



بررسی تجربی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر جدایش بین لایه‌های ناشی از سوراخ‌کاری کامپوزیت شیشه/اپوکسی

رسول عباسی^۱، حسین حیدری^{۲*}، محمد حسین پل^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تفرش، صندوق پستی ۷۹۶۱۱-۳۹۵۱۸، heidary@tafreshu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی به‌ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی به‌طور روز افزونی در حال افزایش می‌باشد. سوراخ‌کاری فرآیند اصلی برای مونتاژ کردن اجزای کامپوزیتی است. آسیب‌های فرایند سوراخ‌کاری مانند جدایش بین لایه‌ای و ترک خوردگی ماتریس در اطراف سوراخ، در نهایت ممکن است باعث افت در استحکام باقیمانده‌ی اجزای سوراخ‌کاری شده، شود. در این مقاله اثر پارامترهای سوراخ‌کاری نظیر نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و قطر مته سوراخ‌کاری بر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای برای نمونه‌های کامپوزیتی با درصد‌های مختلف نانولوله کربنی اصلاح شده، بررسی شده است. همچنین در این تحقیق از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش به‌منظور تجزیه و تحلیل تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانولوله کربنی تا درصد مشخصی (در حدود ۰/۵ درصد وزنی)، نیروی محوری و جدایش بین لایه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش نرخ پیشروی و افزایش سرعت اسپیندل، نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین قطر مته بر فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده بی‌تاثیر است.

دریافت: ۹۴/۱۰/۶

پذیرش: ۹۴/۱۲/۲۸

کلیدواژگان:

نانو کامپوزیت

نرخ پیشروی

سرعت اسپیندل

نیروی محوری

فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده

Experimental investigation of carbon nanotube addition on delamination induced drilling of glass-epoxy composites

Rasol Abasi, Hossein Heidary*, Mohammad Hossein Pol

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

*P.O.B. 79611-39518, Tafresh, Iran, heidary@tafreshu.ac.ir

Keywords

Nano composite
 Feed rate
 Spindle speed
 Thrust force
 Adjusted delamination factor

Abstract

Nowadays, using composite materials has been grown increasingly especially in aerospace and automobile manufacturing. Composite drilling is the main machining process for assembling the composite components. The damages caused by drilling process, such as delamination, fiber breakage, fiber pull out and matrix cracking around the hole can decrease the residual strength of drilled components. In this paper, the effect of drilling parameters such as feed rate, spindle speed and drill diameter on the thrust force, delamination for composite specimens with different percentages of nano fibers are discussed. Taguchi method is used for Designing of Experiment to analysis effect of machining parameters (feed rate, spindle speed, drill diameter) and percentage of nano particles on the thrust force and delamination factor. The results show that by increasing carbon nano tube up to a special percentage (about 5%) delamination and thrust force decrease. Also, by decreasing feed rate and increasing spindle speed, thrust force and delamination factor decrease.

۱- مقدمه

الیاف شیشه دارای مزیت‌های بسیاری نظیر قیمت پایین، استحکام بالا، مقاومت شیمیایی بالا می‌باشد. ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی دشوار و متفاوت با فلزات می‌باشد. ناهمسانگردی حاصل از الیاف تقویت کننده، قابلیت ماشین‌کاری را در طول ماشین‌کاری تحت تاثیر قرار می‌دهد ولی با این حال سوراخ‌کاری مکانیکی با مته، مقرون به صرفه ترین روش برای ایجاد سوراخ در کامپوزیت‌های پلیمری و همچنین یک عملیات الزامی در کامپوزیت‌ها برای مونتاژ کردن اجزا می‌باشد [۳،۲]. عیوب ایجاد شده در سوراخ‌کاری

مواد کامپوزیتی به‌دلیل خواص عالی آن‌ها نظیر استحکام و مدول الاستیسیته ویژه بالا، وزن سبک و مقاومت در برابر خوردگی، جایگزین بسیاری از مواد معمولی و مهندسی در صنایع خودرو سازی و هوافضا شده‌اند [۱]. کامپوزیت‌ها را به چند روش تقویت می‌کنند که یکی از این روش‌ها استفاده از الیاف است. یکی از مرسوم‌ترین الیافی که برای تقویت کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، الیاف شیشه می‌باشد.

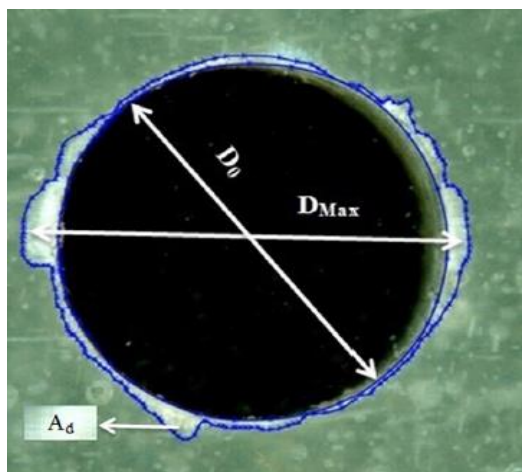
Please cite this article using:

Abasi, R. Heidary, H. and Pol, M. H., "Experimental investigation of carbon nanotube addition on delamination induced drilling of glass-epoxy composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 225-232, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

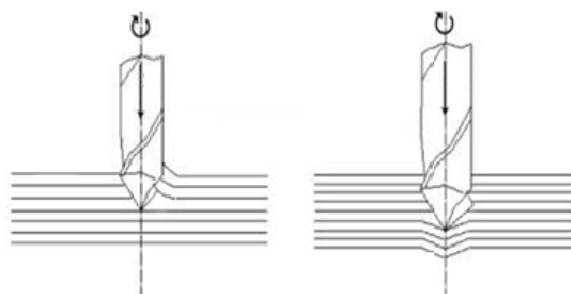
می‌باشد. یکی دیگر از مواردی که در سوراخ‌کاری ورقه‌های کامپوزیتی اهمیت دارد استفاده یا عدم استفاده از ورق محافظ (محافظت کردن لایه‌های کف ورقه کامپوزیت) می‌باشد. نیروی محوری در هنگام سوراخ‌کاری کامپوزیت با ورق حامی بیشتر از سوراخ‌کاری کامپوزیت بدون ورق حامی می‌باشد ولی در عین حال جدایش بین لایه‌ای در سوراخ‌کاری کامپوزیت با ورق حامی کمتر از سوراخ‌کاری بدون ورق حامی می‌باشد. همچنین لرزش قطعه کار نیز آثار مخربی در کیفیت سوراخ ایجاد شده دارد و سبب افزایش جدایش بین لایه‌ای شود [۲۰، ۱۹]. امروزه استفاده از فناوری‌های جدید نظیر ماشینکاری با سرعت بالا^۵، که با بهبود بهره‌وری باعث کاهش هزینه‌های تولید در شرکت‌های تولیدی می‌شود، به طور گسترده در فرایند ماشین‌کاری کامپوزیت استفاده می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که استفاده از ماشینکاری با سرعت بالا برای سوراخ‌کاری کامپوزیت پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه^۶ ضمن سطح آسیب کمتر است [۲۱، ۸].

در سال‌های اخیر برای بهبود خواص مواد در اجزای چند منظوره از فناوری نانو استفاده می‌شود. نانو کامپوزیت‌ها پتانسیل فوق العاده ای برای بهبود خواص مواد کامپوزیتی دارند، در حالی که تاثیر چندانی در وزن کل نمی‌گذارد [۲۲]. به طور خاص نانولوله‌های کربنی (CNT) پتانسیل این را دارد که با حفظ و یا بهبود عملکرد مکانیکی، رسانایی الکتریکی پلیمرها را تحقق بخشد و همچنین باعث بهبود هدایت حرارتی آن شود [۲۳، ۲۴]. چاندرا شکارا^۷ و همکاران [۲۵]، مقاومت برشی نانو کامپوزیت اپوکسی/نانولوله ای چندجداره کربنی الیاف کربن را مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که مقاومت برشی درون لایه‌ای در این مواد به طور قابل توجهی در جهت طولی بالاتر از جهت‌گیری عرضی می‌باشد، به همین منظور این مواد برای کاربردهایی نظیر حمل و نقل و صنعت هوافضا بسیار مناسب می‌باشد. به دلیل خاصیت انتقال حرارتی که نانو لوله در کامپوزیت ایجاد می‌کند، حداکثر دما در سوراخ‌کاری نانو کامپوزیت هیبریدی کربن/اپوکسی/نانولوله کربنی، کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای رزین ماتریس می‌باشد [۲۶]. پس از انجام سوراخ‌کاری، باید ناحیه خرابی اندازه گیری شود. میزان جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های سوراخ‌کاری شده توسط روش‌های میکروسکوپ نوری، رادیوگرافی، C-اسکن آلتراسونیک و اسکن دیجیتال (شکل ۲) تعیین می‌شود.



شکل ۲ اسکن دیجیتال [۱۴]

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بر روی کیفیت سوراخ ایجاد شده تاثیر می‌گذارد. این آسیب‌ها شامل جدایش بین لایه‌ای، انقباض سوراخ، بیرون کشیدگی الیاف و آسیب‌های حرارتی می‌باشد که باعث تاثیر بر خواص اجزا و کاهش عمر استفاده آن‌ها می‌شود [۱۵، ۴]. در این میان جدایش بین لایه‌ای یکی از مهمترین مکانیزم‌های خرابی در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها می‌باشد که معمولا در هنگام ورود مته^۱ و خروج مته^۲ اتفاق می‌افتد (شکل ۱). هر دو مکانیزم جدایش بین لایه‌ای رابطه‌ی مستقیمی با نیروی محوری دارد. در هنگام ورود مته پس از آن که لبه‌ی برشی با ورقه تماس برقرار نمود، نیروی برشی اعمال شده در جهت محیطی یک نیرو در راستای محوری به سمت بالا ایجاد می‌کند که باعث ایجاد جدایش بین لایه‌ای در سطح بالایی ورقه کامپوزیتی می‌شود. زمانی که مته به انتهای قطعه می‌رسد ضخامت لایه‌ای بریده شده کم می‌شود. در چنین نقطه‌ای تنش ناشی از نیروی محوری از مقاومت بین لایه‌ای فراتر می‌رود و جدایش لایه‌ای رخ می‌دهد [۷، ۶].



شکل ۱ جدایش بین لایه‌ای که در ورود و خروج مته اتفاق می‌افتد [۸]

شناخت و تحلیل تاثیر پارامترهای فرایند سوراخ‌کاری (نظیر سرعت برشی، نرخ پیشروی، قطر مته، ضخامت نمونه و ...) بسیار مهم می‌باشد، زیرا انتخاب صحیح این پارامترها، سبب بهبود عملکرد ماشینکاری و در نتیجه کاهش آسیب‌ها می‌شود [۹]. سرعت برشی و نرخ پیشروی از پارامترهای مهم و بحرانی در ایجاد جدایش بین لایه‌ای می‌باشند و به طور کلی می‌توان پیش‌بینی کرد که با کاهش سرعت برشی و نرخ پیشروی، فاکتور جدایش بین لایه‌ای نیز کاهش می‌یابد [۱۰]. مته سوراخ‌کاری نیز در کیفیت سوراخ ایجاد شده بسیار تاثیر گذار می‌باشد پارامترهای مته شامل جنس، قطر و هندسه مته می‌باشد [۱۱-۱۳]. حیدری و همکاران اثر زاویه راس مته را روی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه ای اصلاح شده مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیده‌اند که زاویه راس بیشترین تاثیر را روی نیروی محوری دارا می‌باشد و هرچه زاویه راس بیشتر گردد، نیروی محوری نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده افزایش می‌یابد [۱۴]. همچنین انتخاب نامناسب پارامترهای سوراخ‌کاری، باعث سایش ابزار و در نتیجه کاهش کیفیت سوراخ ایجاد شده می‌شود [۱۵].

و ارتاجان^۳ و همکاران [۱۶] و خشابا^۴ [۱۸، ۱۷] تاثیر جنس ماتریس استفاده شده روی نیروی محوری، گشتاور و سایش ابزار را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها دو نوع کامپوزیت ترموست و ترموپلاستیک را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نمایانگر این مطلب می‌باشد که در سوراخ‌کاری کامپوزیت ترموپلاستیک نیروی محوری کمتری نسبت به سوراخ‌کاری کامپوزیت ترموست ایجاد می‌شود در نتیجه جدایش بین لایه‌ای در این مواد کمتر

5. High Speed Steel
6. Carbon Fiber Reinforced Polymer
7. Shekar, K. Chandra

1. Peel Up
2. Push Down
3. Varatharajan
4. Khashaba

درجه حرارت ۷۰ درجه سانتیگراد در کوره خلا قرار داده شدند. سپس نانو ذرات خشک شده با درصد های وزنی ۰، ۱/۵، ۰/۱ و ۱ نسبت به کل سیستم رزین (اپوکسی و سخت کننده) به ایپون ۸۲۸ اضافه شده و با همزن مکانیکی به صورت اختلاط برشی با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۸۰ دقیقه مخلوط شدند. سپس با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج فراصوتی با توان ۱۵۰Kw/cm² و دامنه ۵μm قرار گرفته تا نانوذرات درون اپوکسی بهتر پخش شوند و از تشکیل کلوخه‌ها تا حد ممکن جلوگیری شود.

در نهایت مجدداً مخلوط رزین و نانوذرات با همزن مکانیکی به مدت ۶۰ دقیقه با همان دور ۳۰۰۰rpm هم‌زده شد. برای حذف حباب‌های ایجاد شده در مخلوط، طی عملیات اختلاط، مخلوط تهیه شده برای مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد در کوره خلا قرار داده شد و پس از حباب زدایی در محیط آزمایشگاه قرار گرفت تا دمای آن تا درجه حرارت محیط کاهش یابد. پس از تهیه مخلوط رزین و نانو لوله کربنی، سفت کننده به آن اضافه و به آرامی هم زده شد.

۳-۲- ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی

نمونه‌ها با استفاده از روش لایه چینی دستی آماده شدند. از ۱۲ الیاف بافته شده (پارچه) شیشه برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. که ضخامت نهایی نمونه‌ها ۱/۰±۰/۲ میلی‌متر می‌باشد، و برای کنترل کیفیت نمونه‌ها در حین ساخت، نمونه‌ها در بین دو صفحه قرار گرفته و تحت فشار قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر می‌باشد که طول نمونه ۱۵۰ میلی‌متر و عرض آن ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. برای پخت سیستم رزین آن را در دستگاه اتوکلاو قرار داده تا پخت مواد به صورت حرارتی و در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد، انجام شود.

۴-۲- تجهیزات

آزمایش سوراخ‌کاری توسط ماشین فرز کوره‌یورسال ماشین سازی تبریز مدل FP4M انجام می‌گیرد. برای اندازه‌گیری نیروی محوری از دستگاه لودسل مدل DSCK متعلق به شرکت بونگ شین^۴ استفاده شد. از مته HSS استاندارد با زاویه راس ۱۱۸ درجه و با قطر های ۴ و ۵ میلی‌متر برای آزمایش به کار گرفته شد. برای افزایش دقت آزمایش‌ها، تکرار هر آزمایش سه بار در نظر گرفته شده و از سوراخ‌کاری خشک به علت جلوگیری از واکنش‌های شیمیایی ناخواسته به هنگام استفاده از مایع خنک استفاده شد. مجموعه آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است.

۵-۲- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی^۵ انجام شده است. تاگوچی یک روش طراحی آزمایش، برای بررسی پارامترهای مختلف اثرگذار بر میانگین یا واریانس عملکرد فرایند پیشنهاد می‌دهد، که شامل استفاده از یک سری آرایه‌های ارتوگونال (L16(4^۲ 2^۲)) برای تعیین پارامترهای اثر گذار بر فرایند و تراز می‌گردد که هر یک از آن‌ها باید تغییر کند، آرایه‌ها به وسیله تعداد پارامترها و تعداد ترازها انتخاب می‌شوند. به جای تست همه حالت‌های ممکن، در روش تاگوچی بخشی از آزمایش‌ها انجام می‌گیرد و این باعث انتخاب داده‌های ضروری برای تعیین فاکتورهایی که بیشترین اثر را در فرایند دارند با کمترین مقدار آزمایش‌ها می‌شود.

برای تعیین میزان خرابی از فاکتور جدایش بین لایه‌ای استفاده می‌شود. فاکتور جدایش بین لایه‌ای از رابطه‌های (۱) و (۲) به دست می‌آید.

$$F_d = \frac{D_{Max}}{D_0} \quad (1)$$

$$F_{d'} = \frac{A_{Max}}{A_0} \quad (2)$$

که در آن D₀ قطر نامی مته، A₀ مساحت نامی سوراخ مته، D_{Max} حداکثر اندازه خرابی و A_{Max} اندازه ناحیه با قطر D_{Max} می‌باشد.

دیویم^۱ و همکاران [۲۷]، فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده را مطابق با رابطه (۳) ارائه نمودند که بخش اول آن اندازه ترک و بخش دوم آن اندازه خرابی را نشان می‌دهد.

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{Max}}{D_0} + \beta \frac{A_{Max}}{A_0} \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - \beta \quad (4)$$

$$\beta = \frac{A_d}{A_{Max} - A_0} \quad (5)$$

ظریف کریمی و همکاران [۲۸]، تاثیر پارامترهای سوراخ‌کاری شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و زاویه راس مته را بر مقاومت باقیمانده کششی ورقه‌های کامپوزیتی پلیمر/شیشه را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج کلی نشان می‌دهد با افزایش آسیب‌های سوراخ‌کاری، مقاومت باقیمانده کششی کاهش می‌یابد. به طور مثال زاویه راس مته تاثیر بسیاری روی نیروی محوری، فاکتور جدایش بین لایه‌ای و مقاومت باقیمانده کششی دارد و افزایش زاویه راس مته باعث افزایش نیروی محوری، فاکتور جدایش بین لایه‌ای و کاهش مقاومت باقیمانده کششی می‌شود [۲۹].

در تحقیق حاضر اثرات، درصد وزنی نانو لوله کربنی و پارامترهای ماشین‌کاری نظیر سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی و همچنین قطر مته بر روی فاکتور جدایش بین لایه‌ای در نانوکامپوزیت هیبریدی شیشه/اپوکسی/نانولوله کربنی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از ۴ تراز درصد وزنی نانو لوله کربنی شامل ۰، ۱/۵، ۰/۱ و ۱ درصد و ۴ تراز نرخ پیشروی شامل ۱۲، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۵ میلی‌متر و ۲ تراز سرعت اسپیندل شامل ۳۱۵، ۶۳۰ دور بر دقیقه و همچنین مته با دو قطر ۴ و ۵ میلی‌متر استفاده می‌شود.

۲- آزمایش

۲-۱- مواد اولیه

مواد استفاده شده در این تحقیق، شامل رزین اپوکسی و نانولوله کربنی اصلاح شده و الیاف شیشه می‌باشد. اپوکسی استفاده شده، شامل رزین دیگلیسیدیل اتر بیسفنول نوع آ^۲ با نام تجاری ایپون ۸۲۸ به عنوان پایه رزین و سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف ۲۰۵^۲ به عنوان سفت‌کننده می‌باشد. الیاف شیشه E-glass، دارای بافت دو بعدی با خواص طولی و عرضی یکسان می‌باشد. همچنین از نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNTs) اصلاح شده با هیدرواکسید (-COOH) که دارای قطر ۵۰ μm و قطر ۸-۱۵ nm و در درصد خلوص بالای ۹۵wt% می‌باشد، در این تحقیق استفاده شد.

۲-۲- آماده‌سازی مخلوط اپوکسی / نانولوله کربنی

برای تولید نانوکامپوزیت هیبریدی شیشه/اپوکسی/نانو لوله کربنی، ابتدا به منظور خشک نمودن نانولوله‌های کربنی، این نانوذرات به مدت ۲۴ ساعت در

1. Davim
2. A diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)
3. Epikure F-205

4. Bongshine
5. Taguchi Method

جدول ۱ فاکتورهای ورودی، ترازهای مربوط و پاسخ های خروجی آزمایش

ترازها	درصد وزنی نانو. / %	نرخ پیشروی (mm/min)	سرعت اسپیندل (rpm)	قطر مته (mm)
۱	۰	۱۲	۳۱۵	۴
۲	۰/۱	۴۰	۶۳۰	۵
۳	۰/۵	۸۰	-	-
۴	۱	۱۲۵	-	-

۳- بحث و نتایج

۱-۱- خواص مکانیکی

جدول ۲ تاثیر افزودن نانو لوله کربنی در خواص مکانیکی رزین را نشان می‌دهد [۳۲]. نتایج نشان می‌دهد با افزودن نانولوله کربنی تا ۰/۵ درصد به رزین استحکام نهایی افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش می‌یابد که نشان دهنده آن است که مقدار ۰/۵ درصد، مقداری بهینه برای افزودن نانو لوله کربنی می‌باشد.

جدول ۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی را نشان می‌دهد که به وسیله تست کشش استاندارد به‌دست آمده است [۳۳].

جدول ۲ تاثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی در خواص مکانیکی رزین

نانو ذرات کربنی (%)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش شکست (%)	مدول (GPa)	چقرمگی (MJ/m ³)
۰	۱۸/۷۲±۰/۳۸	۳/۲۶±۰/۱۷	۰/۵۷۵۱	۰/۳۰
۰/۵	۲۲/۷۴±۱/۶	۳/۰۳±۰/۰۳	۰/۷۵۴۷	۰/۳۵
۱	۲۲/۰۴±۰/۸۱	۲/۹۵±۰/۲۶	۰/۷۴۸۹	۰/۲۹

جدول ۳ تاثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی در خواص مکانیکی رزین

نانوذرات کربنی (%)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش (%)	مدول (GPa)	چقرمگی (MJ/m ³)
۰	۱۷۵/۹۸±۵/۷۷	۰/۷۱±۰/۰۳	۲۴/۷۸	۰/۶۳
۰/۱	۱۷۷/۵۲±۵/۰۸	۰/۷۳±۰/۰۳	۲۴/۳۱	۰/۶۵
۰/۵	۱۸۲/۶۴±۸/۲۰	۰/۷۸±۰/۰۴	۲۳/۴۱	۰/۷۱
۱	۱۷۳/۸۷±۰/۲۳	۰/۷۳±۰/۰۵	۲۳/۸۱	۰/۶۳

۲-۲- تحلیل نیروی محوری

در سوراخ‌کاری کامپوزیت، شدیدترین جدایش بین لایه‌ای در هنگام خروج مته رخ می‌دهد. محققان بسیاری جدایش بین لایه‌ای را توسط روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند و نشان داده‌اند که این پدیده با نیروی محوری هنگام خروج مته متناسب است. بنابراین با افزایش نیروی محوری، جدایش بین لایه‌ای شدیدتری اتفاق می‌افتد. شکل ۴ تغییرات نیروی محوری را در آزمایش سوراخ‌کاری تحت شرایط صفر درصد نانو، نرخ پیشروی ۱۲ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت اسپیندل ۳۱۵ دور بر دقیقه و مته به قطر ۴ میلی‌متر نشان می‌دهد. در شروع فرایند، نیروی محوری به شدت افزایش می‌یابد. اولین افت در نمودار را می‌توان به مکانیزم جدایش بین لایه‌ای در ورودی نسبت داد. پس از درگیری لبه جان مته نیروی محوری با ورود لبه‌های اصلی برش افزایش می‌یابد و سپس برای مدت نسبتاً کوتاهی حول مقدار ثابتی نوسان می‌کند تا زمانی که جدایش بین لایه‌ای اتفاق بیافتد. در این لحظه نیروی محوری پله ای کاهش می‌یابد و هر افت در نمودار را می‌توان به باز شدن یا رشد ترک نسبت داد.



شکل ۳ مجموعه آزمایش

برای تعیین اثر هر متغیر، نسبت سیگنال به نویز^۱ یا SN برای هر آزمایش محاسبه می‌شود. محاسبه نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش اول در آرایه، از معادله‌های (۶) و (۷) به‌دست می‌آید [۳۰، ۳۱].

$$\bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} y_{i,u} \quad (6)$$

$$S_i^2 = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{u=1}^{N_i} (y_{i,u} - \bar{y}_i)^2 \quad (7)$$

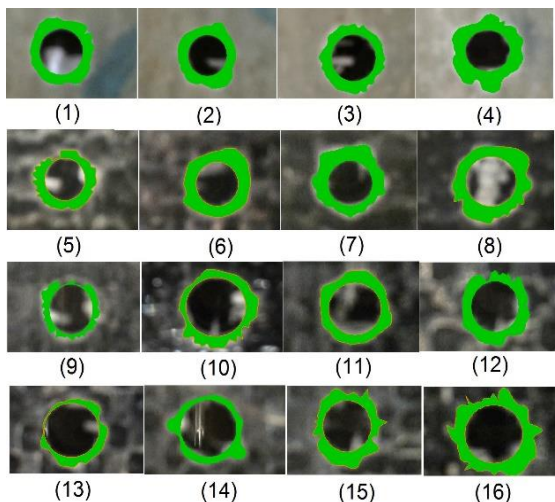
که در آنها، i تعداد آزمایش، u تداود تکرار، N_i تعداد تکرار برای آزمایش نام است. در حالت حداقل و حداکثر کردن، نسبت سیگنال به نویز طبق رابطه‌های (۸) و (۹) تعریف می‌شود.

$$SN_i = -10 \log \left(\frac{\sum_{u=1}^{N_i} y_{i,u}^2}{N_i} \right) \quad \text{برای حداکثر کردن} \quad (8)$$

$$SN_i = -10 \log \left(\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{1}{y_{i,u}^2} \right) \quad \text{برای حداقل کردن} \quad (9)$$

بعد از محاسبه SN برای هر آزمایش، میانگین مقدار SN برای هر فاکتور و تراز محاسبه می‌شود. نرم افزار مینی تب^۲ که یکی از نرم افزارهای مشهور و قدرتمند در زمینه ی تحلیل‌های آماری می‌باشد، برای تهیه ماتریس طراحی و آنالیز داده‌ها به کار گرفته شد. چهار فاکتور درصد وزنی نانو، نرخ پیشروی، سرعت برشی و قطر مته به عنوان پارامترهای ورودی و نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای به عنوان مهم‌ترین پاسخ‌های خروجی در نظر گرفته شد. در حالت بهینه نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده که میزان خرابی به واسطه سوراخ‌کاری است، باید حداقل شود. فاکتورهای ورودی، ترازهای مربوط و پاسخ های خروجی در جدول ۱ آورده شده است.

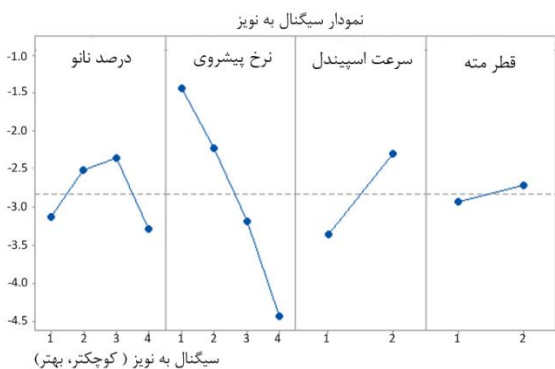
1. Signal to Noise
2. Minitab



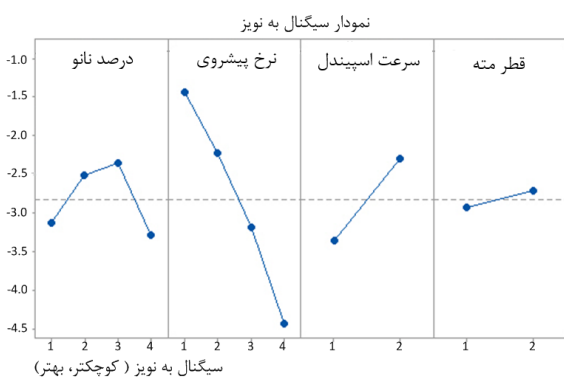
شکل ۵ ناحیه خرابی نمونه‌های سوراخ‌کاری شده

۳-۳- نسبت سیگنال به نویز

برای تعیین اثر هر متغیر بر مقادیر پاسخ (نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده) نمودار نسبت سیگنال به نویز یا عدد SN در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است.

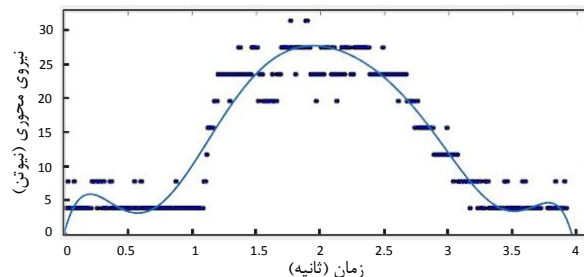


شکل ۶ نمودار SN برای نیروی محوری



شکل ۷ نمودار SN برای فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده

شکل ۶ نمودار SN، برای نیروی محوری و شکل ۷ نمودار SN برای فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده می‌باشد. همان‌طور که از مقادیر مشخص است نرخ پیشروی بیشترین تاثیر را بر روی نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای دارد، و پس از آن به ترتیب سرعت اسپیندل و درصد وزنی نانو قرار دارند و کمترین تاثیر را تغییر قطر مته دارد که این پارامتر قابل اغماض می‌باشد.



شکل ۴ نمودار نیروی محوری بر حسب زمان

جدول ۴ شانزده آزمایش طراحی شده به کمک روش تاگوچی را به همراه نتایج تجربی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای نشان می‌دهد.

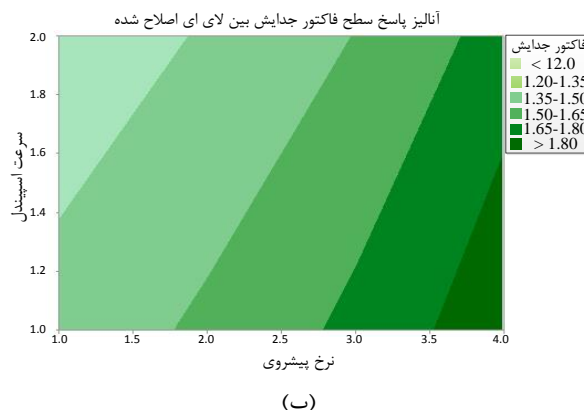
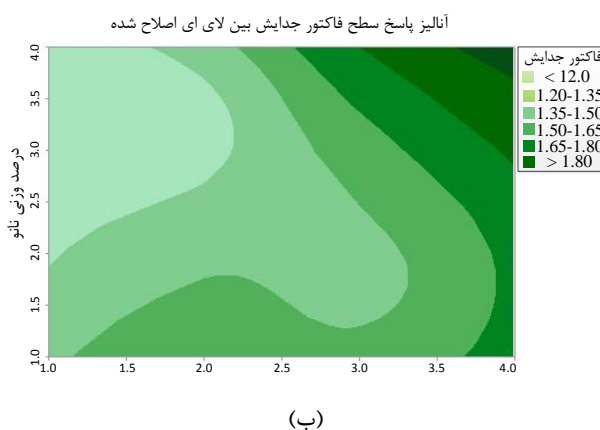
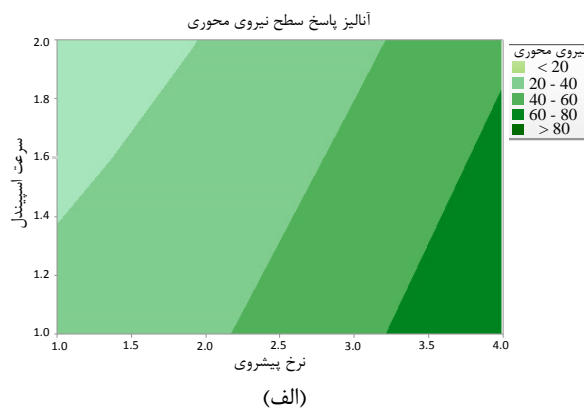
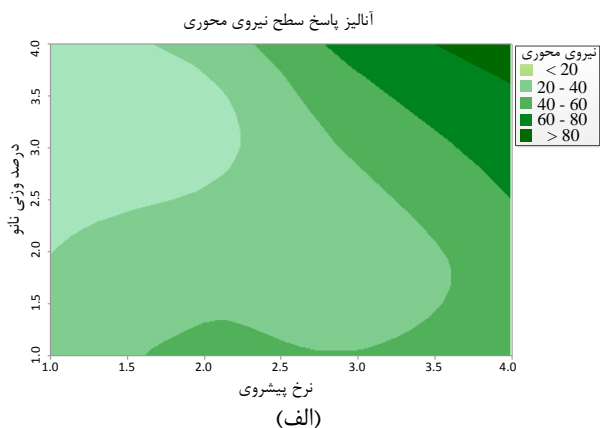
جدول ۴ نتایج تجربی نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای

شماره آزمایش	درصد وزنی نانو (%)	نرخ پیشروی (mm/min)	سرعت اسپیندل (rpm)	قطر مته (mm)	نیروی محوری (N)	فاکتور جدایش بین لایه‌ای
۱	۰	۱۲	۳۱۵	۴	۳۱۳۸۱۳	۱/۳۲۹۰
۲	۰	۴۰	۳۱۵	۴	۴۳/۱۴۹۰	۱/۴۴۰۶۶
۳	۰	۸۰	۶۳۰	۵	۴۱/۱۸۷۹	۱/۳۹۵۸۰
۴	۰	۱۲۵	۶۳۰	۵	۵۹/۹۱۷۲	۱/۵۹۰۴۳
۵	۰/۱	۱۲	۳۱۵	۵	۱۹/۶۱۱۳	۱/۱۸۱۸۹
۶	۰/۱	۴۰	۳۱۵	۵	۱۳/۳۸۱۳	۱/۳۱۸۷۲
۷	۰/۱	۸۰	۶۳۰	۴	۳۰/۸۴۲۶	۱/۳۱۳۲۹
۸	۰/۱	۱۲۵	۶۳۰	۴	۵۲/۹۵۵۹	۱/۵۴۸۵۶
۹	۰/۵	۱۲	۶۳۰	۴	۷/۸۴۵۳۲	۱/۰۷۳۲۷
۱۰	۰/۵	۴۰	۶۳۰	۴	۱۳/۳۴۲۶	۱/۱۵۱۲۴
۱۱	۰/۵	۸۰	۳۱۵	۵	۴۳/۱۴۹۳	۱/۴۲۷۱۹
۱۲	۰/۵	۱۲۵	۳۱۵	۵	۶۸/۶۴۶۵	۱/۶۷۳۱۸
۱۳	۱	۱۲	۶۳۰	۵	۱۳/۷۲۶۳	۱/۱۵۶۰۵
۱۴	۱	۴۰	۶۳۰	۵	۲۷/۹۴۹۰	۱/۲۷۶۷۶
۱۵	۱	۸۰	۳۱۵	۴	۶۷/۶۶۵۹	۱/۶۴۹۰۰
۱۶	۱	۱۲۵	۳۱۵	۴	۸۷/۷۶۹۵	۱/۸۶۷۷۹

همانگونه که در بخش آزمایش‌ها اشاره شد هر تست سه بار تکرار شده و مقادیر میانگین آن ارائه شده است. برای محاسبه فاکتور جدایش لایه‌ای، نمونه‌ها پس از سوراخ‌کاری به کمک اسکنر دیجیتال با رزولوشن ۳۰۰۰ dpi اسکن شدند. سپس مساحت ناحیه خرابی (Ad) و ماکزیمم قطر ناحیه خرابی (Dmax) اندازه‌گیری شد. نهایتاً با توجه به رابطه (۲) فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده محاسبه شده، که در شکل ۵ ناحیه خرابی ۱۶ آزمایش نمایش داده شده است. در شکل ۵ شماره گذاری بر حسب جدول ۴ می‌باشد، بدین صورت که شماره (۱) در شکل ۵ دارای درصد وزنی (۰)، نرخ پیشروی (۱۲mm/min)، و سرعت اسپیندل (۳۱۵rpm) و قطر (۴mm) می‌باشد. نتایج آورده شده در جدول ۴ نشان می‌دهند با افزایش نیروی محوری، میزان خرابی ایجاد شده افزایش می‌یابد که در نتیجه فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده نیز افزایش می‌یابد. همچنین از مقادیر این جدول قابل تشخیص می‌باشد که مقدار بهینه پارامترها در آزمایش ۹ رخ داده است.

۴-۳- آنالیز پاسخ سطح

آنالیز پاسخ سطح^۱ برای تاثیر هم‌زمان دو پارامتر نظیر نرخ پیشروی، درصد وزنی نانو و سرعت اسپیندل، بر مقادیر پاسخ در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که مقادیر نوشته شده در محورهای افقی و عمودی شکل‌ها، تراز پارامترها را نشان می‌دهد که در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۹ تاثیر نرخ پیشروی و درصد وزنی نانو لوله کربنی بر الف) نیروی محوری (ب) فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده

شکل ۸ تاثیر نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر الف) نیروی محوری (ب) فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده

۵-۳- آنالیز رگرسیون

در جدول‌های ۵ و ۶ مقادیر مرتبط با رگرسیون نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای بر حسب پارامترهای سوراخ کاری آورده شده است. که در آن‌ها (Coef) ضرایب معادله و (SE Coef) خطای استاندارد هر یک از تخمین‌ها می‌باشد.

(T-Value) یک پارامتر واسط بوده که برای به‌دست آوردن (P-value) استفاده می‌شود و از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید.

$$T - Value = \frac{Coef}{SE Coef} \quad (10)$$

(P-Value)، در واقع میزان وابستگی پارامترهای معادله به مقادیر پاسخ را دارد و هر یک از پارامترها که مقدار آن کمتر از ۰/۰۰۵ باشد نشان دهنده وابستگی شدید این پارامتر به مقادیر پاسخ را دارد. معادلات نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده در معادله‌های (۱۱) و (۱۲) آورده شده است.

$$F_{th} = 22.23 + 1.57W + 16.43F - 18.12S \quad (11)$$

$$F_{da} = 1.2192 + 0.0141W + 1/0610F - 1/0719S \quad (12)$$

همان‌طور که در نمودارهای SN، شکل ۵ و ۶ مشخص شد، تغییر قطر مته تاثیر زیادی بر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای ندارد به همین دلیل در رگرسیون از این فاکتور صرف نظر شده است.

شکل ۸ تاثیر نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل را بر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص می‌باشد، نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای با افزایش میزان پیشروی و همچنین کاهش سرعت اسپیندل در وضعیت بحرانی قرار دارند. شکل ۹ تاثیر نرخ پیشروی و درصد وزنی نانو لوله کربنی را روی نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای نشان می‌دهد.

همان‌طور که می‌توان دید با افزایش مقدار نانو کامپوزیت تا درصدی مشخص که در حدود ۰/۵ درصد می‌باشد، مقادیر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای کاهش می‌یابد و پس از آن دوباره این مقادیر افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد، مقدار ایده‌آل برای درصد وزنی نانو لوله کربنی، از لحاظ افزایش نرخ پیشروی و کاهش جدایش بین لایه‌ای در نزدیکی تراز ۳ (مقدار ۰/۵ درصد وزنی) اتفاق می‌افتد. منظور از مقدار ایده‌آل این می‌باشد که بتوان نرخ پیشروی را افزایش داد در حالی که مقدار خرابی یا همان فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده افزایش نیابد.

1. Response Surface Analysis

۶- مراجع

- [1] Durao, L.M.P. Tavares, J. M. R. S. de Albuquerque, V. H. C. and Goncalves, D. J. S., "Damage Evaluation Of Drilled Carbon/Epoxy Laminates Based On Area Assessment Methods", Composite Structures, Vol. 96, pp. 576-583, 2013.
- [2] Velayudham, A. Krishnamurthy, R. and Soundarapandian, T., "Evaluation Of Drilling Characteristics Of High Volume Fraction Fibre Glass Reinforced Polymeric Composite", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, No. 4-5, pp. 399-406, 2005.
- [3] Akbari, S. Taheri-Behrooz, F. and Shokrieh, M.M., "Characterization Of Residual Stresses In A Thin-Walled Filament Wound Carbon / Epoxy Ring Using Incremental Hole Drilling Method", Composites Science and Technology, Vol.94, pp.8-15, 2014.
- [4] Liu, D. Tang, Y. and Cong, W. L., "A Review Of Mechanical Drilling For Composite Laminates", Composite Structures, Vol. 94, No. 4, pp. 1265-1279, 2012.
- [5] Lachaud, F. Piquet, R. Collombet, F. and Surcin, L., "Drilling Of Composite Structures, Composite Structures", Vol. 52, No. 3-4, pp. 511-516, 2001.
- [6] Davim, J. P. and Reis, P., "Study Of Delamination In Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Design Experiments", Composite Structures, Vol. 59, No. 4, pp. 481-487, 2003.
- [7] Lazar, M.B. and Xirouchakis, P., "Experimental Analysis Of Drilling Fiber Reinforced Composites", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 51, No. 12, pp. 937-946, 2011.
- [8] Campos Rubio, J. Abrao, A.M. Faria, P.E. Correia, A.E. and Davim, J.P., "Effects Of High Speed In The Drilling Of Glass Fibre Reinforced Plastic: Evaluation Of The Delamination Factor", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, No. 6, pp. 715-720, 2008.
- [9] Sonkar, V. Abhishek, K. Datta, S. and Mahapatra, S.S., "Multi-Objective Optimization In Drilling Of GFRP Composites: A Degree Of Similarity Approach", Procedia Materials Science, Vol. 6, pp. 538-54, 2014.
- [10] Mohan, N.S. Kulkarni, S.M. and Ramachandra, A., "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.
- [11] Hocheng, H. and Tsao, C.C., "Effects Of Special Drill Bits On Drilling-Induced Delamination Of Composite Materials", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1403-1416, 2006.
- [12] Durao, L.M.P. Goncalves, D.J.S. Tavares, J. M.R.S. de Albuquerque, V.H.C. Aguiar Vieira, A. and Torres Marques, A., "Drilling Tool Geometry Evaluation For Reinforced Composite Laminates", Composite Structures, Vol. 92, No. 7, pp. 1545-1550, 2010.
- [13] Grilo, T.J. Paulo, R.M.F. Silva, C.R.M. and Davim, J.P., "Experimental Delamination Analyses Of Cfrps Using Different Drill Geometries", Composites Part B: Engineering, Vol. 45, No. 1, pp. 1344-1350, 2013.
- [13] Grilo, T.J. Paulo, R.M.F. Silva, C.R.M. and Davim, J.P., "Experimental Delamination Analyses Of Cfrps Using Different Drill Geometries", Composites Part B: Engineering, Vol. 45, No. 1, pp. 1344-1350, 2013.
- [14] Heidary, H. Zarif Karimi, N. Ahmadi Najafabadi, M. and Rahimi, A., "Study of the Effect of Machining Parameters on Drilling of Composite Materials and Monitoring of Process by Acoustic Emission", In Persian, Vol. 24, No. 2, 2013
- [15] Azmi, A.I., "Monitoring Of Tool Wear Using Measured Machining Forces And Neuro-Fuzzy Modelling Approaches During Machining Of GFRP Composites", Advances in Engineering Software, Vol. 82, pp. 53-64, 2015.
- [16] Varatharajan, R. Malhotra, S.K. Vijayaraghavan, L. and Krishnamurthy, R., "Mechanical And Machining Characteristics Of GF/PP And GF/Polyester Composites", Materials Science and Engineering: B, Vol. 132, No. 1-2, pp. 134-137, 2006.
- [17] Khashaba, U.A., "Delamination In Drilling GFR-Thermoset Composites", Composite Structures, Vol. 63, No. 3-4, pp. 313-327, 2004.
- [18] Khashaba, U.A. Seif, M.A. and Elhamid, M.A., "Drilling Analysis Of Chopped Composites", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 1, pp. 61-70, 2007.
- [19] Capello, E., "Workpiece Damping And Its Effect On Delamination Damage In Drilling Thin Composite Laminates", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 148, No. 2, pp. 186-195, 2004.
- [20] Tsao, C.C. Hocheng, H. and Chen, Y.C., "Delamination Reduction In Drilling Composite Materials By Active Backup Force", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 61, No. 1, pp. 91-94, 2012.
- [21] Karnik, S.R. Gaitonde, V.N. Rubio, J.C. Correia, A.E. Abrao, A.M. and Davim, J.P., "Delamination Analysis In High Speed Drilling Of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Artificial Neural Network Model", Materials & Design, Vol. 29, No. 9, pp. 1768-1776, 2008.
- [22] Baur, J. and Silverman, E., "Challenges And Opportunities For Nanotechnology In Multi-Functional Composite Structures (Preprint)", DTIC Document, 2006.
- [23] Biercuk, M. Llaguno, M. C. Radosavljevic, M. Hyun, J. Johnson, A.T. and Fischer, J.E., "Carbon Nanotube Composites For Thermal Management", Applied physics letters, Vol. 80, No. 15, pp. 2767-2769, 2002.
- [24] Gojny, F.H. Wichmann, M.H.G. Fiedler, B. Kinloch, I.A. Bauhofer, W. Windle, A.H. and Schulte, K., "Evaluation And Identification Of Electrical

جدول ۵ رگرسیون خطی، نیروی محوری

پارامترها	نماد	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
ثابت	-	۲۲/۲۳	۹/۷۹	۲/۲۷	۰/۰۴۲	-
درصد نانو	W	۱/۵۷	۱/۹۶	۰/۸۰	۰/۴۴۰	۱
نرخ پیشروی	F	۱۶/۴۳	۱/۹۶	۸/۳۹	۰/۰۰۰	۱
سرعت اسپیندل	S	۱۸/۱۲	۴/۳۸	-۴/۱۴	۰/۰۰۱	۱

جدول ۶ رگرسیون خطی، فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده

پارامترها	نماد	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
ثابت	-	۱/۲۱۹۲	۰/۰۹۵۲	۱۲/۸۱	۰/۰۰۰	-
درصد نانو	W	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۹۰	۰/۷۴	۰/۴۷۳	۱
نرخ پیشروی	F	۰/۱۶۱۰	۰/۰۱۹۰	۸/۴۵	۰/۰۰۰	۱
سرعت اسپیندل	S	-۰/۱۷۱۹	۰/۰۴۲۶	-۴/۰۴	۰/۰۰۲	۱

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهای درصد وزنی نانو، نرخ پیشروی، سرعت برشی و قطر مته بر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده با استفاده از روش طراحی آزمایش به روش تاگوچی بررسی شده است. نتایج به‌طور خلاصه در ادامه آورده شده است.

- دیاگرام مقادیر نیروی محوری از زمان ورود مته به قطعه کار تا زمان خروج آن رسم شده و مورد تحلیل قرار گرفته شده است، همچنین از مقادیر به‌دست آمده‌ی نیرو محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده مشخص شده است که با افزایش نیروی محوری، مقدار فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده نیز افزایش می‌یابد.
- نمودارهای SN میزان وابستگی مقادیر پاسخ را به فاکتورهای مورد بررسی بیان می‌نماید. بر اساس نتایج آن، نرخ پیشروی بیشترین تاثیر را بر مقادیر پاسخ (نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده) دارد و بعد از آن به ترتیب سرعت اسپیندل و درصد وزنی نانو لوله اصلاح شده، تاثیرگذار می‌باشند. همان‌طور که پیش بینی می‌شد تغییر قطر مته یک پارامتر مستقل می‌باشد که تاثیر آن بر مقادیر پاسخ ناچیز بوده و قابل اغماض می‌باشد.
- آنالیز پاسخ سطح نمایانگر این موضوع می‌باشد که با کاهش نرخ پیشروی (تراز ۱) و افزایش سرعت اسپیندل (تراز ۲)، نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده کاهش می‌یابد. همچنین درصد وزنی نانو لوله کربنی، دارای یک مقدار بهینه در میانه می‌باشد که این مقدار بهینه نزدیک به ۰/۵ درصد (تراز ۳) می‌باشد (به ازای نرخ پیشروی ۱۲mm/min و سرعت برشی ۶۳۰rpm)، یعنی با افزایش درصد وزنی نانو تا حوالی ۰/۵ درصد، مقادیر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده کاهش می‌یابد و افزایش بیشتر درصد وزنی باعث افزایش مقادیر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای اصلاح شده می‌شود.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس و سازمان صنایع هوایی به‌ویژه آقای دکتر صالح راسخ جهت تهیه نمونه‌های کامپوزیتی و مشاوره‌های صنعتی، کمال تشکر را دارند.

- And Thermal Conduction Mechanisms In Carbon Nanotube/Epoxy Composites", Polymer, Vol. 47, No. 6, pp. 2036-2045, 2006.
- [25] Shekar, K.C. Prasad, B.A. and Prasad, N.E., "Interlaminar Shear Strength Of Multi-Walled Carbon Nanotube And Carbon Fiber Reinforced, Epoxy - Matrix Hybrid Composite", Procedia Materials Science, Vol. 6, pp. 1336-1343, 2014.
- [26] Li, N. Li, Y. Zhou, J. He, Y. and Hao, X., "Drilling Delamination And Thermal Damage Of Carbon Nanotube/Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites Processed By Microwave Curing", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 97, pp. 11-17, 2015.
- [27] Davim, J.P. R. and Abrao, A.M., "A Novel Approach Based On Digital Image Analysis To Evaluate The Delamination Factor After Drilling Composite Laminates", Composites Science and Technology, Vol. 67, No. 9, pp. 1939-1945, 2007.
- [28] Zarif Karimi, N. Heidary, H. and Ahmadi, M., "Residual Tensile Strength Monitoring Of Drilled Composite Materials By Acoustic Emission", Materials & Design, Vol. 40, pp. 229-236, 2012.
- [29] Mishra, R. Malik, J. Singh, I. and Davim, J.P., "Neural Network Approach For Estimating The Residual Tensile Strength After Drilling In Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Plastic Laminates", Materials & Design, Vol. 31, No. 6, pp. 2790-2795, 2010.
- [30] Kilickap, E., "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.
- [31] Vankanti, V.K. and Ganta, V., "Optimization Of Process Parameters In Drilling Of GFRP Composite Using Taguchi Method", Journal of Materials Research and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 35-41, 2014.
- [32] sunny, T. Babu, J. and Philip, J., "Experimental Studies On Effect Of Process Parameters On Delamination In Drilling GFRP Composites Using Taguchi Method", Procedia Materials Science, Vol. 6, pp. 1131-114, 2014.
- [33] Sadeghi, M. and Pol, M.H., "Experimental Investigation Of The Effect Of The Addition Of Carbon Nanotubes On The Quasi-Static Punch Shear Penetration Of The Laminated Glass/Epoxy Composite", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 416-424, 2015.