



نشیه علمی پژوهشی

کامپوزیت

علوم و فناوری

http://jstc.iust.ac.ir



بررسی تجربی و بهینه سازی پارامترهای موثر در فرآیند سوراخ کاری قطعات کامپوزیتی الیاف شیشه- اپوکسی

محمد جواد خداپرست¹، رضا آذرافزا^{2*}، عباس وفایی صفت³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

2- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

* شهر، صندوق پستی 15875-1774، azarmut@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 1399/12/20

پذیرش: 1400/04/17

کلیدواژگان:

کامپوزیت
تورق
سوراخکاری
بهینه سازی
استحکام

چکیده

فرآیند سوراخ کاری قطعات کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی همواره با عیوبی نظیر پدیده تورق یا جدایش بین لایه‌ای همراه می‌باشد. این پدیده باعث کاهش استحکام ورق‌های کامپوزیتی می‌شود. در این تحقیق، برای به حداقل رساندن این عیب پارامترهای تاثیرگذاری شامل سرعت پیشروی، قطر ابزار، ضخامت، زاویه راس ابزار، سرعت دورانی، نوع لایه چینی الیاف و خنک کار مورد بررسی قرار گرفتند. تعداد آزمایش‌ها بر اساس روش طراحی آزمایش تاگوچی مشخص شده و مطالعه تجربی بر روی فرآیند سوراخکاری قطعه کامپوزیتی به منظور بررسی میزان تورق انجام گردید. سپس سوراخ‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری ویدیویی اسکن و میزان تورق موجود در آنها با در نظر گرفتن قطر سوراخ‌ها محاسبه شده‌اند. سپس اطلاعات جمع آوری شده جهت بهینه نمودن پارامترها با استفاده از آنالیز واریانس مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. نتایج نشان داد سرعت پیشروی با مقدار 29.6% و سرعت دورانی با مقدار 24%، بیشترین اثر را بر میزان تورق داشته به طوری که با افزایش نرخ پیشروی میزان تورق افزایش و با افزایش سرعت دورانی، تورق ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. همچنین نمونه‌های سوراخ شده جهت بررسی اثر تورق بر استحکام کششی و ضریب تمرکز تنش تحت تست کششی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان تورق، میانگین استحکام کششی و ضریب تمرکز تنش قطعات سوراخ‌دار نسبت به نمونه سالم (بدون سوراخ) به ترتیب 34% کاهش و 51.66% افزایش یافته‌اند. همچنین با 1.22 برابر شدن تورق نسبت به تورق نمونه اولیه، ضریب تمرکز تنش 6.9% افزایش و استحکام کششی 6.5% کاهش یافته‌اند.

Experimental Study and Optimization of Effective Drilling Parameters on Fibers Glass-Epoxy Composite

Mohammad Javad Khodaparast¹, Reza Azarafza^{2*}, Abas Vafaeseefat³

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

2- Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Emam Hossein University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, azarmut@mut.ac.ir.

Keywords

Composite
Delamination
Drilling
Optimization
Strength

Abstract

Drilling process of Fibers Glass-epoxy composites is always associated with defects such as interlayer delamination phenomenon. This phenomenon reduces the strength of composite panels. In this study, to minimize this defect, the effective parameters including feed rate, tool diameter, thickness, edge tool angle, rotational speed, orientation fibers and coolant were studied. The number of experiments was specified based on Taguchi's design of experiments method and Experimental study was performed on the drilling process of the composite to evaluate the amount of delamination. Then holes were scanned by a Video Measuring machine (VMM) and amount delamination in them has been calculated by considering hole diameter. The collected data were used to statistically analyze and optimize the drilling parameters using variance analysis (ANOVA). The results showed that feed rate with a 29.6% and rotational speed with 24% had greatest influence on the delamination, so that with increasing the feed rate delamination was increased and with increase in rotational speed, delamination is first increased and then decreased. Also to investigation of the effect of delamination on the tensile strength of composite and stress concentration coefficient, specimens were subjected to tensile test. The results showed that with increasing delamination, the average tensile strength and stress concentration coefficient of perforated parts compared to healthy specimen (without hole), 34% decreased and 51.66% increased respectively. Also with 1.22 times the delamination compared to the delamination of initial sample, tensile strength 6.5% decreased and stress concentration coefficient 6.9 increased.

1- مقدمه

شده‌اند. بیشترین کامپوزیت‌های مورد استفاده در صنایع از نوع الیاف شیشه-

اپوکسی هستند. این مواد اغلب در صنایعی نظیر کشتی سازی، حمل و نقل و

کامپوزیت‌ها از ترکیب دو یا چند ماده به منظور دستیابی به خواص بهتر ساخته

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Khodaparast, M., Azarafza, R., and Vafaeseefat, A., "Experimental Study and Optimization of Effective Drilling Parameters on Fibers Glass-Epoxy Composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1411-1420, 2021.

افزایش می‌یابند که دلیل آن افزایش در سطح برشی است. البته میزان تاثیر نرخ پیشروی بر این دو متغیر بیشتر است [12]. امینی و همکاران مطالعه آماری تاثیر شرایط مختلف ماشینکاری بر میزان لایه زدگی در سوراخ کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن را انجام داده و نشان دادند که افزایش سرعت دورانی در فرآیند سوراخ کاری مافوق صوت دوار، موجب کاهش مقدار لایه زدگی در ورودی سوراخ می‌گردد. همچنین نشان دادند که افزایش مقدار سرعت پیشروی در این فرآیند موجب افت کیفیت سطحی سوراخ شده و مقدار لایه زدگی را افزایش می‌دهد [13]. کاپلو تخریب تورق ناشی از سرعت پیشروی را بحرانی‌ترین عیبی اعلام نمود که می‌تواند به سبب عملیات ماشین کاری در قطعه کامپوزیتی ایجاد شود. زیرا این فرآیند به شدت به عملکرد قطعه ساخته شده لطمه می‌زند [14]. حکیمی و امینی میزان ورقه ورقه شدن در فرآیند فرزکاری ماریچ بر روی کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن را بررسی کردند و نشان دادند که میزان ورقه ورقه شدن رابطه مستقیم با نیروی محوری در طی عملیات ماشین کاری دارد [15].

صابری و همکاران تحلیل تجربی و فرکانسی اثر پارامترهای برشی و روانکاری بر کیفیت سطح و تغییرات برشی در ماشینکاری کامپوزیت پایه تیتانیومی را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش سرعت برشی در حالت ماشین کاری خشک، پیک مربوط به فرکانس سرعت دورانی قطعه کار با کاهش دامنه همراه است [16]. آگوا و مگاهد بهینه سازی چند منظوره پارامترهای برش در سوراخکاری کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه را به منظور مینیمم‌سازی تورق با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی جدید انجام داده و نشان دادند که سرعت دورانی بالا و سرعت پیشروی کم، پارامترهای بهینه برای اکثر متغیرهای پاسخ سوراخکاری می‌باشند [17]. آپاتوری و نیماگادا به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند سوراخکاری مورد استفاده در ماشینکاری کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند. نتایج تحلیلی آنها نشان داد که قطر مته و سرعت، بر تورق موثرترند و قطر مته و پیشروی پارامترهای موثر بر نیرو و ممان می‌باشند [18].

در تحقیقات قبلی حداکثر اثر 5 پارامتر بر میزان تورق کامپوزیت‌ها و بهینه‌کردن آن بررسی شده‌است. در این پژوهش برای کمتر نمودن میزان تورق، اثر 7 پارامتر تاثیرگذار، نظیر سرعت پیشروی، سرعت دورانی، استفاده از روانکار، لایه چینی، زاویه راس مته، ضخامت قطعه و قطر ابزار در فرآیند سوراخ کاری بررسی شده و نسبت به بهینه نمودن شرایط آزمایش‌ها که نتیجه آن میزان تورق کمتر و کیفیت سطح بهتر می‌باشد، عمل شده‌است. در نهایت تاثیر میزان تورق بر استحکام کششی و ضریب تمرکز تنش بررسی شده‌است.

2- روش تحقیق

2-1- مواد، ابزارها و تهیه نمونه‌ها

نمونه‌های کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه-اپوکسی با 5 سر حجمی 60 درصد الیاف با روش دستی ساخته شده‌اند. بر اساس استاندارد ASTM-D790-96 ابعاد نمونه‌های اول $310 \times 290 \text{ mm}^2$ با ضخامت 10 میلیمتر که شامل 50 لایه و ابعاد نمونه‌های دومی $20 \times 18 \text{ mm}^2$ و ضخامت 5 میلیمتر که شامل 25 لایه می‌باشند. الیاف مورد استفاده، الیاف شیشه بافته شده به صورت حصیری 200 گرمی از نوع E-Glass و رزین از نوع اپوکسی ML506 با نسبت وزنی 15% سخت کننده از نوع HA-11 می‌باشند. لایه چینی‌ها به ترتیب $[0/90]_{25}$ و $[0/90]_{25}$ می‌باشند.

هواضا جهت مونتاژ قطعات بکارگیری می‌شوند و سوراخ کاری از جمله روش‌های رایج برای ایجاد اتصال بین سازه‌های کامپوزیتی می‌باشد. برخلاف فلزات، کامپوزیت‌ها غیرهمگن هستند و یکی از مهمترین چالش‌ها و عیوبی که در حین سوراخ کاری برای آنها اتفاق می‌افتد، پدیده تورق یا جدایش بین لایه‌ها می‌باشد که منجر به لایه لایه شدن صفحات شده و صافی سطح و استحکام قطعات را کاهش می‌دهد. تورق می‌تواند در هر زمان از عمر کاری قطعه و به دلایل متعدد رخ دهد. تخریب‌های دیگری نظیر پلیسه داشتن لبه‌ها و بیرون کشیدگی الیاف در سطوح سوراخ کاری شده کامپوزیت‌ها ممکن است در قطعه کامپوزیتی به وجود آید. اما بین تخریب‌های حاصل از سوراخ کاری، تورق بحرانی‌ترین عیب، تشخیص داده شده که منجر به کاهش دوام قطعه کامپوزیتی، کاهش استحکام و یکپارچگی کمتر در ساختار قطعه کامپوزیتی می‌گردد [1,2].

با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات زیادی در مورد پارامترهای موثر بر سوراخکاری انجام شده است که در زیر به آنها اشاره شده است. طبق گزارش خشایا تورق به دو نوع ورودی (ورود مته به قطعه کار) و خروجی (خروج مته از قطعه کار) دسته بندی می‌شود. تورق خروجی، از ورودی بیشتر می‌باشد، زیرا وقتی مته به انتهای مسیر خود نزدیک می‌شود، ضخامت بریده نشده‌ی ورق کوچکتر شده و در یک ضخامت بحرانی، تنش خمشی بزرگ‌تر از استحکام میان لایه‌ای می‌شود. لذا ترک‌های بین لایه‌ای در اطراف سوراخ ایجاد شده و باعث تورق بیشتر می‌گردند. وی دلیل رد شدن حدود 60 درصد قطعات تولید شده در صنایع هوایی را ناشی از تورق حاصل از سوراخ کاری بیان کرد [3].

بر اساس گزارش کریمی و همکاران، برای کمتر نمودن میزان تورق می‌بایست مقدار نیروی محوری سوراخ کاری را در حداقل ممکن نگه داشت [4]. آگوا و همکاران، سوراخ کاری یک پلاستیک تقویت شده با الیاف شیشه را به وسیله یک مته به قطر 1 میلیمتر و از جنس کارباید سمانته بررسی نمودند و دریافتند که اگر قبل از سوراخ کاری از پیش مته‌ای به قطر 0.4 میلیمتر استفاده گردد، نیروی محوری سوراخ کاری در هنگام استفاده از مته‌ای به قطر 1 میلیمتر، به طور جدی کاهش می‌یابد [5]. تساو و همکاران نشان دادند که با افزایش میزان ضخامت قطعه نیروهای ماشین کاری و ارتعاشات بیشتر شده و برای کاهش ارتعاشات در سوراخ کاری، استفاده از صفحه پشتیبان را پیشنهاد دادند [6]. جمال شیخ احمد سرعت پیشروی را، یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر تورق ناشی از سوراخ کاری اعلام نمود [7]. تاسکسن و کاتوئودی نتیجه ضریب هدایت حرارتی پایین در کامپوزیت‌ها را حرارت زیاد بین ابزار و قطعه (که منجر به تخریب، سوختگی قطعه و ساییده شدن ابزاری می‌شود) بیان نمودند و لذا پیشنهاد استفاده از ابزارهای مقاوم‌تر را مطرح نمودند [8]. سهامی پور دهقان و حیدری اثر پارامترهای سوراخکاری بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای، برای لوله‌های کامپوزیتی که به روش دستی تولید شده‌اند را به کمک روش طراحی عاملی بررسی کردند و نشان دادند، اگر لرزش در قطعه کار ایجاد نشود میزان فاکتور جدایش به حداقل اندازه ممکن می‌رسد. [9].

محمدی و همکاران با استفاده از روش مدل‌های خرابی مکانیک محیط پیوسته، ثابت نمودند که با افزایش قطر سوراخ، استحکام کششی کاهش و شروع و نمایش گسترش آسیب در لایه‌ها از مقدار صفر به صورت پیوسته رشد می‌نماید [10]. زولاگا نیز با استفاده از آنالیز المان محدود ثابت نمود که از نقاط بحرانی و نقاطی که لایه لایه شدن بیشتر باشد، گسترش خرابی افزایش و قطعه زودتر دچار شکست می‌شود [11]. سونباتی و همکاران نشان دادند با افزایش کسر حجمی الیاف، خصوصیات مکانیکی قطعه افزایش یافته و مقاومت برشی آن هم بیشتر می‌گردد، بنابراین نیروی محوری در حین سوراخ کاری زیادتر می‌شود. همچنین نیروی محوری و گشتاور با افزایش قطر مته و نرخ پیشروی

2-2- طراحی آزمایش

در این پژوهش برای بررسی تاثیر استفاده همزمان از هفت پارامتر سرعت پیه شروی، سرعت دورانی، زاویه راس، قطر مته و اثرات پارامترهایی مانند، روانکار، ضخامت و لایه چینی بر میزان تورق، تعداد 432 آزمایش نیاز بوده که هزینه و زمان زیاد را می گیرد، لذا با استفاده از روش تاگوچی که در تحلیل های مهندسی بطور گسترده استفاده می شود، برای تعیین سهم و تاثیرگذاری پارامترها با انجام آزمایشات محدودتر برای تعیین تعداد درجات آزادی کل پارامترها طبق رابطه (1) تعداد 10 درجه آزادی بدست آمد.

$$Dof = N - 1 \quad (1)$$

در این رابطه N تعداد سطوح هر پارامتر در آزمایش و Dof تعداد درجات آزادی می باشد. تعداد 6 خطا نیز در نرم افزار مینیتب¹ بدست آمد که طبق رابطه (2) در نهایت 17 آزمایش استخراج گردید.

$$N_T = \sum DOF + Error + 1 \quad (2)$$

در این رابطه N_T تعداد کل آزمایشات انجام شده و Error میزان خطای بدست آمده در نرم افزار می باشد. پس از تعیین 17 شرایط مختلف آزمایش و بر اساس استاندارد ASTM3039، با استفاده از دستگاه فرز CNC فرآیند سوراخ کاری مطابق شکل 1 و 2 انجام گردید.

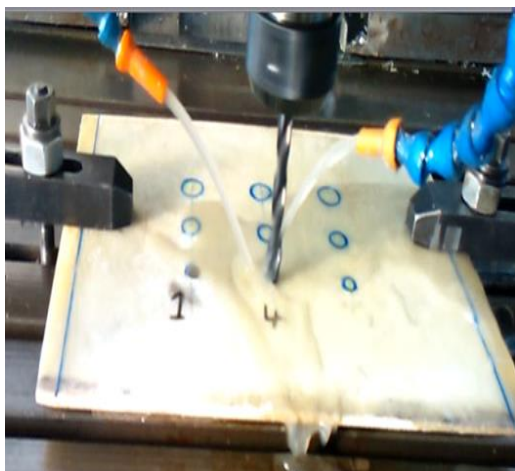


Fig. 2 Drilling with coolant

شکل 2 سوراخ کاری با روانکار



Fig. 3 Measurement of diameter with three points around the hole by VMM

شکل 3 اندازه گیری قطر با سه نقطه حول سوراخ توسط VMM

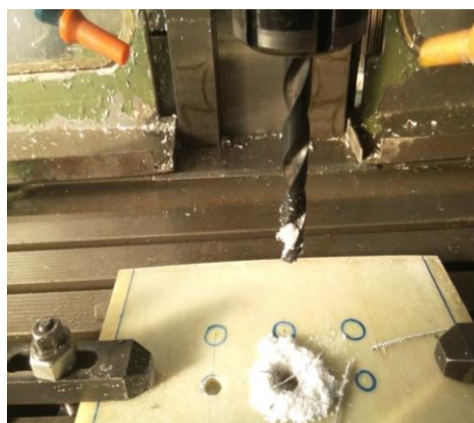


Fig. 1 Drilling without coolant

شکل 1 سوراخ کاری بدون روانکار

در ادامه جهت بررسی تاثیر هندسه مته، شش ابزار از جنس فولاد تندبر با قطرهای 5، 10 و 15 میلیمتر و زوایای راس 120 و 140 درجه آماده شدند. برای بررسی تاثیر پارامترهای سوراخکاری، از سه سرعت دورانی و سه سرعت پیه شروی و با استفاده از روانکار و بدون آن، استفاده شده که مقادیر آنها در جدول 1 نشان داده شده اند.

در ادامه با انتخاب 3 نقطه حول بیشترین قطر بدست آمده از تخریب، مطابق شکل 3، مقدار D_{max} نمونه های سوراخ کاری شده و قطر سوراخ (D_h)، توسط دستگاه اندازه گیری ویدیویی (VMM) بدست آمدند. همچنین برای بررسی اثر میزان تورق بر استحکام کششی و ضریب تمرکز تنش، 5 نمونه با مته ای به قطر 10 میلیمتر تحت شرایط بهینه، سوراخ کاری شدند و مطابق شکل 4 تحت آزمایش کششی قرار گرفتند.

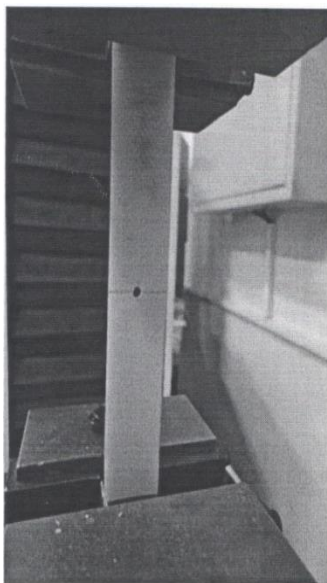


Fig. 4 Perforated piece under tensile load

شکل 4 قطعه سوراخ دار تحت بار کششی

¹ Minitab

² Video Measurement Machine(VMM)

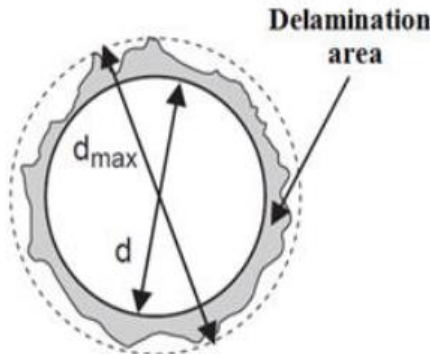
جدول 1 مقادیر لحاظ شده برای هریک از پارامترها

f(mm/min)	V(rpm)	t(mm)	d(mm)	α (deg)	Orientation	Coolant	فاکتورها
سرعت پیشروی	سرعت دورانی	ضخامت	قطر مته	زاویه راس	لایه بندی	خنک کار	
150	800	5	10	140	[0/90] ₂₅	without	سطح 1
300	1600	10	15	120	[(0/90) ₂ /45] ₅	With	سطح 2
450	2400	---	20	---	-----	-----	سطح 3

Table 1 Values provided for each of the parameters

3- نتایج و بحث

همانطوریکه قبلاً اشاره شد، تورق بحرانی ترین عیب، در سوراخکاری کامپوزیت-ها تشخیص داده شده است. تورق در ورودی و خروجی سوراخ، مکانیزم جداگانه ای دارد. تورق در ورودی به هنگام ورود مته به داخل قطعه کار ایجاد می شود. در شکل 5، بعد از اینکه لبه برشی مته با قطعه کار تماس برقرار می کند، نیروی برشی فعال در جهت محیطی، نیروی محرکه ای برای ایجاد تورق خواهد بود. این نیرو، تولید یک نیروی جدا کننده بین لایه ها در سراسر لبه برشی مته نموده که منجر به جدایش لایه ها از یکدیگر و تشکیل یک ناحیه تورق در سطح بالایی ورق کامپوزیتی می شود. تورق در خروجی، هنگامی که مته به انتها نزدیک می شود، ضخامت بریده نشده کوچکتر شده و مقاومت آن در مقابل تغییر شکل نیز کمتر می شود. به محض اینکه بارگذاری در تعدادی از نقاط، از استحکام اتصال بین لایه های تجاوز نماید تورق رخ می دهد. نکته قابل توجه این است که تورق در ورق، قبل از اینکه ورق به طور کامل توسط مته سوراخ شود حادث می شود که شکل 6 نمونه ای از این تورق را نشان می دهد [3].

Fig. 7 D_{max} is largest diameter and D_o drill diameter [13]شکل 7 D_{max} بزرگترین قطر D_o قطر مته [13]

در این پژوهش برای اندازه گیری معیار تورق، همانطور که در قبل اشاره شد، قطر سوراخ (D_o) و بزرگترین قطر تخریب D_{max} برای هر قطعه مشخص بدست آمد. با تقسیم D_{max} بر قطر سوراخ، مقدار تورق برای هر سوراخ مشخص شد که مقدار آنها برای 17 آزمایش (که از روش تاگچی بدست آمده اند) در جدول 2 نشان داده شده است. در ادامه نمودار رگرسیون هر یک از پارامترهای مورد بررسی، به صورت جداگانه رسم شده و مورد بررسی قرار گرفته اند.

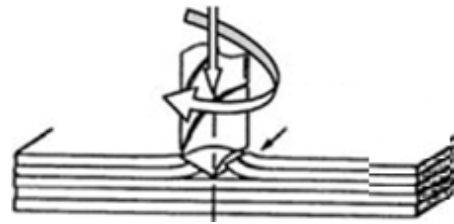


Fig. 5 Delamination at the entrance of the drill [3]

شکل 5 مکانیزم تورق در ورود مته [3]

3-1- اثر سرعت پیشروی بر میزان تورق

شکل 8 تاثیر میزان سرعت پیشروی بر میزان تورق را نشان می دهد. همانطوریکه مشاهده می شود، با افزایش سرعت پیشروی، مقدار تورق، بعلا افزایش نیروی محوری و زمان کمتر جهت براده برداری، افزایش یافته است. زیرا مته مانند سنبه عمل نموده و در واقع در راستای سوراخ هل داده می شود، بنابراین ابزار به جای براده برداری شروع به کندن می نماید که نتیجه آن لایه لایه شدن کامپوزیت و افزایش میزان تورق را در بردارد.

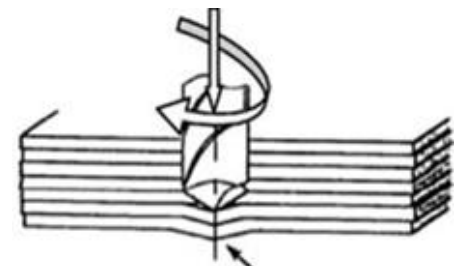


Fig. 6 Delamination at the exit of the drill [3]

شکل 6 مکانیزم تورق در خروج مته [3]

3-2- اثر سرعت دورانی بر میزان تورق

شکل 9 تاثیر سرعت دورانی بر تورق را نشان می دهد. همانطوریکه می شود، از سرعت 800 تا 1600 دور بر دقیقه مقدار تورق افزایش یافته و پس از آن کم شده است. دلیل این امر ناشی از توانایی و قدرت باربرداری مته در سرعت پیشروی بالا می باشد. بنابراین بهتر است با افزایش سرعت پیشروی، سرعت دورانی را نیز افزایش داد تا مته زمان و قدرت کافی جهت باربرداری را داشته و تورق کاهش یابد. همچنین افزایش سرعت دورانی باعث کاهش نیرو می شود [13]. بنابراین نیرو و ممان کمتری بر الیاف وارد شده و محدوده تورق کاهش یافته است.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_o} \quad (3)$$

جدول 2 تعیین 17 نمونه آزمایش

Table 2 Seventeen pattern for Experiment

F_d	f(mm/min)	V(rpm)	d(mm)	t(mm)	α (deg)	Orientation	Coolant	Experiment
میزان تورق	سرعت پیشروی	سرعت دورانی	قطر مته	ضخامت	زاویه راس	لایه بندی	خنک کار	شماره آزمایش
1.120	300	1600	15	5	120	[0/90] ₁₂	without	1
1.166	450	2400	10	5	140	[0/90] ₁₂	without	2
1.032	150	800	20	5	140	[0/90] ₁₂	without	3
1.150	150	1600	15	10	140	[0/90] ₂₅	without	4
1.153	300	800	20	10	120	[0/90] ₂₅	without	5
1.153	150	1600	10	5	140	[(0/90) ₂ /45] ₅	without	6
1.150	450	800	15	5	140	[(0/90) ₂ /45] ₅	without	7
1.068	300	2400	20	5	140	[(0/90) ₂ /45] ₅	without	8
1.120	450	800	15	10	140	[0/90] ₂₅	without	9
1.013	150	2400	20	10	140	[0/90] ₂₅	with	10
1.085	300	1600	10	5	140	[0/90] ₁₂	with	11
1.240	450	1600	20	10	120	[0/90] ₂₅	With	12
1.087	150	2400	15	5	120	[(0/90) ₂ /45] ₅	With	13
1.165	450	1600	20	5	120	[(0/90) ₂ /45] ₅	With	14
1.085	150	800	10	10	120	[0/90] ₂₅	With	15
1.125	450	800	10	5	120	[(0/90) ₂ /45] ₅	With	16
1.057	300	2400	15	5	120	[(0/90) ₂ /45] ₅	With	17

3-3- اثر زاویه سر مته بر میزان تورق

شکل 10 اثر افزایش زاویه سر مته بر تورق قطعه کامپوزیتی را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود با افزایش زاویه راس مته (α) از 120 به 140 درجه، میزان تورق کاهش یافته است. چون در زاویه راس 140 درجه، نیروی ماشینکاری کمتر می‌شود، همچنین ارتعاش آن با توجه به کاهش طول کمتر ابزار نسبت به زاویه راس 120 درجه، کاهش می‌یابد. همچنین زاویه راس زمانی که سرعت تولید و دقت بالاتر (تورق کمتر) مدنظر است، بسیار کاربردی‌تر و تاثیر گذار می‌باشد.

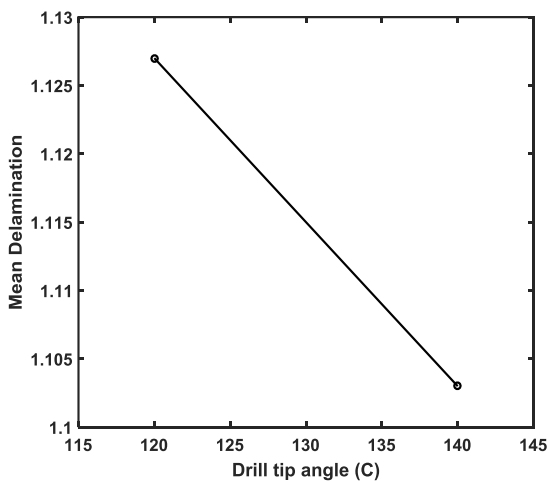


Fig. 10 Effect of Drill tip angle on the delamination

شکل 10 اثر زاویه نوک مته بر تورق

4-3- اثر ضخامت ورق بر میزان تورق

شکل 11 اثر ضخامت بر تورق قطعه کامپوزیتی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت قطعه (t)، تورق نیز افزایش یافته است. زیرا با افزایش ضخامت تعداد لایه‌ها بیشتر شده و ابزار مدت زمان بیشتری با قطعه کار درگیر بوده و حرارت بیشتری بین ابزار و قطعه تولید شده که این امر منجر به افزایش تخریب و تورق بیشتر در صفحه کامپوزیتی می‌گردد.

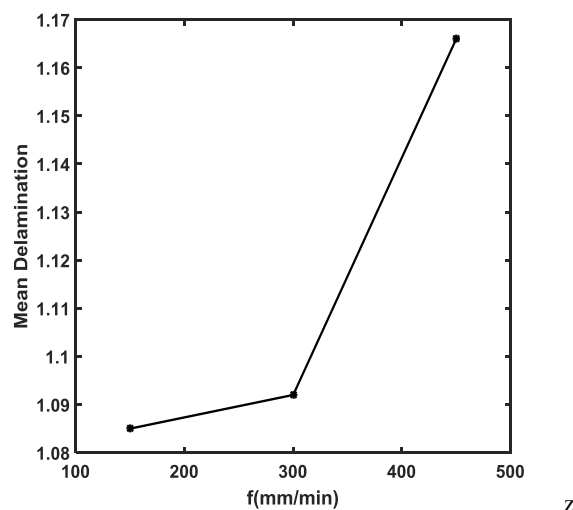


Fig. 8 Effect of federate velocity on the delamination

شکل 8 اثر سرعت پیشروی بر تورق

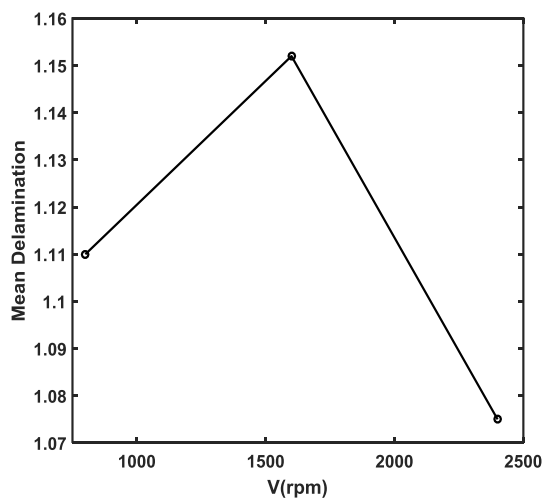


Fig. 9 Effect of rotational velocity on the delamination

شکل 9 اثر سرعت دورانی بر تورق

قطعه شده و مایع خنک کننده باعث کاهش دمای تخریب ابزار و قطعه کار شده و قطر تخریب کمتر می شود و در نتیجه میزان تورق، کاهش می یابد.

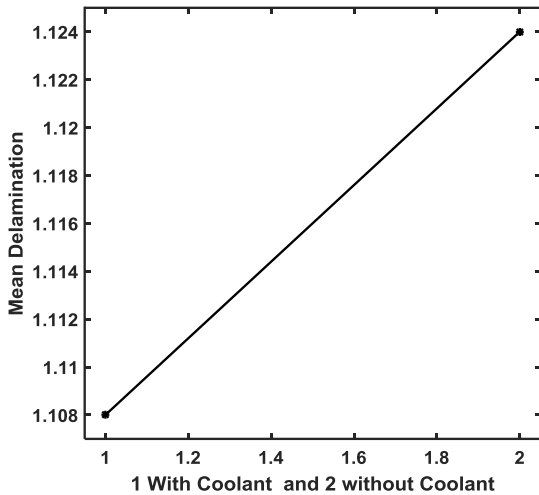


Fig. 13 Effect of coolant on the delamination

شکل 13 اثر مایع خنک کننده بر تورق

7-3- اثر لایه چینی بر میزان تورق

شکل 14 اثر لایه چینی بر تورق صفحه کامپوزیتی را نشان می دهد. عدد 1 برای لایه چینی $[(0/90)_2/45]_5$ و عدد 2 برای لایه چینی $[0/90]_{25}$ می باشد. نتایج نشان می دهد تورق لایه چینی $[0/90]_{25}$ بیشتر از لایه چینی $[(0/90)_2/45]_5$ می باشد. زیرا لایه چینی $[(0/90)_2/45]_5$ با توجه به داشتن زاویه 45 درجه علاوه بر دو جهت عمودی طولی و عرضی، در جهت 45 درجه (ما بین صفر و 90 درجه) نیز نسبت به لایه چینی $[0/90]_{25}$ مقاومت بیشتری از خود نشان داده و و قطر تخریب کمتر شده و در نتیجه تورق کمتری داشته است.

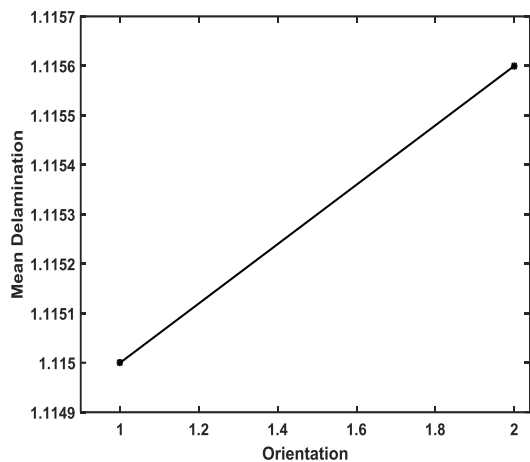


Fig. 14 Effect of orientation on the delamination

شکل 14 اثر لایه چینی بر تورق

نتایج برر سی های قبل نشان می دهد که قطر مته و لایه چینی کمترین اثر را بر میزان تورق داشته اند و سهم کمتری نسبت به دیگر پارامترها در فرآیند سوراخ کاری بر میزان تورق دارند.

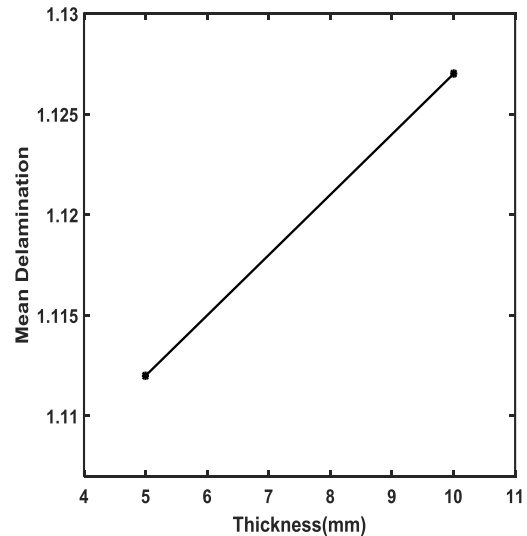


Fig. 11 Effect of thickness work piece on the delamination

شکل 11 اثر ضخامت قطعه کار بر تورق

5-3- اثر قطر ابزار بر میزان تورق

شکل 12 بیانگر اثر قطر ابزار بر میزان تورق قطعه کامپوزیتی می باشد. نتایج نشان می دهد با افزایش قطر ابزار (d)، تورق کاهش می یابد. چون نیروی ابزار و سطح تماس بین ابزار و قطعه کار، با افزایش قطر مته در حال افزایش هستند، اما از سوی دیگر نسبت نیرو به سطح مقطع (فشار) کاهش می یابد که این کاهش فشار باعث کاهش نسبی آسیب وارده به قطعه کار می گردد و در نتیجه تورق کاهش می یابد. همچنین با افزایش قطر ابزار، لرزش آن کمتر شده و در نتیجه تورق کاهش می یابد.

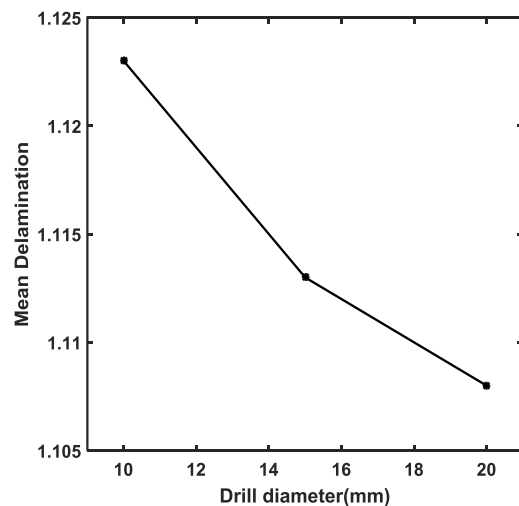


Fig. 12 Effect of drill diameter on the delamination

شکل 12 اثر قطر مته بر تورق

6-3- اثر مایع خنک کننده بر میزان تورق

شکل 13 اثر مایع خنک کننده بر تورق صفحه کامپوزیتی را نشان می دهد. عدد 1 برای حالت سوراخ کاری با مایع خنک کننده و عدد 2 برای حالت سوراخ کاری بدون مایع خنک کننده می باشد. نتایج نشان می دهد که استفاده از مواد خنک کار باعث کاهش تورق شده است. زیرا آزمایشاتی که سرعت پیشروی و ضخامت قطعه در آنها زیاد است منجر به افزایش دمای بین ابزار و

8-3- آنالیز واریانس استخراج معادله رگرسیون

با استفاده از آنالیز واریانس¹، نتایج تحلیل و تاثیر پارامترهای ورودی بر میزان تورق بر سی گردید. یکی از ملاکهای بررسی عوامل معنادار بر خروجی آزمایش، بر سی مقدار P-value است. برای این کار مقدار P-value برای هر کدام از پارامترها بدست آمده که در جدول 3 نشان داده شده اند. کافی است مقدار آن کمتر از 0.05 باشد تا نشان دهد که کدام یک از پارامترها بیشترین تاثیر را دارند. با توجه به جدول 3 مشخص است که به ترتیب سرعت پیشروی، سرعت دورانی و روانکار بیشترین تاثیر را بر میزان تورق داشته اند.

جدول 3 تحلیل داده ها و مشخص نمودن مقدار P-value

پارامتر	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	احتمال (P-Value)
Coolant	1	0.008884	0.008884	0.029
Orientation	1	0.001079	0.001079	0.365
α (deg)	1	0.00611	0.00611	0.055
t(mm)	1	0.003765	0.003765	0.112
d(mm)	2	0.002595	0.001298	0.357
V(rpm)	2	0.015096	0.007548	0.027
f(mm/min)	2	0.018793	0.009397	0.017
Error	6	0.006509	0.001085	
Total	16	0.062832		

جدول 5 نتایج پارامترهای بهینه شده

Table.3 Results of optimization parameters

ردیف	پارامتر	محدوده پارامتری برای تورق کمتر (آزمایشات مناسب)	محدوده پارامتری برای محدود پارامتری برای تورق بیشتر (آزمایشات نامناسب)
1	f(mm/min)	150<f<345	345<f<450
2	Layer	[0,90,0,45]	[0,90,0,90]
3	A	140	120
4	s(rpm)	800<V<900 & 1986<V<2400	900<V<1986
5	t(mm)	5	10
6	d(mm)	14<d<20	d<14
7	Coolant	With coolant	Without coolant

$$F_a = 1.12357 - 0.0322 \text{ coolant_with} + 0.0322 \text{ coolant_without} + 0.0116 \text{ layer_}[0,90,0,45] - 0.0116 \text{ layer_}[0,90,0,90] + 0.0258 \alpha_{120} - 0.0258 \alpha_{140} - 0.0234 t(\text{mm})_5 + 0.0234 t(\text{mm})_{10} + 0.0206 d(\text{mm})_{10} - 0.0125 d(\text{mm})_{15} - 0.0081 d(\text{mm})_{20} - 0.0320 s(\text{rpm})_{800} + 0.0403 s(\text{rpm})_{1600} - 0.0083 s(\text{rpm})_{2400} - 0.0244 f(\text{mm/min})_{150} - 0.0247 f(\text{mm/min})_{300} + 0.0492 f(\text{mm/min})_{450}$$

پس از انجام آزمایش ها ، معادله رگرسیون برای تعیین میزان تورق (F_d) ، توانایی تولید داده های جدید را با در نظر گرفتن هریک از پارامترها پیدا کرد. جهت حصول اطمینان از داده های پیش بینی شده ، برای 17 نمونه آزمایش شده قبلی ، نتایج پیش بینی شده بدست آمد. پس از آن نتایج عملی و نتایج پیش بینی شده در جدول 6 با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج بدست آمده از نمونه ها نشان داد که میزان خطا کمتر از 7 درصد است. این مقدار خطا نشان می دهد که معادله پیش بینی شده برای تورق ، از دقت خوبی برخوردار است.

جدول 6 مقایسه نتایج عملی و پیش بینی شده

Table.6 Comparison of experimental and predicted results

شماره آزمایش	میزان تورق در آزمایش تجربی	میزان تورق پیش بینی شده	درصد خطا
1	1.12	1.14967	3
2	1.166	1.15647	1
3	1.032	1.03047	0.2
4	1.15	1.14517	0.4
5	1.1525	1.12857	2.1
6	1.153	1.15467	0.1
7	1.15	1.12287	6.4
8	1.0675	1.07707	0.8
9	1.12	1.14647	2.3
10	1.0125	1.036557	2.3
11	1.085	1.06677	1.7
12	1.24	1.21037	2.4
13	1.08733	1.06017	2.5
14	1.165	1.18677	1.8
15	1.085	1.09317	0.7
16	1.125	1.14317	1.6
17	1.05666	1.05987	0.3

10-3- تاثیر میزان تورق بر استحکام کششی، نیرو تحمل کننده و ضریب تمرکز تنش

برای تاثیر میزان تورق بر استحکام کششی، نیرو و ضریب تمرکز تنش، 5 نمونه با مته ای به قطر 10 میلیمتر تحت شرایط بهینه سوراخ کاری شدند و

با استفاده از فرمول (4) میزان تاثیر گذاری هر یک از پارامترها بر تورق صفحه بدست آمده و در جدول (4) نشان داده شده اند

$$\%P = ((SS_x - DF_x) \times MS/SS_T) \times 100 \quad (4)$$

جدول 4 میزان تاثیر گذاری پارامترهای سوراخکاری کامپوزیت بر تورق

Table 4 The effect of composite drilling parameters on the delamination

ردیف	پارامتر	میزان تاثیر گذاری
1	Coolant	14%
2	Orientation	1.7%
3	α (deg)	10%
4	t(mm)	5.9%
5	d(mm)	4.1%
6	V(rpm)	24%
7	f(mm/min)	29.6%

باتوجه به جدول 4 مشاهده می شود که ابتدا سرعت پیشروی و پس از آن به ترتیب سرعت دورانی، خنک کار، زاویه راس مته، ضخامت، قطر ابزار و لایه چینی بر میزان تورق موثر بوده اند. سپس اثر هر یک از پارامترها بر تورق مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. در ادامه پس از میان یابی و انجام روش های تجربی، پارامترهای بهینه شده بدست آمده اند. در نهایت اثر میزان تورق بر استحکام کششی و ضریب تمرکز تنش بررسی شده است.

9-3- بهینه سازی پارامترها و استخراج معادله رگرسیون

پس از میان یابی و انجام روش های تجربی، پارامترهای بهینه شده و غیر بهینه بدست آمده و در جدول 5 نشان داده شده اند. برای تعیین معادله رگرسیون با توجه به اینکه پارامترها تابعی خطی از ورودی ها بودند، از نوع مدل مرتبه خطی توسط نرم افزار مینیتب استفاده شده و طبق رابطه (5) معادله تورق بر حسب پارامترها استخراج شده است.

¹ -Analysis of Variance(ANOVA)

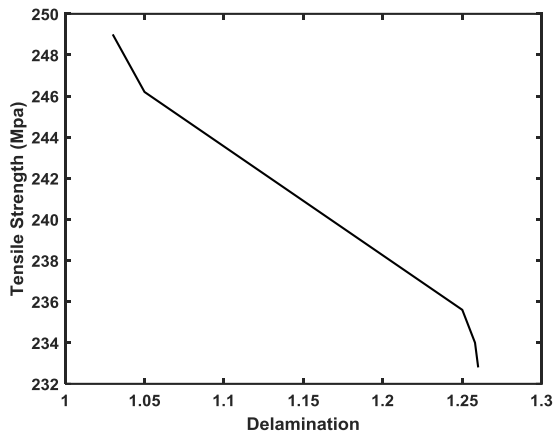


Fig. 16 Effect of delamination on tensile strength

شکل 16 اثر تورق بر استحکام کششی

4- نتیجه گیری

در این تحقیق، برای به حداقل رساندن عیب تورق، پارامترهای تاثیرگذاری شامل نرخ پیشروی، قطر ابزار، ضخامت، زاویه راس ابزار، سرعت دورانی، نوع لایه چینی الیاف و خنک کار مورد بررسی قرار گرفتند. تعداد آزمایش ها بر اساس روش طراحی آزمایش تاگوچی مشخص شده و پس از آن، سوراخ ها توسط دستگاه VMM اسکن و میزان تورق موجود در آنها با در نظر گرفتن قطر سوراخ ها محاسبه شدند. پس از بررسی نتایج زیر حاصل شده است:

1- نرخ پیشروی، نسبت به دیگر پارامترها اثر بیشتری در سوراخ کاری الیاف شیشه- اپوکسی داشته و سهم آن حدود 29.6 درصد بود. پس از آن پارامترهای سرعت دورانی حدود 24%، روانکار 14%، زاویه راس ابزار 10%، ضخامت 6%، قطر مته 4.1% و لایه گذاری 1.7% بر میزان تورق موثر بودند.

2- میزان تورق رابطه مستقیم با نیروی محوری دارد. با افزایش سرعت پیشروی نیروی سوراخکاری افزایش یافته و در نتیجه تورق افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت دورانی نیروی سوراخکاری کاهش یافته و در نتیجه تورق کاهش می یابد.

3- نتایج نشان داد سرعت دورانی محور ماشین فرز در 800 و 2400 دور بر دقیقه، زاویه راس 140 درجه، سرعت پیشروی 150 میلی متر بر دقیقه، استفاده از روانکار و ضخامت هر چه کمتر قطعه، کاهش تورق را به همراه داشته و برعکس آن، سرعت 1600 دور بر دقیقه، زاویه راس 120 درجه، سرعت پیشروی 450 میلی متر بر دقیقه، ضخامت بیشتر قطعه و نبود روانکار مناسب باعث افزایش تورق و تخریب می گردند.

4- نتایج تست های کشش روی نمونه ها نشان داد که با افزایش میزان تورق، میانگین استحکام کششی و نیروی نمونه سوراخ دار نسبت به نمونه سالم به اندازه 34% کاهش و میانگین ضریب تمرکز تنش نمونه سوراخ دار نسبت به نمونه سالم به اندازه 51.66% در اطراف سوراخ افزایش یافته است.

تحت آزمایش کشش قرار گرفتند تا دچار شکست شدند. پس از شکست نیرو و استحکام کششی آنها استخراج گردید. نتایج بدست آمده در جدول 7 نشان داده شده اند. همچنین استحکام کششی و نیروی نمونه سالم بدون سوراخ (که از آزمایش کشش بدست آمده اند) به ترتیب برابر 363MPa و 13612.5N می باشد. با توجه به جدول 7، مشاهده می شود که با افزایش تورق، استحکام کششی و نیرو نسبت به نمونه سالم (بدون سوراخ) کاهش یافته اند. میانگین استحکام کششی و نیروی نمونه های تورق دار به ترتیب برابر 239.52MPa و 8981.5N می باشند. بنابراین میانگین استحکام کششی و نیروی نمونه های تورق دار نسبت به نمونه سالم هر دو به اندازه 34% کاهش یافته اند. همچنین از جدول 7 مشاهده می شود که با افزایش تورق ضریب تمرکز تنش افزایش یافته است. با توجه به آنکه میانگین افزایش ضریب تمرکز تنش برابر 1.5166 می باشد، مقدار آن نسبت به نمونه سالم 51.66% افزایش یافته است.

همچنین اثر تورق بر ضریب تمرکز تنش و استحکام کششی به صورت نمودار به ترتیب در شکل های 15 و 16 رسم شده اند. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش تورق ضریب تمرکز تنش افزایش و استحکام کششی کاهش یافته اند و نمونه زودتر دچار شکست می گردد. در هر دو نمودار مشاهده می شود که بعد از تورق 1.25 شیب نمودار افزایش زیادی یافته است.

جدول 7 نتایج آزمایش کشش در نمونه های سوراخ کاری شده

ردیف	کد نمونه	تورق (F_d)	استحکام کششی (MPa)	نیروی (N)	K_t
1	TH10-1	1.030	249.0	9324.4	1.4578
2	TH10-2	1.050	246.2	9235	1.4744
3	TH10-3	1.250	235.6	8837.2	1.5407
4	TH10-4	1.258	234.0	8778	1.5512
5	TH10-5	1.260	232.8	8733.0	1.5592
	میانگین	-----	239.52	8981.5	1.5166

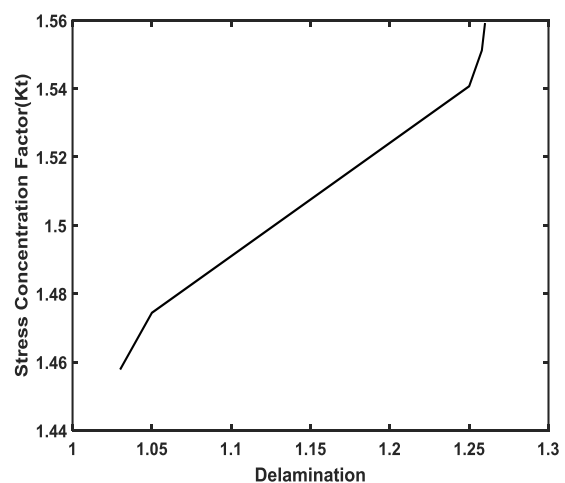


Fig. 15 Effect of delamination on stress concentration factor

شکل 15 اثر تورق بر ضریب تمرکز تنش

- in Drilling of GFRE Composites to Minimize Delamination”, *Polymer Testing*, Vol. 75, pp. 192-204, 2019.
- [18] Upputuri, H. B. and Nimmagadda, V. S., “Optimization of Drilling Process Parameters used in Machining of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 23, No. 3, pp. 594-599, 2020.
- [19] Davim, j. P., Reis, P., and Antonio, C., “Drilling Fiber Reinforced Plastics (FRPs) Manufactured by Hand Lay-up: Influence of Matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05)”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 1155-156, No. 30, pp. 1828-1833, 2004.

- 5- نتایج تجربی نشان داد که با 1.22 برابر شدن تورق نسبت به تورق نمونه اولیه، ضریب تمرکز تنش 6.9% افزایش و استحکام کششی 6.5% کاهش یافته اند.
- 6- با استفاده از نرم افزار مینی تب، تعیین معادله رگرسیون تورق بر حسب پارامترها استخراج شده و نتایج تورق پیش بینی شده با نتایج تورق تجربی مقایسه شدند که حداکثر خطا کمتر از 7٪ می باشد.

5- مراجع

- [1] Sheikh-Ahmad J, Y., “Machining Of Polymer Composites”, Chapter6, *Nontraditional Machining of FRPs*, Springer, 2012.
- [2] Singh, I., Bhatnagar, N. and Viswanath, P. “Drilling of Unidirectional Glass Fiber Reinforced Plastics: Experimental and Finite Element Study”, *Materials and Design*, Vol. 29, No. 2, pp. 546-553. 2008.
- [3] Khashaba, U. A., “Delamination in Drilling Polymeric Composites: a Review. In: Paulo Davim J, editor. *Drilling of Composite Materials*”, Nova Science Publishers., Inc. 2009.
- [4] Karimi, N. Z., Heidary, H. and Ahmadi, M., “Residual Tensile Strength Monitoring of Drilled Composite Materials by Acoustic Emission”, In Persian, *Material and Design*, Vol. 40, pp. 229-236, 2012.
- [5] Ogawa, K., Aoyama, E., Inoue, H. and Gunjima, M., “Investigation on Cutting Mechanism in Small Diameter Drilling for GFRP (Thrust Force and Surface Roughness at Drilled Hole Wall)”, *Composite Structures*, Vol. 38, No. 1-4, pp. 343-350, 1997.
- [6] Tsao, C. C., Hocheng, H., and Chen, Y. C., “Delamination Reduction in Drilling Composite Materials by Active Backup Force”, *Manufacturing Technology*, Vol. 61, NO. 1, pp. 91-94, 2012.
- [7] Jamal sheikh , Ahmad, “Machining of Polymer Composites”, The petroleum institute department of mechanical engineer in united arab Emirates, chapter 5, pp. 187- 219, 2009.
- [8] Taskesen, A. and Kutukde. K., “Analysis of Drilling Temperature When Drilling B4C Reinforced Aluminum Composites”, *Industrial Design Engineering*, Gazi university, Ankara, 2014.
- [9] Sahami poor Dehghan, M. and Heidary, H., “ Experimental Study in Drilling Composite Pipes Manufactured by Filament Winding Process Using Full Factorial Design Method”, In Persian, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, Vol. 50, No. 3, pp. 489-504, 2018.
- [10] Mohammadi, B., Kazemi, A. and Ghasemi, R., “Damage Analysis of Holed Composite Laminates using Continuum Damage Mechanics”, In Persian, *Journal of science and technology of composite of composite(JSTC)*, Vol. 2, No. 3, pp. 23-34, 2015.
- [11] Zuluaga,W., “Effect of cycle loading Amplitude Tension-Tension on Composite Laminated Plates with initial Delamination”, A Thesis presented to the Faculty of California polytechnic state University.,2013.
- [12] Sonbaty, El., khashaba, U. A. and Machaly, T., “Factors Affecting the Machine Ability of GFR/EPOXY Composites”, *Composite Structure*, Vol. 63, No. 3-4, pp. 329-338, 2004.
- [13] Amini, S. Baraheni, M. and Moeni Afzal, M., “Statistical Study of the Effect of Various Machining Parameters on Delamination in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites”, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 41-50, 2018.
- [14] Capello,E., “Workpiece Damping and its Effects on Delamination Damage in Drilling thin Composite Laminates”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, No. 2, pp. 186-19, 2004.
- [15] Hakimi, E. and Amini, S., “Study of Delamination in the Process Helical Milling of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite”, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 51-58, 2016.
- [16] Saberi, M. Niknam, S.A. and Hashemi, R., “On the Effects of Cutting and Lubrication Parameters on the Surface Quality and Cutting Forces in Machining Ti-MMC-Experimental and Frequency Assessment”, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 143-150, 2019.
- [17] Agwa, M. A. and Megahed, A. A., “New Nonlinear Regression Modeling and Multi-Objective Optimization of Cutting Parameters

