



## بررسی آزمایشگاهی تأثیر همزمان پارامترهای ماشین کاری، نیروی محوری و گشتاور برشی بر زبری سطح حفره تولید شده در دریل کاری قطعه آلومینیوم از سری ۷۰۰۰

مسعود پور<sup>۱\*</sup>، مهدی پور<sup>۲</sup>، حسین عزیزی بهار<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

۲- مربی، آمار اقتصادی و اجتماعی، دانشگاه بین المللی امام رضا (ع)، مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی تکنولوژی ساخت و تولید، دانشکده شهید محمد منتظری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، مشهد

\* m.pour@qiet.ac.ir, ۶۷۳۳۵-۹۴۷۷۱

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۳ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۷ تیر ۱۳۹۸

ارائه در سایت: فروردین ۱۳۹۹

کلیدواژگان:

فرایند دریل کاری

زبری سطح نیروی محوری

گشتاور برشی

مانوا

### چکیده

یکی از مهمترین پارامترهایی که می‌تواند در زمان ایجاد یک سوراخ مدنظر قرار بگیرد، زبری سطح سوراخ تولید شده است. عوامل بسیاری نظیر ارتعاش عرضی مته، دما و هندسه ابزار در ایجاد زبری سطح نقش بازی می‌کنند. در این مقاله اثرات عامل‌ها شامل، سرعت دورانی مته، پیشروی مته و پیش مته به همراه متغیرهای وابسته شامل، نیروی محوری مته و گشتاور برشی مدنظر قرار گرفته است. هدف اصلی این مقاله تعیین میزان اهمیت هر یک از عامل‌ها و متغیرهای وابسته در ایجاد زبری سطح حفره تولید شده در قطعه کار آلومینیومی از سری ۷۰۰۰ است. برای بررسی هم‌زمان تمامی عامل‌ها و متغیرهای وابسته از روش مانوا استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این روش می‌تواند تأثیر هر یک از عامل‌ها را در ایجاد هم‌زمان نیروی محوری و گشتاور برشی آشکار سازد و سپس میزان اثرگذاری هر یک از عامل‌ها و متغیرهای وابسته در ایجاد زبری سطح در سطح ۹۵٪ اطمینان را مشخص می‌کند. نتایج حاکی از آن است که اضافه نمودن نیروی محوری و گشتاور برشی به عامل‌ها می‌تواند دقت پیشگویی زبری سطح را به میزان ۳۷/۳۹٪ نسبت به حالتی که پیشگویی تنها براساس عامل‌ها انجام شده باشد، افزایش دهد. از طرف دیگر بررسی نتایج نشان می‌دهد که نیروی محوری اثر بیشتری نسبت به گشتاور برشی بر روی تغییر زبری سطح سوراخ دارد و لذا به منظور بهبود کیفیت سطح سوراخ تولیدی بایستی به روش‌هایی که سبب کاهش نیروهای محوری می‌شوند توجه شود.

## Experimental investigation of the simultaneous effect of machining parameters, axial force and cutting torque on the surface roughness of the produced hole in the drilling of the 7000 series AL Alloy workpiece

Masoud Pour<sup>1\*</sup>, Mehdi Pour<sup>2</sup>, Mohammad Azizi Bahar<sup>3</sup>

1- Mechanical Engineering Department, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

2- Department of Mathematics, Imam Reza international University, Mashhad, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran

\*P.O.B. 94771-67335, Quchan, Iran, m.pour@ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received 3 January 2019

Accepted 8 July 2019

Available March 2020

### Keywords:

Drilling Process

Surface roughness

Axial force

Cutting torque

Manova

### Abstract

One of the most important parameters that can be considered when creating a hole is the surface roughness. Many factors, such as drill transverse vibration, temperature, and tool geometry, play a role in creating surface roughness. In this paper, the effects of the factors include spindle speed, feed and pre-drill with associated variables including axial force and cutting torque are considered. The main purpose of this paper is to determine the significance of each of the factors and dependent variables in the variation of surface roughness. The material of workpiece is selected from the 7000 series Al Alloy. The simultaneous analysis of all the factors and dependent variables has been done using the Manova method. In the first step, the results show that the use of this method can reveal the effect of factors on creating simultaneously the axial force and cutting torque, and then determines the effectiveness of each of the factors and dependent variables in determining the surface roughness at 95% confidence level. The results indicate that considering axial force and cutting torque in model can increase the ability of prediction model in surface roughness by 37.39% compared to the prediction performed based on factors. On the other hand, the results show that the axial force has a greater effect than the cutting torque on the surface roughness of the hole. Therefore, in order to improve the surface quality of the produced hole, it is necessary to pay attention to methods that reduce the axial forces.

Please cite this article using:

M. Pour, M. Pour, M. H. Azizi, Experimental investigation of the simultaneous effect of machining parameters, axial force and cutting torque on the surface roughness of the produced hole in the drilling of the 7000 series AL Alloy workpiece, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 26- 38, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد زمان ماشین کاری قطعات گوناگون مربوط به سوراخکاری است [۱]. امروزه تولید قطعات صنعتی با خطای ابعادی کم و کیفیت سطح بالا جهت افزایش کیفیت محصولات تولیدی مدنظر تولیدکنندگان قرار دارد. به دلیل آنکه سوراخ‌ها می‌توانند برای عبور سیال و یا قطعات راهنمای قالب‌ها مورد استفاده قرار بگیرند، کیفیت سوراخ تولید شده با استفاده فرایند دریل کاری، به عنوان سریعترین فرایند تولید سوراخ، حائز اهمیت است. محدودیت‌های تلرانس‌های هندسی و ابعادی سبب شده‌اند که تحقیقات گسترده‌ای برای ایجاد سوراخ با دقت بالا انجام شود.

با وجود اینکه مته‌ها می‌توانند سوراخ‌های دقیق ایجاد کنند، ولی در بعضی از صنایع که دقت و کیفیت سوراخ حائز اهمیت است از مته به عنوان یک ابزار خشن تراش و قبل از فرایند برقوقاری، داخل تراشی و سنگ‌زنی استفاده می‌شود [۲]. بهبود کیفیت سطح بدست آمده در فرایند دریل کاری می‌تواند سبب کاهش هزینه‌ها در پروسه‌های بعد از دریل کاری شود.

پارامترهای زیادی در این فرایند مطرح می‌شوند که از آن جمله می‌توان به نیروهای کربلیوس، ژيروسکوپیک [۳، ۴]، دمپینگ فرایندی [۵، ۶]، شرایط مرزی مته در محل اتصال به ابزار گیر [۷]، ارتعاشات عرضی، محوری و پیچشی اشاره کرد. برای مدلسازی شرایط مختلف دریل کاری تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است اما به دلیل وجود شرایط متفاوت در تماس مته با دیوار، هندسه ابزار، کوپل شدن ارتعاشات عرضی، محوری و پیچشی، تأثیر براده در حال خروج بر کیفیت سطح و همچنین گرمای تولید شده در فرایند و سایر عوامل، شبیه‌سازی این فرایند همچنان به عنوان یک چالش شبیه‌سازی دقیق مطرح است.

گوپاکویا در [۸] نشان داد که کوپل ارتعاشی طولی و پیچشی نقش مهمی در پایداری فرایند دریل کاری و کیفیت سوراخ تولیدی بازی می‌کنند. در [۹-۱۱] با ارائه یک مدل ارتعاشاتی در حوزه زمان، ارتعاشات چتر ناشی از کوپل شدن مودهای پیچشی-محوری و عرضی برای فرایند دریل کاری مدل‌سازی شد. مدل آنها به خوبی نیروی محوری و گشتاور برشی را برحسب پیشروی، عمق برش و هندسه مته پیشگویی می‌کرد. احمدی و همکارانش در [۱۲]، مدل‌سازی میرایی تماسی در زمان دریل کاری را به منظور بهبود مدل ارتعاشی بررسی کردند. در کنار روشهای تحلیلی، روشهای آزمایشگاهی نیز به منظور تعیین دقیق شرایط بهینه پارامترهای دریل کاری مورد استفاده

قرار گرفته است. کیواک و همکاران پی بردند که چندین پارامتر از قبیل پارامترهای برش و شکل هندسی ابزار بر کیفیت سوراخ دریل کاری شده تأثیر می‌گذارند [۱۳]. ماتسورا و براندا به همراه همکارانشان به ترتیب در مراجع [۱۴، ۱۵] نشان دادند که تولید گرما در روند دریل کاری خشک رابطه مستقیمی با زبری سطح، دقت سوراخ و شکل براده دارد. اخواندر [۱۶] اثر سرعت‌های دورانی و نیروی طولی مته در دایره بودن سوراخ تولیدی مشخص کردند. آنها تایید کردند که سرعت دوران  $28/8\%$  و نیروی طولی  $48/39\%$  در دایره‌ای بودن سوراخ تأثیر دارند.

پالانیکومار در [۱۷] نشان داد که، در فرایند دریل کاری، کارایی و کیفیت قطعه تولید شده به شدت وابسته به نوع فرایند، جنس قطعه کار و ابزار، سرعت برش، پیشروی و زاویه مارپیچ متغیرهای وابسته نیروی محوری و گشتاور می‌باشد. کیواکدر [۱۸]، تأثیر سرعت برش، سرعت تغذیه، عمق سوراخکاری با ابزارهای مختلف تحت زاویه ۱۱۸ در راس مته را مورد ارزیابی قرار داد و تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای سوراخکاری بر روی پارامترهای زبری سطح و مقادیر دقت قطر سوراخ انجام داد. در کنار موضوعات فوق، پالانیکومار و همکارانش در [۱۹] در فرایند سوراخکاری آلایژ آلومینیوم سیلیسیم نیروی پیشروی و زبری سطح را کنترل کردند. آنها دریافتند که نرخ پیشروی بر نیروی طولی مته، و از طرف دیگر سرعت دوران مته بر زبری سطح تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.

لیو و گودفری به همراه همکارانشان به ترتیب در مراجع [۲۰، ۲۱] به منظور مینیم کردن نیروی محوری و همچنین مینیم کردن هم‌زمان نیروی محوری-گشتاور برشی در دریل کاری تحقیقاتی بر روی هندسه نوک مته انجام دادند. آنها توانستند با بهینه‌سازی نوک مته، پارامترهای مذکور را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند. اخیراً نسلی در [۲۲]، با استفاده از تکنیک تاگوچی، بهینه‌سازی نیروی محوری و گشتاور برشی براساس سرعت دورانی، نرخ پیشروی، زاویه مارپیچ را در فرایند دریل کاری انجام داده‌اند. آماران و همکاراندر [۲۳]، نشان دادند که افزایش سرعت دورانی، پیشروی و قطر مته می‌تواند سبب افزایش کیفیت سطح سوراخ گردد.

در کنار این تحقیقات، مانوا<sup>۱</sup> برای مطالعه اثرات دو یا چند متغیر مستقل بر روی بیش از یک متغیر وابسته بکارگرفته شده است [۲۴-۲۷]. شایخ در [۲۸] از این تکنیک برای تعیین تأثیر عامل‌های سرعت دورانی، پیشروی در ایجاد سایش‌های مختلف ابزار فرزکاری استفاده کرد. سونگ کاپونگ در [۲۹] بررسی اثر

<sup>۱</sup> Multivariate analysis of variance

مته و به دلیل شکسته شدن براده، دچار تغییر خواهد شد. در بیشتر مقالاتی که ارتعاشات عرضی مته مورد بررسی قرار گرفته است، در مدل نیرویی فرایند دریل کاری آنها، یک فشار برشی مستقل در جهت عرضی برای بدست آوردن نیروی عرضی لحاظ شده است. بایلا در [۳۳] نشان داده شده است که مدل ارتعاش ناخواسته متها شامل ارتعاشات کوپل شده از ارتعاشات محوری و پیچشی می‌باشد. این کوپل سبب ایجاد یک موج بر روی سطح شده و در نهایت بر روی کیفیت سطح سوراخ تأثیر می‌گذارد. یکی از کاملترین مدل‌های دینامیکی فرایند دریل کاری در [۳۴، ۳۵] توسط روکما و همکاران ارائه شده است. در این مدل ارتعاشات پیچشی، محوری و عرضی مدلسازی شده و نتایج آن در شکل سوراخ ایجاد شده بررسی گردیده است. آنها اثر پیش‌مته، سرعت دورانی مته، ارتعاشات محوری و پیچشی را بر روی ارتعاشات عرضی و شکل سوراخ بررسی کردند. پس از آنها ارتعاشات کوپل شده عرضی، طولی و پیچشی مدلسازی شد. عامل ایجاد نیروی عرضی و در نتیجه ارتعاشات عرضی در مته، عدم هم محوری مته و محور اسپیندل، اختلاف ارتفاع دو لبه برنده و اختلاف زاویه بین لبه‌های برنده مته می‌باشد [۳۲، ۳۶]. در صورتیکه این عوامل در زمان برش از فرایند دریل کاری حذف شوند، تنها عامل ایجاد ارتعاش عرضی نیروی محوری اعمال شده به مته می‌باشد. در این مقاله با توجه به محدوده مورد بررسی برای تعیین ارتعاش عرضی و شرایط مرزی تیر دوسرگیردار از معادله دیفرانسیل (۱) می‌توان استفاده کرد.

$$EI \frac{d^4 Y(x)}{d^4 x} + T \frac{d^2 Y(x)}{d^2 x} - \rho A \omega^2 Y(x) = 0 \quad (1)$$

در اینجا مختصه  $x$  بیان کننده موقعیت ارتعاشی تیر محوری (فشاری)،  $A$  سطح مقطع و  $\omega$  فرکانس تیر می‌باشند. بدین ترتیب با توجه به وجود نیروی محوری در رابطه (۱) انتظار می‌رود زبری سطح ایجاد شده تابعی از نیروی محوری باشد و با افزایش نیروی محوری مقدار آن تغییر محسوسی داشته باشد.

لازم به ذکر است که به منظور واردسازی فقط اثر ارتعاشات ابزار در آزمایشات در [۷، ۳۷] پیشنهاد شده است که طول ابزار بلند انتخاب گردد و گشتاور بستن مته در ابزارگیر ثابت در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب پارامترهای مودال در تکیه‌گاه (سه‌نظام) که شامل سختی و دمپینگ مودال و همچنین پارامترهای مودال متعلقات دستگاه دریل نظیر یاتاقان‌ها، محور اسپیندل و غیره می‌باشند، از مجموعه آزمایش حذف می‌گردد. این موضوع در [۷] نیز بیان شده است. به منظور ارزیابی میزان

پارامترهای ماشین کاری (سرعت برش، پیشروی و عمق برش) را بر روی کیفیت سطح و پایداری ابعادی قطعات تولید شده از جنس چدن خاکستری با فرایند تراشکاری انجام داد. نوآوری این مقاله در بررسی تأثیر هم‌زمان عامل‌های آزمایش (شامل پارامترهای پیش‌مته، پیشروی و سرعت دوران مته) و متغیرهای وابسته آزمایش (شامل پارامترهای گشتاور برشی، نیروی محوری)، بر روی متغیر وابسته زبری سطح قطعات، می‌باشد. برای این منظور در مرحله نخست با انجام تحلیل مانوا عامل‌های حائز اهمیت در ایجاد هم‌زمان متغیرهای وابسته نیروی محوری، گشتاور برشی مشخص شده است و تأثیر هر یک از عامل‌ها در ایجاد هم‌زمان نیروی محوری و گشتاور برشی تعیین شده است. سپس میزان اهمیت هر یک از عامل‌ها و متغیرهای وابسته در ایجاد زبری سطح (به عنوان متغیر وابسته دیگر) تعیین شده است. در نهایت مشخص شده است که برای افزایش کیفیت سطح بایستی کدام یک از عامل‌ها و یا متغیرهای وابسته تغییر یابند. توجه شود که هدف این مقاله تعیین زبری سطح سوراخ تولیدی نیست، بلکه هدف مشخص کردن میزان تأثیر هر یک از عامل‌ها و متغیرهای وابسته بر روی زبری سطح است تا با انجام اصلاحات لازم در تحقیقات آینده، افزایش کیفیت سطح و کاهش هزینه‌های تولیدی به صورت هم‌زمان برآورده گردند.

## ۲- دینامیک دریل کاری

با توجه به نوع تماس راس و بدنه مته با قطعه‌کار در زمان ماشین کاری، شرایط مرزی یکسر گیردار-یکسر پین شده و شرایط مرزی دوسرگیردار به ترتیب برای زمان تماس مته با سطح تخت قطعه‌کار و زمان وارد شدن درون سوراخ ایجاد می‌گردد. مدلسازی دینامیکی مته با استفاده از مدل تیر با شرایط یکسرگیردار-یکسر پین در [۳۰] انجام شده و مدلسازی شرایط دوسرگیردار در [۳۱] انجام شده است. در مدلسازی آنها یک نیروی محوری برای تیر در جهت محوری آن مدنظر قرار گرفته است. از آنجاییکه به دلیل وارد شدن ابزار به درون قطعه‌کار و تماس ابزار با قطعه‌کار دمپینگ فرایندی بوجود می‌آید [۳۲]، و معادلات دیفرانسیل بیان کننده ارتعاش مته که توسط محققان پیشین ارائه شده فاقد این دمپینگ می‌باشند، معادلات بدست آمده به صورت تقریبی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک هستند. این دمپینگ براساس سرعت برشی، عمق برش و نیروی محوری متغیر خواهد بود. از طرف دیگر نیروی محوری تحت شرایط برشی مختلف، نظیر تغییر سرعت دوران، تغییر پیشروی، پیش

روش تحلیل واریانس چند متغیری به مقادیر پرت یا کرانه‌های متغیرهای وابسته بسیار حساس است. خارج نکردن مقادیر پرت از تحلیل و یا تبدیل نکردن این داده‌ها می‌تواند میزان خطای نوع اول و دوم را افزایش دهد. این کار به صورت پیش فرض توسط مینی‌تب ۱۸ انجام می‌شود. موقعیت ایده‌آل برای استفاده از تحلیل واریانس چند متغیری زمانی است که متغیرهای وابسته دارای همبستگی متوسط باشند. در شرایطی که متغیرهای وابسته دارای همبستگی بسیار بالایی هستند نیز نباید از مانوا استفاده شود زیرا از نظر آماری اینگونه همبستگی‌ها خطر هم‌خطی چندگانه را افزایش می‌دهد [۲۵].

#### ۴- آزمایشات

در این مقاله آزمایش‌ها بر روی قطعاتی از جنس آلومینیوم رده ۷۰۰۰، با آنالیز مواد ارائه شده در جدول ۱، با استفاده از مته HSS به قطر ۱۶mm با زوایه راس ۱۱۸ تحت شرایط خشک، انجام شده است. به منظور جلوگیری از وارد شدن پارامترهای مودال (سختی و دمپینگ) در محل اتصال مته به سه‌نظام، طول بخش خارج از سه‌نظام مته ۱۶۰mm در نظر گرفته شده است. توجه شود که ۶۰mm از طول کلی مته در درون سه‌نظام قرار داده است و در مجموع طول مته ۲۲۰mm است. قطر قطعه‌کار ۵۰mm و ضخامت آن ۱۷mm است که به سه گروه بدون پیش‌مته و با پیش‌مته‌های ۴mm و ۸mm تقسیم‌بندی شده‌اند. فرایند سوراخکاری به‌وسیله دستگاه دریل ستونی دلیو-ام-دلیو بی اس ۴۰ و با سه پیشروی ۰/۱۱ mm/rev، ۰/۱۶ mm/rev و ۰/۲۲ mm/rev در سه سرعت اسپیندل ۳۵۵rpm، ۵۰۰rpm و ۷۰۰ rpm انجام شده است. انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری بر مبنای کاربرد گسترده آنها در ماشین‌کاری آلومینیوم است، که محدوده‌های خشن تراشی و پرداخت را پوشش می‌دهد. به منظور تعیین و کنترل دقیق سرعت دورانی مورد نظر، از دورسنج لیزری و اینوتر مطابق با شکل ۱ استفاده شده است. در این آزمایش برای اندازه‌گیری نیروی محوری و گشتاور برشی، دینامومتر و نرم‌افزار لودترک سل‌گه در شکل ۲ نشان داده شده است، بکار گرفته شده است.

جدول ۱ ترکیبات موجود در آلیاژ ۷۰۷۵-TY۴۵۱ بر حسب درصدوزنی

Table 1 The percent of weight each materials in alloy of 7451T-7075

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr
بقیه	۰/۱۲	۰/۱۵	۲/۶	۰/۱	۲/۶	۶/۷	۰/۰۶	۰/۱۵

اثر پذیری زبری سطح ناشی از هریک از عواملها، ترکیب آنها و متغیرهای وابسته، آزمایشاتی انجام شده و تحلیل‌هایی با روش مانوا روی مجموعه نتایج آزمایش‌ها انجام خواهد شد.

#### ۳- مانوا

مانوا به عنوان تحلیل چندگانه واریانس [۳۷-۳۹] شناخته شده است. در آزمایش‌هایی که در آن بیش از یک متغیر وابسته وجود دارد، در صورت انجام تحلیل تک متغیره برای متغیرهای وابسته، همبستگی‌های درونی بین متغیرهای وابسته اندازه‌گیری نمی‌شود و بدین ترتیب استخراج و تفسیر نتایج نادرست خواهد شد. در صورتیکه یک مساله با متغیرهای وابسته چندگانه وجود داشته باشد و تشخیص ارتباط یا عدم ارتباط آنها برای محقق مهم باشد، از روش مانوا به جای روش تجزیه و تحلیل واریانس تک متغیره استفاده می‌شود. ساختار مانوا شبیه به ساختار تجزیه و تحلیل واریانس است با این تفاوت که اجرای مانوا برای عبارت‌هایی است که دارای متغیرهای وابسته چندگانه می‌باشد. در مانوا هر دو مسئله هم‌زمان با یکدیگر کنترل می‌شود و همچنین همبستگی بین متغیرهای وابسته را به حساب می‌آورد. با توجه به اینکه یک ترکیب خطی ممکن است برای توجیه همه واریانس‌ها در N متغیر وابسته کافی نباشد، بنابراین مانوا ترکیب خطی دوم را طوری استخراج می‌کند که مستقل از نخستین ترکیب باشد و واریانس باقیمانده را بیشینه سازد. سپس ترکیب سوم به گونه‌ای که متعامد با نخستین و دومین ترکیب است و واریانس باقیمانده را کمینه سازد استخراج می‌کند و این عمل تا حصول یک ملاک معین ادامه دارد.

مانوا به منظور بررسی اثرات اصلی و متقابل عامل‌های فرایند که شامل نرخ پیشروی، سرعت دورانی مته و قطر پیش‌مته می‌باشند، بر روی متغیرهای وابسته که شامل نیروی محوری، گشتاور برشی و زبری سطح می‌باشند، استفاده می‌شود. برای انجام تحلیل مانوا در این مقاله از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۸ استفاده شده است. در زمان انجام تحلیل مانوا بایستی تأیید فرضیات مانوا بوسیله دیاگرام‌های نرمال باقی مانده‌ها، باقی‌مانده‌ها به ازای مقادیر برازش داده شده و برابری کوواریانس‌ها انجام شود. سپس آزمون سطح اهمیت متغیرهای مستقل در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام گردد.

در انجام مانوایی از شرایط استفاده از تحلیل واریانس چند متغیری، نرمال بودن چند متغیری متغیرهای وابسته می‌باشد.

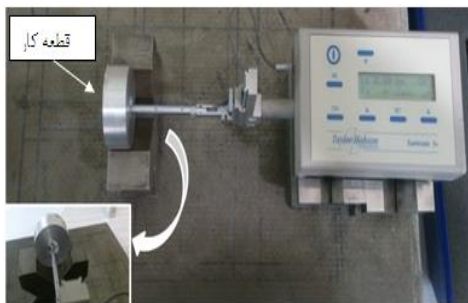
<sup>1</sup> Normal plots of residuals

<sup>2</sup> Residuals versus the fitted values

<sup>3</sup> Equality of covariance

<sup>4</sup> Load torque cell

تغییر دور از ۳۵۵ rpm به ۵۰۰ rpm کاهش می‌دهد در نیروی محوری ایجاد شده است و در ادامه با افزایش سرعت دورانی به ۷۱۰ rpm مجدداً افزایش نیروی محوری ایجاد شده است.



شکل ۳ دستگاه زبری سنج و اندازه‌گیری زبری سطح

Fig. 3 Surface roughness instrument and Measuring the surface roughness

جدول ۲ پارامترهای آزمایش و نتایج

Table 2 Experiment parameters and results

شماره	قطر پیش‌مته (mm)	پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	نیروی محوری (N)	گشتاور برشی (N.m)	زبری سطح (Ra)
۱	۴	۰/۱۱	۳۵۵	۴۳	۴/۵	۱/۶
۲	۴	۰/۱۱	۵۰۰	۴۵	۴/۶	۲/۲
۳	۴	۰/۱۱	۷۰۰	۵۱	۴/۵۳	۱/۲
۴	۴	۰/۱۶	۳۵۵	۴۷	۷/۱۵	۲
۵	۴	۰/۱۶	۵۰۰	۴۰/۵	۴/۸۵	۴/۶
۶	۴	۰/۱۶	۷۰۰	۵۴/۵	۵/۹۵	۳/۲
۷	۴	۰/۲۲	۳۵۵	۵۵	۸/۱۸	۱/۶
۸	۴	۰/۲۲	۵۰۰	۵۶/۵	۸/۴	۲/۲
۹	۴	۰/۲۲	۷۰۰	۶۴	۷/۸	۳/۲
۱۰	۸	۰/۱۱	۳۵۵	۱۹	۳/۲	۳/۴
۱۱	۸	۰/۱۱	۵۰۰	۲۳	۳/۵	۲/۲
۱۲	۸	۰/۱۱	۷۰۰	۲۰/۵	۳/۱	۲
۱۳	۸	۰/۱۶	۳۵۵	۲۲	۳/۴	۲
۱۴	۸	۰/۱۶	۵۰۰	۲۴	۳/۴	۳
۱۵	۸	۰/۱۶	۷۰۰	۲۷/۸	۴/۱۸	۲/۴
۱۶	۸	۰/۲۲	۳۵۵	۲۸	۵/۷	۲
۱۷	۸	۰/۲۲	۵۰۰	۲۸/۵	۵/۶	۲/۴
۱۸	۸	۰/۲۲	۷۰۰	۴۴/۴	۵/۸	۳/۸
۱۹	۰	۰/۲۲	۷۰۰	۵۸/۶	۴/۲۸	۴/۸
۲۰	۰	۰/۱۱	۳۵۵	۶۴/۶	۴/۱۶	۸/۶
۲۱	۰	۰/۱۱	۵۰۰	۶۴	۴/۲۱	۶/۶
۲۲	۰	۰/۱۱	۷۰۰	۱۵۱/۶	۶/۷	۵
۲۳	۰	۰/۱۶	۳۵۵	۱۲۳/۱	۵/۷۵	۲
۲۴	۰	۰/۱۶	۵۰۰	۱۶۸/۴	۶/۵۴	۲
۲۵	۰	۰/۱۶	۷۰۰	۱۲۶/۶	۷/۶	۲/۴
۲۶	۰	۰/۲۲	۳۵۵	۱۹۶/۲	۸/۲۵	۸/۶
۲۷	۰	۰/۲۲	۵۰۰	۲۰۲	۸	۳/۲

این موضوع به صورت مشابه در گشتاور برشی ایجاد شده در این سرعت دورانی نیز صادق است (شکل‌های ۵- ب و ج



شکل ۱ اندازه‌گیری دور نامی محور دستگاه

Fig. 1 Measuring the nominal speed of the machine axis



شکل ۲ بستر آزمایش برای اندازه‌گیری نیروی محوری و گشتاور برشی

Fig. 2 Experiment setup for measuring axial force and cutting torque

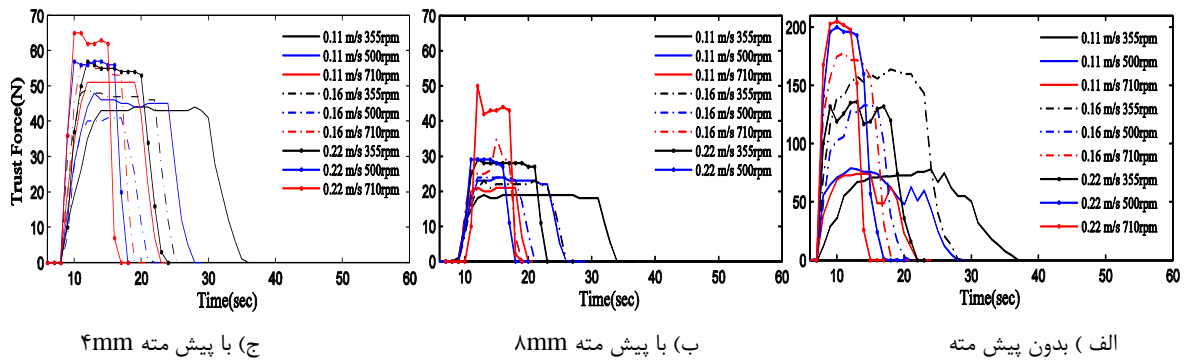
نمونه‌برداری در هر ثانیه با ۱۵۰۰ نمونه انجام شده است و دقت این دینامومتر برای نیروی محوری ۱N و برای گشتاور ۰/۱N.m می‌باشد. لازم به ذکر است که دینامومتر به میز دستگاه فرز و سه‌نظام به دینامومتر همانند شکل ۲ مونتاژ شده است. به منظور بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر یک از آزمایش‌ها پنج بار تکرار شده است. سیگنال‌های نیروی محوری و گشتاور برشی شامل ۳ بخش، گذرا، پایدار و خروج از ناحیه برش می‌باشند ( شکل‌های ۴ و ۵) که برای انجام تحلیل‌ها، از متوسط سیگنال‌های بدست آمده در ناحیه پایدار استفاده شده است. مقادیر متوسط آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

کیفیت سطح سوراخ قطعات توسط دستگاه زبری‌سنج تیله‌هابسون با دقت  $0.2\mu\text{m}$  و طول برش  $0.8\text{mm}$  با معیار Ra اندازه‌گیری انجام شده است. به منظور تایید تکرارپذیری آنها، زبری‌سنجی در سه نقطه متفاوت از سوراخ با ۵ تکرار انجام شده است و میانگین مقادیر بدست آمده به عنوان زبری سطح آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۳ دستگاه زبری‌سنج و قطعه‌کار در زمان اندازه‌گیری زبری نشان داده شده است.

در شکل ۴ تغییرات نیروی محوری و در شکل ۵ گشتاور برشی به ازاء تغییر عامل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۴- ب و ج دیاگرام‌های نیرو مشاهده می‌شود، با تغییر سرعت دورانی و پیشروی تغییرات غیرخطی در دامنه نیروی محوری ایجاد می‌شود به طوری‌که برخلاف انتظار با

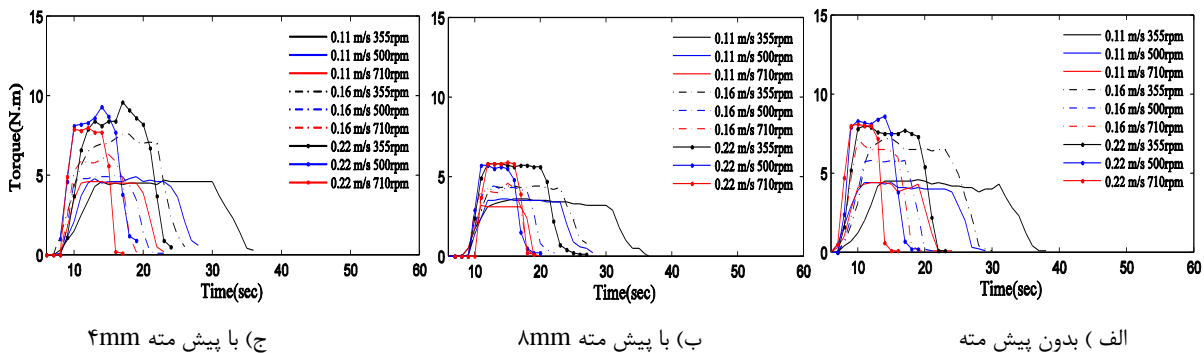
نیز می‌تواند سبب تغییرات در زبری سطح قطعه گردد، لذا مقادیر زبری سطح در اثر هر دو متغیر وابسته بررسی می‌شود. از طرف دیگر تأثیر عامل‌ها (پیشروی، سرعت دورانی و پیش مته) در تغییر دو متغیر وابسته مورد بررسی قرار می‌گیرند تا مقدار اثر هر یک از عامل‌ها و متغیرهای وابسته در ایجاد زبری سطح مورد ارزیابی قرار گیرد. در ادامه با بررسی نتایج با استفاده از مدل خطی مانوا، سهم هر یک از متغیرهای وابسته و عامل‌ها در پیشگویی زبری سطح سوراخ تولید شده بررسی می‌شود.

دیگرام‌های گشتاور برشی) و با افزایش سرعت دورانی به 710 rpm گشتاور ایجاد شده افزایش می‌یابد. در شکل‌های 6 و 7 تأثیر هر یک از عامل‌ها در گشتاور برشی و نیروی محوری براساس متوسط نتایج 5 آزمایش برای هر سطح از آزمایش‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شرایط ایجاد شده به صورت غیرخطی است که وابسته به عامل‌ها می‌باشد. از آنجا که وجود نیروی محوری می‌تواند سبب خیز و ارتعاش عرضی ابزار گردد و از طرف دیگر وجود ارتعاش پیچشی



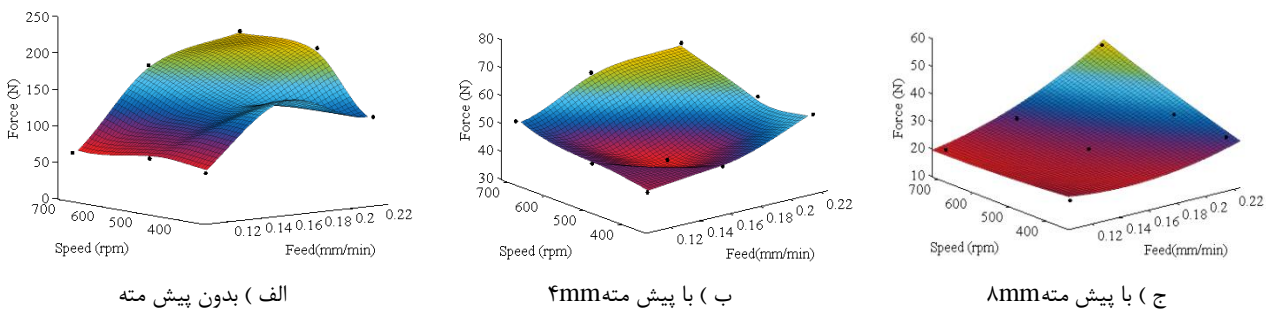
شکل 4 تغییرات نیروهای محوری به ازای پیش مته‌های مختلف در سرعت دورانی و پیشروی‌های مختلف

Fig. 4 The variation of axial forces in different predrills, revolution speeds and feeds



شکل 5 تغییرات گشتاور برشی به ازای پیش مته‌های مختلف در سرعت دورانی و پیشروی‌های مختلف

Fig. 5 The variation of cutting torque in different predrills, revolution speeds and feeds



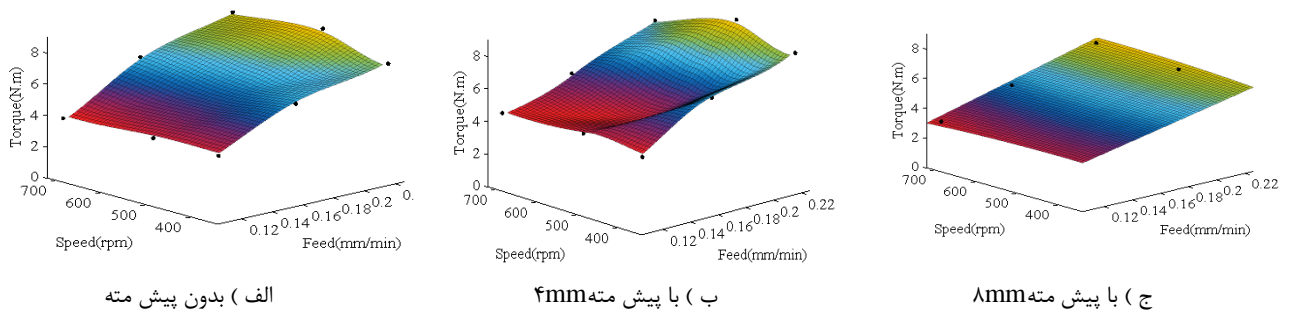
شکل 6 تغییرات میانگین نیروی محوری به ازای تغییر عامل‌ها

Fig. 6 The variation average of axial force versus variation of factors

### ۵- تحلیل‌های مانوا و تجزیه و تحلیل واریانس

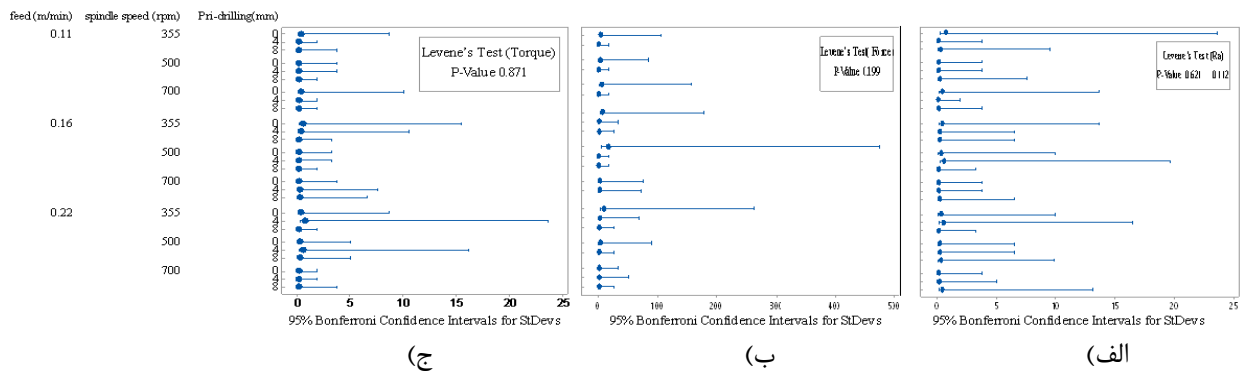
به منظور انجام تحلیل مانوا از نرم افزار مینی‌تب ۱۸ استفاده شده است. در ابتدا، فرضیات مانوا برای متغیرهای وابسته ارزیابی می‌شوند. همسان بودن واریانس با استفاده از آزمون لون در سطح ۰.۰۵٪ اطمینان بررسی شده اند ( شکل ۸). مقدار  $P$  در آزمون‌های انجام شده برای تمامی متغیرها نشان می‌دهد که در آنها فرض برابری واریانس‌ها تایید می‌شود. شکل‌های ۹- الف تا ۹- ج دیگرام‌های باقی مانده‌های استاندارد شده در مقابل مقادیر فیت شده که برای انجام آزمایش فرضیه ثابت بودن واریانس برای متغیرهای وابسته استفاده شده‌اند، را نشان می‌دهند. برای تحقق این آزمایش، داده‌ها در این دیگرام‌ها باید به صورت پراکنده توزیع شده باشند. واریانس ثابت در داده‌ها نشان می‌دهد که داده‌ها دارای الگوی خاصی نمی‌باشند. ترسیم احتمال نرمال شکل‌های ۱۰- الف تا ۱۰- ج با الگوی خط مستقیم نشان می‌دهد که باقی مانده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کند. نقاط دور از این خط اندک می‌باشند و تقریباً داده‌ها روی یک خط مستقیم قرار دارند. بدین ترتیب فرض نرمال بودن در تجزیه و تحلیل واریانس مورد تأیید قرار گرفته است.

با انجام مدل خطی مانوا و بررسی متغیرهای وابسته نیروی محوری و گشتاور برشی، که نتایج آنها در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، مشخص می‌شود پارامترهای تأثیرگذار بر نیروی گشتاور برشی و نیروی محوری شامل، پیشروی، پیش‌مته و پیشروی  $\times$  سرعت می‌باشند. دلیل این موضوع از لحاظ مکانیک برش را می‌توان اینگونه بیان کرد که افزایش پیشروی (در یک سرعت دورانی ثابت) سبب افزایش ضخامت براده لحظه‌ای می‌شود که بدین ترتیب نیروی محوری و به تبع آن گشتاور برشی در مته افزایش می‌یابند. از طرف دیگر کاهش پیش‌مته سبب افزایش حجم براده برداشت نشده شده و در نتیجه آن افزایش نیروی محوری حاصل می‌شود. نکته قابل تامل در نتایج این جدول، عدم تأثیر مستقیم سرعت دورانی در نیروی محوری و گشتاور برشی است. دلیل این موضوع نیز مؤثر بودن پیشروی و سرعت دورانی در ضخامت براده لحظه‌ای می‌باشد. از طرف دیگر با انجام مدل خطی مانوا، براساس عامل‌ها و متغیرهای وابسته بر نیروی زبری سطح، مشخص می‌شود که گشتاور برشی، نیروی محوری، سرعت دورانی، پیش‌مته و پیشروی  $\times$  سرعت با سطح اطمینان ۹۵٪ در ایجاد زبری سطح تأثیرگذار هستند ( جدول ۴). در



شکل ۷ تغییرات میانگین گشتاور برشی به ازاء تغییر عامل‌ها

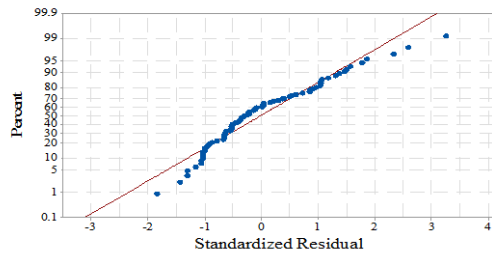
Fig. 7 The variation average of cutting torque versus variation of factors



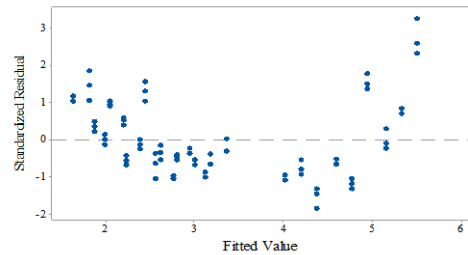
شکل ۸ فاصله اطمینان ۹۵٪ لون برای انحراف استانداردهای الف ( زبری سطح ب) نیروی محوری ج) گشتاور برشی

Fig. 8 Confidence interval 95% for standard deviations in Levene's test a) Surface roughness b) Axial force c) Cutting torque

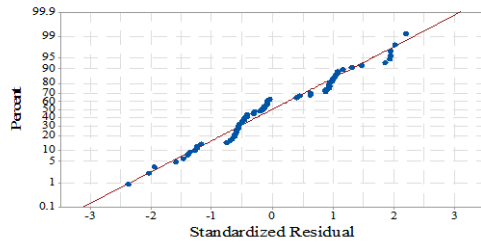




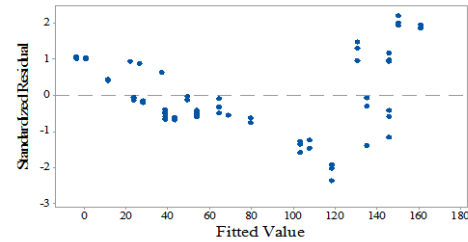
الف) زبری سطح



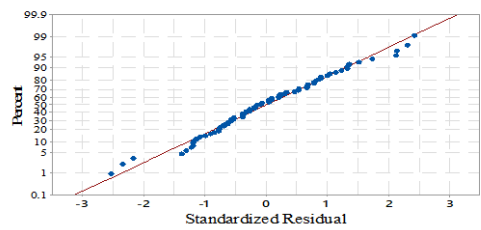
الف) زبری سطح



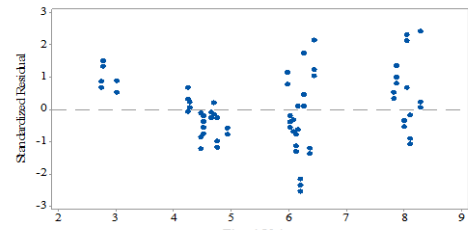
ب) نیرو



ب) نیرو



ج) گشتاور



ج) گشتاور

شکل ۱۰ توزیع نرمال باقی مانده در نتایج متغیرهای وابسته

شکل ۹ واریانس ثابت متغیرهای وابسته

Fig. 10 The normal distribution of residual of results of the dependent variables

Fig. 9 The constant Variance of dependent variables

جدول ۳ مدل خطی عمومی مانوا متغیرهای وابسته (گشتاور برشی و نیروی محوری) برحسب عاملها

Table 3 Manova's general linear model of dependent variables (cutting torque and axial force) based on factors

عامل	معیار	آزمون آماری	مقدار F	DF		مقدار p	سطح اهمیت ۰.۰۵
				Num	Denom		
پیشروی	Pillai's	۰/۳۲۴۶۸	۶/۷۸۳	۱۴۰	۴	۰/۰۰۰	مهم
سرعت	Pillai's	۰/۰۸۶۲۸	۱/۵۷۸	۱۴۰	۴	۰/۱۸۳	غیرمهم
پیش مته	Pillai's	۰/۷۱۶۷۴	۱۹/۵۴۹	۱۴۰	۴	۰/۰۰۰	مهم
پیشروی × سرعت	Pillai's	۰/۱۵۱۸۸	۶/۱۷۸	۶۹	۲	۰/۰۰۳	مهم
پیشروی × پیش مته	Pillai's	۰/۰۱۶۴۵	۰/۵۶۸	۶۹	۲	۰/۵۷۰	غیرمهم
سرعت × پیش مته	Pillai's	۰/۰۳۶۲۴	۱/۲۹۷	۶۹	۲	۰/۲۸۰	غیرمهم
سرعت × پیش مته × پیشروی	Pillai's	۰/۰۶۶۷۵	۲/۴۶۸	۶۹	۲	۰/۰۹۲	غیرمهم

پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل پیشگویی می‌باشد. در واقع هرچه تفاوت بین آزمایشات با مقدار پیش‌بینی شده کم باشد، مقدار R-sq افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مدل ایجاد شده در پیشگویی زبری سطح براساس عاملها و ترکیب آنها، دارای  $R-sq=54\%/71$  است. از آنجاکه این عاملها ارتباطی به مشخصات دینامیکی و هندسی ابزار و ماشین ابزار ندارند، لذا

جدول ۵ تا ۸ به بررسی دقت پیشگویی مدل‌های برازش داده شده با ترکیب هر یک از عاملها و متغیرهای وابسته ذکر شده پرداخته خواهد شد و میزان تأثیرگذاری ترکیب‌های مختلف عاملها و متغیرهای وابسته در دقت مدل پیشگویی زبری سطح تعیین شده است. در هر جدول مقادیر R-sq مدل ایجاد شده با پارامترهای تأثیرگذار آن جدول بر روی زبری سطح نشان داده شده‌اند. این پارامتر نشان دهنده دقت مدل براساس ضرایب



تخمین زبری سطح انجام شده با آنها دارای دقت بالایی نمی‌باشد. با توجه به آنکه نیروی محوری و همچنین گشتاور برشی وابسته به ضخامت براده لحظه‌ای می‌باشند و دینامیک سیستم را وارد مدل زبری سطح خواهند کرد، انتظار می‌رود با وارد شدن آنها در مدل پیشگویی زبری سطح، دقت پیشگویی افزایش یابد.

با اضافه کردن متغیر وابسته گشتاور برشی (که اثر ارتعاش پیچشی را به همراه دارد)، به مدل تجزیه و تحلیل واریانس، میزان دقت پیشگویی مدل به میزان ۵/۶۰٪ افزایش یافته و به ۶۰/۳۱٪ رسیده است. در این شرایط گشتاور و پیشروی با سطح اطمینان ۹۵٪ در مدل حضور دارند (جدول ۴).

جدول ۴ مدل خطی عمومی مانوا زبری سطح بر حسب متغیرهای وابسته و عامل‌ها

Table 4 Manova's general linear model of surface roughness based on factors and dependent variables

سطح اهمیت ۹۵٪	مقدار p	DF		مقدار F	آزمون آماری	معیار	عامل
		Num	Denom				
مهم	۰/۰۵۲	۱	۶۸	۳/۹۰۱	۰/۰۵۴۲۶	Pillai's	گشتاور
مهم	۰/۰۰۰	۱	۶۸	۴۰/۶۹۴	۰/۳۷۴۳۸	Pillai's	نیروی محوری
غیرمهم	۰/۱۴۳	۲	۶۸	۲/۰۰۳	۰/۰۵۵۶۴	Pillai's	پیشروی
مهم	۰/۰۰۲	۲	۶۸	۶/۷۷۷	۰/۱۶۶۱۹	Pillai's	سرعت
مهم	۰/۰۰۰	۲	۶۸	۱۲/۶۷۸	۰/۳۷۱۶۱	Pillai's	پیش‌مته
مهم	۰/۰۰۲	۱	۶۸	۱۰/۰۱۳	۰/۱۲۸۳۵	Pillai's	پیشروی × سرعت
غیرمهم	۰/۴۰۹	۱	۶۸	۰/۶۸۹	۰/۰۱۰۰۳	Pillai's	پیشروی × پیش‌مته
غیرمهم	۰/۳۴۱	۱	۶۸	۰/۹۱۹	۰/۰۱۳۳۴	Pillai's	سرعت × پیش‌مته
غیرمهم	۰/۸۵۱	۱	۶۸	۰/۰۳۶	۰/۰۰۰۵۳	Pillai's	سرعت × پیش‌مته × پیشروی

جدول ۵ مدل پیشگویی Ra با توجه متغیرهای عامل و ترکیب آنها

Table 5 The prediction model of the Ra with respect to factor variables and their composition

سطح اهمیت ۹۵٪	P	F	Adj MS	Adj SS	DF	عامل
مهم	۰/۰۱۵	۴/۴۴	۸/۴۹۱۹	۱۶/۹۸۴	۲	پیشروی
غیرمهم	۰/۳۹۶	۰/۹۴	۱/۷۹۳۶	۳/۵۸۷	۲	سرعت
مهم	۰/۰۰۱	۸/۴۸	۱۶/۲۰۱۵	۳۲/۴۰۳	۲	پیش‌مته
غیرمهم	۰/۵۹۹	۰/۲۸	۰/۵۳۳۸	۰/۵۳۴	۱	پیشروی × سرعت
غیرمهم	۰/۶۸۲	۰/۱۷	۰/۳۲۳۸	۰/۳۲۳	۱	پیشروی × پیش‌مته
غیرمهم	۰/۸۱۴	۰/۰۶	۰/۱۰۷۰	۰/۱۰۷	۱	سرعت × پیش‌مته
غیرمهم	۰/۲۴۱	۱/۴۰	۲/۶۷۲۰	۲/۶۷۲	۱	سرعت × پیش‌مته × پیشروی
			۱/۹۱۱۵	۱۳۳/۸۰۷	۷۰	خطا
				۲۹۵/۴۴۲	۸۰	جمع

R-sq(adj)= 48.24% R-sq=54.71 S=1.5408

جدول ۶ مدل پیشگویی Ra با توجه متغیرهای عامل، ترکیب آنها و گشتاور برشی به عنوان متغیر وابسته

Table 6 The prediction model of the Ra with respect to factor variables, their composition and cutting torque as dependent variable

سطح اهمیت ۹۵٪	P	F	Adj MS	Adj SS	DF	عامل
مهم	۰/۰۰۳	۹/۷۴	۱۶/۵۵۲۷	۱۶/۵۵۳	۱	گشتاور برشی
مهم	۰/۰۱۸	۴/۲۶	۷/۲۳۷۱	۱۴/۴۷۴	۲	پیشروی
غیرمهم	۰/۲۶۴	۱/۳۶	۲/۳۱۰۴	۴/۶۲۱	۲	سرعت
غیرمهم	۰/۵۲۲	۰/۶۶	۱/۱۱۴۵	۲/۲۲۹	۲	پیش‌مته
غیرمهم	۰/۵۵۹	۰/۳۴	۰/۵۸۶۱	۰/۵۸۶	۱	پیشروی × سرعت
غیرمهم	۰/۴۱۶	۰/۶۷	۱/۱۳۷۰	۱/۱۳۷	۱	پیشروی × پیش‌مته
غیرمهم	۰/۸۳۸	۰/۰۴	۰/۰۷۱۲	۰/۰۷۱	۱	سرعت × پیش‌مته
غیرمهم	۰/۲۳۴	۱/۴۴	۲/۴۴۸۲	۲/۴۴۸	۱	سرعت × پیش‌مته × پیشروی
			۱/۶۹۹۳	۱۱۷/۲۵۴	۶۹	خطا
				۲۹۵/۴۴۲	۸۰	جمع

R-sq(adj)=53.99% R-sq=60.31 S=1.30359

جدول ۷ مدل پیشگویی Ra با توجه متغیرهای عامل، ترکیب آنها و متغیر وابسته نیروی محوری

Table 7 The prediction model of the Ra with respect to factor variables, their composition and axial force as dependent variable

عامل‌ها و متغیرهای وابسته	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	سطح اهمیت ۰.۰۵٪
نیروی محوری	۱	۵۶/۲۴۲	۵۶/۲۴۱۶	۵۰/۰۳	۰/۰۰۰	مهم
پیشروی	۲	۶/۷۵۵	۳/۳۷۷	۳/۰۰	۰/۰۰۰	مهم
سرعت	۲	۱۴/۸۷۹	۷/۴۳۹۷	۶/۶۲	۰/۰۰۲	مهم
پیش‌مته	۲	۸۴/۷۳۳	۴۲/۳۶۶۳	۳۷/۶۹	۰/۰۰۰	مهم
پیشروی × سرعت	۱	۱۲/۳۴۰	۱۲/۳۴۰۲	۱۰/۹۸	۰/۰۰۱	مهم
پیشروی × پیش‌مته	۱	۰/۳۶۷	۰/۳۶۷۵	۰/۳۳	۰/۵۶۹	غیر مهم
سرعت × پیش‌مته	۱	۱/۱۶۰	۱/۱۵۹۷	۱/۰۳	۰/۳۱۳	غیر مهم
سرعت × پیش‌مته × پیشروی	۱	۰/۰۹۸	۰/۰۹۷۶	۰/۰۹	۰/۷۶۹	غیر مهم
خطا	۶۹	۷۷/۵۶۵	۱/۱۲۴۱			
جمع	۸۰	۲۹۵/۴۴۲				

R-sq(adj)=69.56% R-sq=73.75 S=1.06025

جدول ۸ مدل پیشگویی Ra با توجه متغیرهای عامل متغیرهای عامل، ترکیب آنها و متغیرهای وابسته نیروی محوری و گشتاور برشی

Table 8 The prediction model of the Ra with respect to factor variables, their composition, axial force, cutting torque as dependent variables

عامل‌ها و متغیرهای وابسته	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	سطح اهمیت ۰.۰۵٪
نیروی محوری	۱	۴/۲۰۹	۴/۲۰۸۵	۳/۹۰	۰/۰۵۲	مهم
گشتاور برشی	۱	۴۳/۸۹۷	۴۳/۸۹۷۴	۴۰/۶۹	۰/۰۰۰	مهم
پیشروی	۲	۴/۳۲۲	۲/۱۶۱۲	۲/۰۰	۰/۱۴۳	مهم
سرعت	۲	۱۴/۶۲۱	۷/۳۱۰۴	۶/۷۸	۰/۰۰۲	مهم
پیش‌مته	۲	۲۷/۳۵۳	۱۳/۶۷۶۷	۱۲/۶۸	۰/۰۰۰	مهم
پیشروی × سرعت	۱	۱۰/۸۰۲	۱۰/۸۰۱۷	۱۰/۰۱	۰/۰۰۲	مهم
پیشروی × پیش‌مته	۱	۰/۷۴۳	۰/۷۴۳۱	۰/۶۹	۰/۴۰۹	غیر مهم
سرعت × پیش‌مته	۱	۰/۹۹۱	۰/۹۹۱۵	۰/۹۲	۰/۳۴۱	غیر مهم
سرعت × پیش‌مته × پیشروی	۱	۰/۰۳۹	۰/۰۳۸۶	۰/۰۴	۰/۸۵۱	غیر مهم
خطا		۷۳/۳۵۲	۱/۰۷۸۸			
جمع	۸۰	۲۹۵/۴۴۲				

R-sq(adj)= 70.79% R-sq=75.17 S=1.03864

است. بدین ترتیب آشکار می‌شود که نقش فرکانس تحریک دورانی مت‌ه و ارتعاشات پیچشی ابزار در ایجاد زبری سطح قابل ملاحظه است. در این حالت عامل‌ها و متغیرهای وابسته به ترتیب نیروی محوری، گشتاور برشی، سرعت، پیش‌مته و پیشروی × سرعت با سطح اطمینان ۰.۰۵٪ در مدل تأثیرگذار می‌باشند (جدول ۸).

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۸ مجذور مربعات باقیمانده‌ها ۰/۸۶ می‌باشد که حاکی از تطبیق قابل ملاحظه مدل با نتایج آزمایشگاهی دارد. جدول ضرایب در تحلیل واریانس چندگانه، برای مدل ارائه شده در جدول ۸، که مناسبترین مدل است، تابع پیشگویی Ra را براساس عامل‌ها و متغیرهای وابسته به صورت معادله (۲) پیشگویی می‌کند.

$$Ra = 1.28 - 0.04981 Torque - 0.491 Force + 0.68 Feed + 3.05 Speed + 4.8 Pri Drill + 0.0986 Feed \times Speed - 2.5 Feed \times Predrill$$

با جایگزینی نیرو (که اثر ارتعاشات عرضی را به همراه دارد.) به جای گشتاور در مدل تجزیه و تحلیل واریانس، دقت پیشگویی مدل به میزان ۳۴/۸۰٪ نسبت به حالت اولیه بهبود یافته و به ۷۳/۷۵٪ رسیده است. نیرو محوری، پیشروی، سرعت، پیش‌مته و پیشروی × سرعت به عنوان پارامترهایی که با سطح اطمینان ۰.۰۵٪ در مدل تأثیرگذار هستند شناخته شده‌اند (جدول ۷). با وارد کردن نیروی محوری و گشتاور برشی به صورت هم‌زمان در مدل پیشگویی، دقت پیشگویی مدل به ۷۵/۱۷٪ افزایش یافته که نسبت به حالت قبل ۱/۹۲٪ بهبود و نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن متغیرهای وابسته ۳۷/۳۹٪ بهبود یافته است. شایان توجه است که در حالتی که نیروی محوری وارد مدل می‌شود، علاوه بر فاکتورهای تأثیرگذار در زبری سطح (در حالت بدون در نظر گرفتن متغیرهای وابسته) سرعت دورانی مت‌ه به عنوان پارامتری مستقل نیز وارد مدل شده

### ۶- نتیجه‌گیری

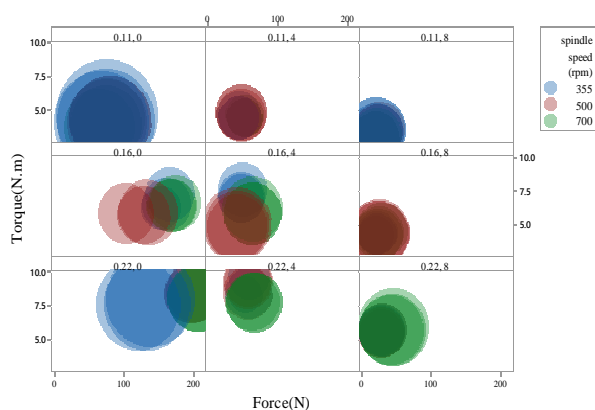
در این تحقیق اثر هم‌زمان پارامترهای ماشین کاری، نیروی محوری و گشتاور برشی در فرایند دریل کاری، بر روی زبری سطح با روش مانوا بررسی شده است. بدین ترتیب اثر متقابل دو متغیر وابسته (نیروی محوری و گشتاور برشی) به صورت هم‌زمان بر روی زبری سطح مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهند که پارامترهای نیروی محوری، گشتاور برشی، پیش‌مته، سرعت و سرعت  $\times$  پیشروی به ترتیب بیشترین تأثیر را در ایجاد مدل پیشگویی زبری سطح دارا می‌باشند و بهینه‌سازی عامل‌ها به تنهایی نمی‌تواند سبب دستیابی به کیفیت سطح مطلوب گردد. دلیل آن این است که متغیرهای وابسته نظیر نیروی محوری و گشتاور برشی به عنوان پارامترهای که بیشترین تأثیرگذاری را در ایجاد زبری سطح دارا می‌باشند، شناخته شده‌اند. با وارد شدن آنها در مدل‌های خطی مانوا، دقت مدل‌ها تا ۷۵/۱۷٪ افزایش می‌یابد و پیشگویی زبری سطح با در نظر گرفتن این دو متغیر وابسته دارای خطای ۲۷/۲۱٪ می‌باشد. از آنجاکه تأثیر نیروی محوری در تغییر زبری سطح قابل ملاحظه می‌باشد، ایجاد براساس نتایج بدست آمده مشخص می‌شود که ارائه روش‌هایی برای کاهش نیروی محوری می‌تواند در بهبود زبری سطح مؤثر باشد. بدین ترتیب نوآوری این مقاله در مشخص کردن میزان تأثیر هر یک از عامل‌ها و متغیرهای وابسته در ایجاد زبری سطح و در نظر گرفتن اثر هم‌زمان پیش از ابزار و نیروی محوری در زبری سطح می‌باشد. از این‌رو در شبیه‌سازی‌های فرایند دریل کاری، مدل‌هایی که توانایی وارد کردن هم‌زمان گشتاور پیش‌مته و نیروی محوری را در مدل را دارا باشند، می‌توانند دقت پیشگویی زبری سطح را تا سطح ۷۵٪ افزایش دهند.

### ۷- مراجع

- [1] M. Pirtini, I. Lazoglu, Forces and hole quality in drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, No. 45, pp. 1271-1281, 2005.
- [2] J. Wang, Q. Zhang, a study of high-performance plane rake faced twist drills. Part I: Geometrical analysis and experimental investigation, *International journal of machine tools & manufacture*, Vol. 48, pp. 1276-1285, 2008.
- [3] T. Arvajeh, F. Ismail, Machining stability in high-speed drilling-part 1: modeling vibration stability in bending, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1563-1572, 2006.
- [4] D.M. Rincon, A.G. Ulsoy, Complex geometry, rotary inertia and gyroscopic moment effects on drill

$$(2) \quad +0.000919Speed \times Predrill - 0.00109Speed \times Feed \times Predrill$$

به منظور درک بهتر از نحوه تأثیر هم‌زمان عامل‌ها و متغیرهای وابسته در تغییر زبری سطح "شکل ۱۱" ارائه شده است. در این شکل، از دایره‌های آبی، قرمز و سبز به ترتیب برای نمایش سرعت‌های دورانی ۳۵۵rpm، ۵۰۰rpm و ۷۰۰rpm استفاده شده است. در ستون اول سمت چپ پیش‌مته صفر به همراه پیشروی‌های ۰/۱۱mm/min، ۰/۱۱mm/min و ۰/۲۲mm/min در ستون‌های دوم و سوم تغییرات نیروی محوری و گشتاور برشی به ترتیب پیش‌مته‌های ۴mm و ۸mm به همراه پیشروی‌های ذکر شده نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پیش‌مته، از نیروی محوری ایجاد شده در فرایند کاسته می‌شود. با کاهش نیروی محوری، قطر دایره‌های بیان‌کننده زبری سطح کاسته می‌شود. این حالت در تمامی سرعت‌ها وجود دارد و به طور کلی با افزایش پیش‌مته، دستیابی به کیفیت بالاتر زبری سطح، امکان‌پذیر می‌شود. این موضوع بجز حالت ۰/۲۲mm/min و ۸mm، در سایر آزمایش‌ها حاکم می‌باشد بنابراین نیروی محوری، گشتاور برشی و عامل‌ها به ترتیب اهمیت بیشترین نقش را در تغییر زبری سطح ایفا می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، نیروهای محوری در حالت پیش‌مته ۸mm نسبت به سایر پیش‌مته‌ها کاهش بیشتری دارند و کیفیت بالاتری در زبری سطح سوراخ تولید شده (با کاهش قطر دایره‌های ترسیم شده برای زبری سطح) بوجود آمده است.



شکل ۱۱ روند تغییر هر یک از متغیرهای وابسته هم‌زمان با تغییر توام عامل‌ها  
**Fig. 11** Variation of each the dependent variables with the change in the factors

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند کاهش نیرو سبب بهبود کیفیت سوراخ می‌شود. از طرف دیگر با افزایش گشتاور میزان زبری سطح افزایش محسوسی ندارد.

- composites, *Measurement*, Vol. 44, No. 10, pp. 2138–2148, 2011.
- [18] T. Kivak, G. Samtas, and A. C. Cicek, Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 45, No. 6, pp. 1547–1557, 2012.
- [19] K. Palanikumar, A. Muniaraj, Experimental investigation and analysis of thrust force in drilling cast hybrid metal matrix (Al–15%SiC–4%graphite) composites. *Measurement*, Vol. 53, pp. 240–250, 2014.
- [20] T.L. Liu, Development of new drill geometry and its performance evaluation, *Journal of Shaping Technology*, Vol. 9, pp. 161–169, 1991.
- [21] C. Godfrey Onwubolu, Sh. Kumar, Response surface methodology-based approach to CNC drilling operations: *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 171, pp. 41–47, 2006.
- [22] S. Neseli, Optimization of process parameters with minimum thrust force and torque in drilling operation using taguchi method, *Advanced in mechanical engineering*, pp. 1–10, 2014.
- [23] M.A. Amran, S. Salmah, N.I.S. Hussein, R. Izamshah, M. Hadzley, Sivarao, M.S. Kasim, M.A. Sulaiman, Effects of machine parameters on surface roughness using response surface method in drilling process, *procediaengineering*, Vol. 68, pp. 24–29, 2013.
- [24] W. Haerdle, L. Simar, Applied multivariate statistical analysis. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2003.
- [25] N.C. Giri, *Multivariate statistical analysis*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [26] R.J. Harris, *A primer of multivariate statistics*. 3rd ed. London: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2001.
- [27] J. H. Bray, S. E. Maxwell, *Multivariate Analysis of Variance: Quantitative applications in the social sciences*, Second Edition, Sage Publications, Beverly Hills, CA, 1985.
- [28] V. Shaikh, B.E., M.S, *Mist and microstructure characterization in end milling aisi 1018 steel using microlubrication*, University Of North Texas, 2013.
- [29] A. Sungkhapong, S. Chuchom, Machinability assessment of gray cast iron using carbide and ceramic tools, PSU-UNS, *International Conference on Engineering and Environment - ICEE2007*, Phuket, Thailand May 10–11, 2007.
- [30] T. Arvaje, F. Ismail, Machining stability in high-speed drilling-part 1: modeling vibration stability in bending, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 12–13, pp. 1563–1572, 2006.
- [31] A. Bokaian, Natural Frequencies Of Beams Under Tensile Axial Loads, *Journal of sound vibration*, Vol. 142, No. 3, pp. 481–498, 1990.
- [32] M. Pour, A. Aliabadi, S. Rahmanna, Identifying Process Damping of Turning Process using Time Series Analysis, *The Journal of Solid and Fluid vibrations*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 188, No. 5, pp. 701–715, 1995.
- [5] P.V. Bayly, S.A. Metzler, A.J. Schaut, S.G. Young, Theory of torsional chatter in twist drills: model, stability analysis and composition to test, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, pp. 552–561, 2001.
- [6] T. Arvaje, F. Ismail, Machining stability in high-speed drilling-part 1: modeling vibration stability in bending, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 12–13, pp. 1563–1572, 2006.
- [7] K. Ahmadi, H. Ahmadian, Modelling machine tool dynamics using adistributed parameter tool–holder joint interface, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1916–1928, 2007.
- [8] N. Gopal Koya, *Investigation of warping effect on coupled torsional axial vibrations of drilling tool*, Acharya Nagarjuna University, PhD Thesis, 2015.
- [9] J. C. Roukema, Y. Altintas, Time domain simulation of torsional–axial vibrations in drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46 pp. 2073–2085, 2006.
- [10] J. C. Roukema, Y. Altintas, Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol 47, pp. 1455–1473, 2007.
- [11] J. C. Roukema, Altintas, Y., Generalized modeling of drilling vibrations. Part II: Chatter stability in frequency domain. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 9, 1474–1485, 2007.
- [12] K. Ahmadi, Y. Altintas, Stability of lateral, torsional and axial vibrations in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 68, pp. 63–74, 2013.
- [13] T. Kivak, G. Samtas, A. Cicek, Taguchi based optimization of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drill. *Measurement*, Vol. 45, pp. 1547–1557, 2012.
- [14] T. Matsumura, I. Hori, T. Shirakashi, Analysis of cutting temperature in drilling process. *Journal of Material Forming*, Vol. 3, No. 1, pp. 499–502, 2010.
- [15] L. C. Brandao, R. T. Coelho; C. Henrique Lauro, Contribution to dynamic characteristics of the cutting temperature in the drilling process considering one dimension heat flow. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 17–18, pp. 3806–3813, 2011.
- [16] A. Akhavan Farid; S. Sharif; S. Alizadeh Ashrafi; Mohd Hasbullah Idris. Statistical analysis, modeling, and optimization of thrust force and surface roughness in high-speed drilling of Al–Si alloy. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*. Vol. 227, pp. 808–820, 2013.
- [17] K. Palanikumar, Experimental investigation and optimization in drilling of GFRP

- bending, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp.1563-1572, 2006.
- [37] T. L. Schmitz, T. J. Burns, Brian Dutterer, J. C. Ziegert, W. R. Winfough, Tool Length-Dependent Stability Surfaces, *Machining Science And Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 1–21, 2004.
- [38] A. Meyveci, I. Karacan, F.E. Hanifi, U. Cahgulu, H. Durmus, A study of wear and aged aluminum alloys 2XXX and 6XXX within the MANOVA statistical analysis. *MetalScience and Heat Treatment*, Vol. 53, No. 3-4, pp. 173-175, 2011.
- [39] P. Chakraborty, *Tool life and flank wear modeling of physical vapour deposited TiAlN/TiN multilayer coated carbide end Mill inserts when machining 4340 steel under dry and semi-dry cutting conditions*, PhD Thesis, University of Miami Scholarly Repository, Retrieved, 2008.
- Mechanics*, Vol. 5, No. 5, pp. 35-45, 2016. (in Persian)
- [33] P. V Bayly, S. A. Metzler, A. J. Schaut, K.A. Young, Theory of torsional chatter in twist drills: model, stability analysis and composition to test. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, No. 4, pp. 552-561, 2001.
- [34] J. C. Roukema, Y. Altintas, Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1455–1473, 2007.
- [35] J. C. Roukema, Y. Altintas, Generalized modeling of drilling vibrations. Part II: Chatter stability in frequency domain. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 9, 1474-1485, 2007.
- [36] T. Arvajah., Machining stability in high-speed drilling-part1: Modeling vibration stability in