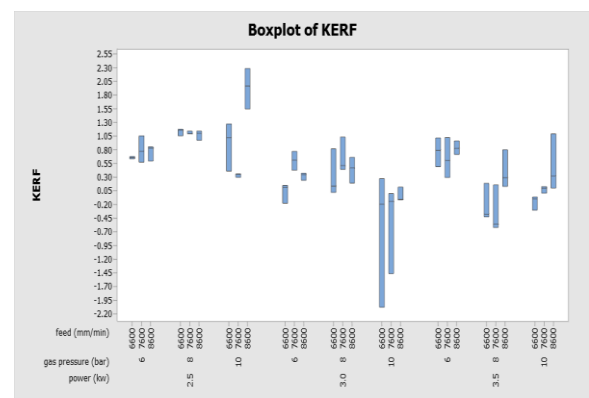


Fig. 20 Box plot of hole taper angle variations versus laser cutting settings.

شکل 20 نمودار جعبه‌ای برای تغییرات زاویه مخروطی شدن سوراخ بر حسب تنظیمات برش لیزری.

در برخی تنظیمات زاویه مخروطی شدن منفی شده و این به این معنی است که در سمتی که پرتو لیزر از ماده خارج شده، قطر سوراخ ایجاد شده بزرگتر از سمت ورود پرتو لیزر بوده و در مواردی که زاویه مخروطی شدن مثبت است یعنی قطر سوراخ در سمت ورود پرتو لیزر بزرگتر از سمت خروج پرتو لیزر از ماده است. مشابه تغییرات زاویه مخروطی شدن سوراخ در طراحی آزمایش، برای اندازه‌گیری میزان تغییرات قطر 81 سوراخ بریده شده با لیزر CO₂ روند مشابهی به کار گرفته شده با این تفاوت که اندازه‌گیری‌ها با ابزار کولیس دیجیتال با رزولوشن 0.01 mm انجام شده است.

2-3- تغییرات قطر سوراخ

مشابه تغییرات زاویه مخروطی شدن سوراخ در طراحی آزمایش، برای اندازه‌گیری میزان تغییرات قطر 81 سوراخ بریده شده با لیزر CO₂ روند مشابهی به کار گرفته شده با این تفاوت که اندازه‌گیری‌ها با ابزار کولیس دیجیتال با قدرت تفکیک 0.01 mm انجام شده است. مشخصات لیزر مورد استفاده و عوامل مورد بررسی به همراه سطوح آن نیز همانند جدول 1 و جدول 2 می‌باشد. در جدول 4 جدول تحلیل واریانس برای تغییرات قطر سوراخ و عوامل آن نشان داده شده است. مشخصات لیزر مورد استفاده و عوامل مورد بررسی به همراه سطوح آن نیز همانند جدول 1 و جدول 2 می‌باشد. در جدول 4 جدول آنالیز واریانس برای تغییرات قطر سوراخ و عوامل آن نشان داده شده است. همچنین در شکل 21 نمودار پارتو برای عواملی که در اندازه قطر سوراخ مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. عواملی که در زیر شاخص خط‌چین قرمز رنگ قرار گرفته‌اند، اثر معناداری بر روی متغیر پاسخ، نداشته‌اند. در اینجا نیز عامل توان لیزر، یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار است.

- برای بررسی زاویه مخروطی شدن سوراخ در اثر سوراخکاری با لیزر و حتی اندازه-گیری پهنای منطقه متأثر از حرارت، استفاده از روش میکروسکوپی و لایه‌نگاری نتیجه مطلوب را ندارد و روش عکسبرداری با میکروسکوپ الکترونی روشی پیشنهاد می‌شود.

- بهترین زاویه مخروطی شدن در سومین تکرار سوراخکاری با مشخصات توان لیزر معادل 3 kw و فشار گاز کمکی نیترژن 10 bar و سرعت پیشروی 7600 mm/min اندازه‌گیری شد و بطور کلی در همین توان و فشار گاز کمکی در تمامی سرعت پیشروی‌های آزمایش شده، زاویه‌های مخروطی شدن نزدیک به صفر، مشاهده شد.

- با توجه به آزمایش‌های انجام شده و اندازه‌گیری زاویه‌های مخروطی شدن، مشاهده شد که در توان‌های لیزر 3 kw و 3.5 kw در برخی سطوح فشار گاز کمکی و سرعت پیشروی، زاویه مخروطی شدن سوراخ منفی شده و قطر سوراخ در سمت خروج پرتوی لیزر از قطعه، بزرگتر از قطر سوراخ در سمت مقابل آن می‌شود.

- با توجه به نتایج به دست آمده از جدول تحلیل واریانس، عامل توان لیزر مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر زاویه مخروطی شدن سوراخ در سوراخکاری با لیزر CO₂ می‌باشد و بعد از آن عامل دوگانه توان-فشار گاز کمکی و سرعت پیشروی به ترتیب از اهمیت بیشتری برخوردار است.

- در اندازه‌گیری‌های قطر سوراخ در سمت ورود پرتوی لیزر به قطعه آلومینیوم-شیشه با کولیس دیجیتال مشخص شد که در توان 2.5 kw و فشار گاز کمکی 6 bar و سرعت پیشروی 7600 mm/min، قطر سوراخ ایجاد شده به اندازه واقعی نقشه برش نزدیکتر است و به طور کلی با افزایش توان، قطر سوراخ در همان سمت نیز افزایش می‌یابد.

- با توجه به نتایج به دست آمده از جدول تحلیل واریانس، اثر سه گانه توان-فشار گاز کمکی-سرعت پیشروی، به همراه عامل توان جزو مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر اندازه قطر سوراخ در سوراخکاری با لیزر CO₂ می‌باشند و بعد از آن اثر دو گانه توان-سرعت پیشروی و عامل فشار گاز کمکی از اهمیت بیشتری برخوردار است.

5- فهرست علائم

P	توان لیزر (kw)
f	سرعت پیشروی (mm/min)
T	زمان (s)
kerf	زاویه مخروطی شدن (درجه)

6- مراجع

- [1] Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., Çoban, O., "Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods," Journal of Materials & Design, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [2] Sabouri, H., Ahmadi, H., Liaghata, G. H., "Ballistic Impact Perforation into GLARE Targets: Experiment, Numerical Modelling and Investigation of Aluminium Stacking Sequence," International Journal of Vehicle Structures & Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 60-66 2011.
- [3] Dragan K., Bienias J., Leski A., Czulak A., Hufenbach W., "Inspection methods for quality control of fibre metal laminates (FML) in aerospace components," XVI Seminarium Kompozyty. Vol. 12, No. 4, pp. 302-308, 2012.
- [4] Romoli L., Fischer F., Kling R., "A study on ultraviolet laser drilling of PEEK reinforced with carbon fibers," Opt Lasers Eng. Vol. 50, No. 3, pp. 449-457, 2012.
- [5] Ghasemi, A.R., Mohammadi, M.M., "Calculation of calibration factors for determining of residual stress in fiber-metal laminates using incremental hole-drilling method," In Persian Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 35-44, 2014.
- [6] Nazari, A., Naderi, A. A., Malekzadefard, K., Hatami A., "Experimental and numerical analysis of vibration of FML-stiffened

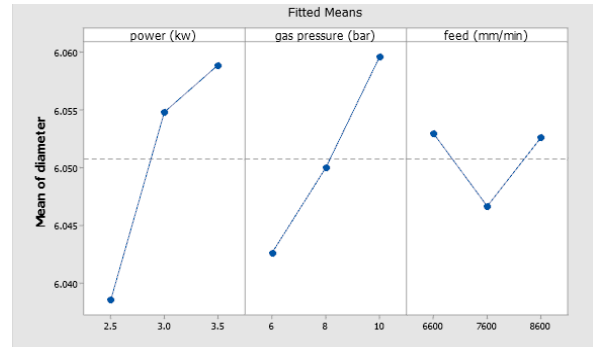


Fig. 22 Chart of hole diameter variations against the main factors. شکل 22 نمودار تغییرات اندازه قطر سوراخ بر حسب تغییرات عوامل اصلی.

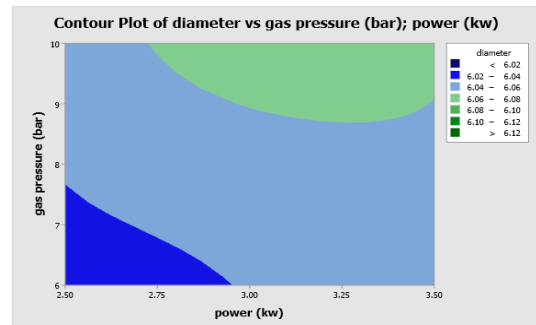


Fig. 23- Contour plot of hole diameter size variations against laser power and assist gas pressure.

شکل 23 نمودار دوبعدی تغییرات اندازه قطر سوراخ بر حسب توان و فشار گاز کمکی.

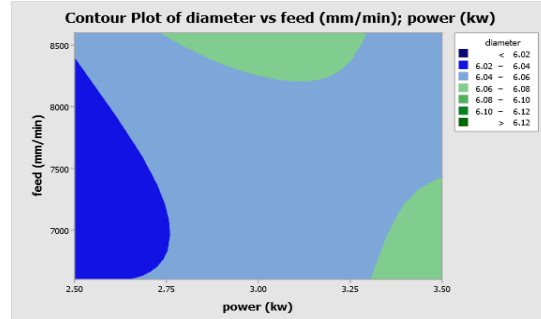


Fig. 24 Contour plot of hole diameter size variations against laser power and feed.

شکل 24 نمودار دوبعدی تغییرات اندازه قطر سوراخ بر حسب توان و سرعت پیشروی.

4- نتیجه گیری

در این مطالعه ابتدا به ساخت کامپوزیت آلومینیوم-الیاف شیشه به روش کارگاهی و لایه چینی دستی پرداخته شد. سپس با اجرای آزمون‌های یک طرح عاملی کامل، فرآیند سوراخکاری آن با لیزر CO₂ انجام شده و به بررسی تغییرات زاویه مخروطی شدن و اندازه قطر سوراخ پرداخته شد تا بتوان پارامترهای بهینه دستگاه لیزر را برای سوراخکاری کامپوزیت آلومینیوم - شیشه پیدا نمود. در این مطالعه سه پارامتر توان لیزر، فشار گاز کمکی و پیشروی مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج زیر حاصل شد:

- در ساخت کامپوزیت به روش کارگاهی و با استفاده از نیروی فشاری، برای بهتر چسبیدن رزین به ورقه‌های آلومینیوم بهتر است که سطح آلومینیوم به‌خوبی زیر و سپس پوشش‌دهی کرومات شده شود.

- cutting parameters on surface and kerf quality of metals,” *Int J Adv Manuf Technol.* Vol. 130, No. 1, pp. 1039-1074, 2024.
- [25] Lunder, O. R., “Chromate-free pre-treatment of aluminium for adhesive bonding”, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, pp. 1-180, 2003.
- circular cylindrical shell under clamp-free boundary condition,” *Journal of Solid and Fluid Mechanics.* Vol. 10, No. 2, pp. 65-78, 2019.
- [7] Costa, R. D., Sales-Contini, R. C., Silva, F. J., Sebbe, N., Jesus, A. M., “A critical review on fiber metal laminates (FML): from manufacturing to sustainable processing,” *Metals.* Vol. 13, No. 4, pp. 638, 2023.
- [8] Liu, X., Li, L., Yang, S., Xu, M., Zhong, M., Wang, B., Jiang, Y., “Optimization of nanosecond laser drilling strategy on CFRP hole quality”, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 324, pp. 117360, 2024.
- [9] Alipour Sougavabar, M., Niknam, S. A., Davoodi, B., “Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 2, pp. 1970-1975, 2023.
- [10] Alsaadawy, M., Dewidar, M., Said, A., Maher, I., Shehabeldeen, T. A., “A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals,” *Int J Adv Manuf Technol.* Vol. 130, No. 1, pp. 1039-1074, 2024.
- [11] Riveiro, A., Quintero, F., Lusquiños, F., Del Val, J., Comesaña, R., Boutinguiza, M., Pou, J., “Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite,” *Compos Part A, Appl Sci Manuf.* Vol. 43, No. 8, pp. 1400-1409, 2012.
- [12] Riveiro, A., Quintero, F., Lusquiños, F., Del Val, J., Comesaña, R., Boutinguiza, M., Pou, J., “Laser cutting of carbon fiber composite materials,” *Procedia Manuf.* Vol. 13, pp. 388-395, 2017.
- [13] Hyland, M. M., “Surface chemistry of adhesion to aluminum,” *Handbook of Aluminum.* CRC Press, p. 465-82, 2003
- [14] Castro, M., Nogueira, J., Thim, G., Oliveira, M., “Adhesion and corrosion studies of a lithium-based conversion coating film on the 2024 aluminum alloy,” *Thin Solid Films.* Vol. 457, No. 1, pp. 307-312, 2004.
- [15] Tamrin, K., Moghadasi, K., Sheikh, N., “Experimental and numerical investigation on multi-pass laser cutting of natural fibre composite,” *Int J Adv Manuf Technol.* Vol. 107, No. 3, pp. 1483-1504, 2020.
- [16] Khan, M. A., Uddin, M. S., Khan, A. M., Rahman, M., Khandoker, S., “Machining GLARE fibre metal laminates: A comparative study on drilling performance using conventional and ultrasonic-assisted methods,” *Int J Adv Manuf Technol.* Vol. 122, No. 9, pp. 10297-10312, 2022.
- [17] Kariman Moghadam, A., Rahnema, S., “Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 4, pp. 2116-2127, 2023.
- [18] Ekici, E., Motorcu, A.R., “Fabrication and machinability (drilling) properties of fiber metal laminate composites: CARALL and GLARE,” *Advanced Manufacturing Techniques Using Thermoplastic Polymer Composites*, CRC Press, p. 265-284, 2023.
- [19] Maleki, E., Ghasemi, A., Ghasemi, M., “A review on laser machining of composite materials: Process parameters and quality characteristics,” *J Compos Mater.* Vol. 54, No. 10, pp. 1311-1328, 2020.
- [20] Abrão, A. M., Faria, P. E., Rubio, J. C., Correia, A. E., Davim, J. P., “Drilling of fiber reinforced plastics: A review,” *J Mater Process Technol.* Vol. 186, No. 1, pp. 1-7, 2007.
- [21] Solati, A., Hamed, M., Safarabadi, M., “Comprehensive investigation of surface quality and mechanical properties in CO₂ laser drilling of GFRP composites,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, No. 9, pp. 2659-2675, 2019
- [22] Patel, P., Sheth, S., Patel, T., “Experimental analysis and ANN modelling of HAZ in laser cutting of glass fibre reinforced plastic composites,” *Procedia Technol.* Vol. 23, pp. 406-413, 2016.
- [23] Romoli, L., Fischer, F., Kling, R., “A study on UV laser drilling of PEEK reinforced with carbon fibers”, *Opt. Lasers Eng.* Vol. 50, pp. 449-457, 2012.
- [24] Alsaadawy, M., Dewidar, M., Said, A., Maher, I., Shehabeldeen, T. A., “A comprehensive review of studying the influence of laser