



بررسی تاثیر پارامترهای فرایند سوراخ کاری بر روی گشتاور مته و شکل براده

جواد سماوی^۱، علی اکبر اکبری^{۲*}، عنایت ا... دزبانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشگاه فردوسی مشهد،

Samavi.Javad@yahoo.com

^۲ دانشیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، *Akbari.um.ac.ir*

^۳ مربی گروه مکانیک، دانشگاه منتظری مشهد، *E_dezyani@yahoo.com*

چکیده

امروزه فرآیندهای ماشین کاری به یکی از پرکاربردترین روش ها در تولید گسترده قطعات تبدیل شده اند و سوراخ کاری یکی از پرستفاده ترین فرآیندهای ماشین کاری در ساخت و تولید می باشد. حدود ۲۵ درصد زمان متوسط ماشین کاری قطعات گوناگون مربوط به سوراخ کاری است. در نتیجه سوراخ کاری در طول فرایند تولید یک گلوگاه محسوب می شود و این موضوع در شرکت های سوله سازی بسیار مشهود است. لذا به منظور کم کردن مشکلات ناشی از انجام سوراخ کاری به دنبال بهینه سازی فرایند سوراخ کاری می باشند. در همین راستا به بررسی فرایند سوراخ کاری پرداخته و پارامترهای تاثیرگذار آن مشخص گردیده است. در فرایند سوراخ کاری دو عامل نقش مهمی دارند. عامل دستگاه و عامل مته که خود شامل فاکتورها و سطح هایی می شوند. با بررسی فاکتورها و سطوح مربوط به دستگاه و مته، طراحی آزمایش ها انجام گردید و فاکتورهایی نظیر تعداد دور، نرخ پیشروی، زاویه ی رأس مته و زاویه آزاد مته در نظر گرفته شده است. ترتیب آزمایش ها توسط روش تاگوچی و تحلیل داده ها توسط سیگنال به نویز، روش پاسخ سطح و آنالیز واریانس انجام شده است. کمیت گشتاور سر مته و شکل براده به عنوان خروجی فرایند در نظر گرفته شده اند. در نهایت با توجه به تحلیل سیگنال به نویز مقدار بهینه گشتاور شامل تعداد دور ۳۲۰، نرخ پیشروی ۰/۱۳، زاویه رأس ۱۲۸ و زاویه آزاد ۱۰ درجه می باشد.

کلمات کلیدی: بهینه سازی، سوراخ کاری، گشتاور، روش تاگوچی، پاسخ سطح

The Fourth National Conference

15/12/2017-(Mazandaran)

Kome elmavaran danesh

R.S. Institute

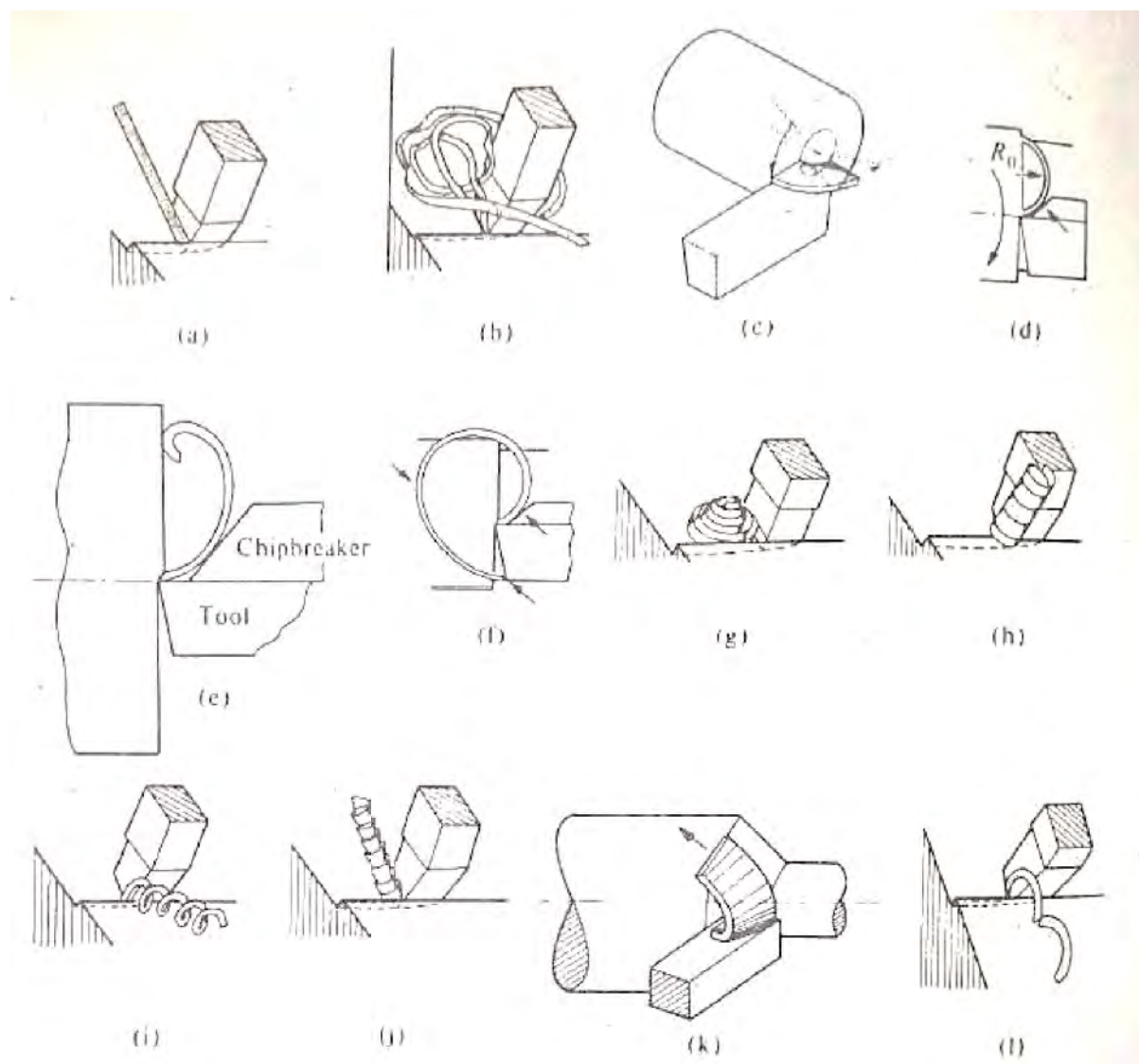
Article Code: BME-23011

(Indexing of accepted Articles in Civilica)

۱. مقدمه

سوراخ کاری یکی از پرکاربردترین فرآیندهای ماشینکاری فلزات در ساخت و تولید می باشد. به عنوان نمونه در ساخت یک بال هواپیمای جت مسافری بوئینگ بیشتر از یک میلیون سوراخ زده می شود [۱]. با وجود اینکه مته ها می توانند سوراخ های دقیق بزنند ولی در بعضی از صنایع که دقت و کیفیت سوراخ حائز اهمیت است از مته به عنوان یک ابزار خشن تراش و قبل از فرآیندهای برقکاری، داخل تراشی و سنگ زنی استفاده می شود [۲]. تحقیقات جدید نشان می دهد که حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد زمان متوسط ماشین کاری قطعات گوناگون مربوط به سوراخ کاری است [۳]؛ که نشان دهنده اهمیت این فرایند در طول پروسه تولید می باشد.

تغییرات سرعت برش در طول لبه برش و زاویه تمایل لبه برش و همچنین تمایل براده به پیچ خوردن و دور شدن از سطح براده، باعث ایجاد انواع گوناگونی از شکل براده ها می شود، که تعدادی از این براده ها در شکل ۱ نشان داده شده است [۲].



شکل (۱) انواع براده بر اساس اسپنس [۲]



چهارمین کنفرانس ملی بهینه سازی در علوم و مهندسی

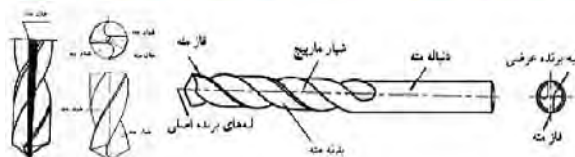
The Fourth National Conference on Optimization in Science and Engineering

a براده نواری پیوسته، b براده چنبره، c براده واشری، d براده قوسی، e براده گوشه شکل کوتاه، f براده گوشه شکل بلند، g براده حلزونی، h براده لوله ای مارپیچ، i براده فنری (واشری)، j براده مارپیچ مخروطی، k براده ترکیبی از نوع c, d, l براده قوسی متصل. استرنکوسکی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به وسیله روش اجزای محدود به پیش بینی نیروی عمودی و گشتاور در سوراخ کاری پرداختند. آن‌ها زاویه آزاد را ۱۰ درجه انتخاب کردند و برای زاویه مارپیچ ۶ سطح تعریف کردند. طبق نتایج به دست آمده، در AISI 1020 زاویه مارپیچ بزرگتر باعث کاهش نیروی عمودی و گشتاور می شود [۴]. پاول^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ بر روی نوک مته‌ها کار کردند و نشان دادند که حالت بهینه نیرو و گشتاور زمانی رخ می دهد که از مته با نوک کونیکال^۳ استفاده شود [۵]. ایزبیلر^۴ و قاسمیه^۵ در سال ۲۰۱۱ تحلیل المان محدود سوراخ کاری را بر روی آلیاژ تیتانیوم انجام داده اند. نتایج بر این امر دلالت داشتند که افزایش پیشروی و سرعت برشی باعث افزایش گشتاور و نیرو می شود. در نتیجه برای بهینه کردن گشتاور و نیرو باید نرخ پیشروی و سرعت برشی کاهش پیدا کند [۶]. نایسن^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی مدل تحلیلی نیروی عمودی و گشتاور در سوراخ کاری پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های تجربی را بر روی فولاد AISI 4142 با سختی 300 HP انجام دادند و از دو ابزار با قطر ۹ و ۶ میلی متر، زاویه براده ۳۰، زاویه رأس ۱۴۵ و زاویه آزاد ۱۰ و ۱۲ درجه استفاده کردند. نتایج حاکی از آن است که حالت بهینه گشتاور و نیرو با کاهش پیشروی برای هر دو حالت مته به دست می آید [۷]. وانکنتی^۷ و ژانتا^۸ در سال ۲۰۱۴ با استفاده از منطق تاگوچی به بهینه سازی پارامترهای سوراخ کاری در کامپوزیت پرداخته اند. عده دوران، نرخ پیشروی، زاویه رأس و لبه برنده عرضی جزء پارامترهای ورودی و نیرو، گشتاور، خطای دایره ای بودن و زبری سطح را به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته اند. نتایج حاصل از آزمایش‌های بدین صورت هست که نرخ پیشروی و عده دوران بیشترین تأثیر را بر روی نیرو، گشتاور و زبری سطح دارند. سرعت و لبه برنده عرضی بیشترین تأثیر را بر روی دایره ای بودن سوراخ دارا می باشند. برای کاهش گشتاور باید کمترین لبه برنده عرضی و بیشترین زاویه رأس را داشته باشیم [۸].

۲. روش کار

امروزه فرایند سوراخ کاری جزء مهم ترین فرایندهای ساخت و تولید است. به همین دلیل آزمایش‌ها فراوانی برای بهینه سازی این فرایند صورت می گیرد. استفاده مبرم از این فرایند در شرکت‌های سوله سازی به اوج خود می رسد. در این مقاله آزمایش‌ها بر روی فولاد ساختمانی St۳۷ و با مته ای به قطر ۳۳ میلی متر و جنس HSS صورت گرفت. با توجه به تحقیقات انجام شده بهینه سازی بر روی چنین قطر مته ای برای دیگر فرایندها انجام پذیرفته است. ابتدا به شناخت مته پرداخته و سپس مراحل کار توضیح داده خواهد شد. همان طور که در شکل ۲ قابل مشاهده می باشد، یک مته از اجزای زیر تشکیل شده است.

^۱ Strenkowski
^۲ Paul
^۳ Conical Point
^۴ Isbilir
^۵ Ghassemieh
^۶ Naisson
^۷ Vankanti
^۸ Ganta



شکل (۲) هندسه مته

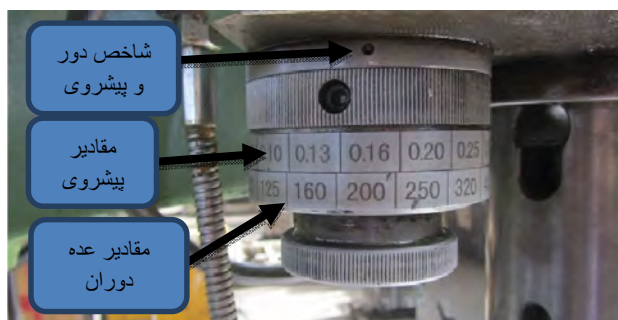
در عملیات سوراخ کاری سه پارامتر اصلی نقش بازی می کنند و آن‌ها عبارت‌اند از:

۱- دستگاه

۲- ابزار برشی (مته)

۳- قطعه کار

در دستگاه می‌توان میزان دور و پیشروی را مشخص کرد. می‌توان با زوایای مته عملیات سوراخ کاری را تسهیل بخشید. همچنین جنس قطعه و عناصر آلیاژی آن تأثیر فراوانی بر روی براده برداری دارند. نظر به اینکه جنس قطعه و عناصر آلیاژی آن را در این فرایند نمی‌توان مورد ارزیابی قرار داد، به ارزیابی فاکتورهای موجود در دستگاه و مته پرداخته شده است. پارامترهای قابل تغییر در دستگاه‌هایی که عملیات سوراخ کاری انجام می‌دهند، نرخ پیشروی و عده دوران است؛ که با توجه به دستگاه مقادیر و تنظیمات مختلفی دارند. شکل ۳ مقادیر عده دوران و نرخ پیشروی را به همراه شاخص قرارگیری آن‌ها در دستگاه رادیال عمودی نشان می‌دهد.



شکل (۳) مقادیر دور و پیشروی به همراه شاخص آن‌ها

با توجه به اینکه دو فاکتور زاویه رأس و زاویه آزاد جزء ورودی‌های آزمایش بودند و زوایای خاصی را هم شامل می‌شدند، لذا تیز کردن آن‌ها توسط سنگ سنباده معمولی امکان‌پذیر نبود. لذا زوایای مورد نظر به وسیله دستگاه سنگ و فیکسچر مخصوص آن تیز شدند. شکل ۴ دستگاه سنگ و فیکسچر را نشان می‌دهد.



شکل (۴) استقرار مته بر روی فیکسچر و نحوه تیز کردن آن



چهارمین کنفرانس ملی بهینه سازی در علوم و مهندسی

The Fourth National Conference on Optimization in Science and Engineering

ارزیابی مقادیر فاکتورهای موجود از طریق لودسل انجام شده و سنجش گشتاور وارد بر سر مته مورد ارزیابی قرار گرفت. دستگاه سنجش گشتاور را در شکل ۵ مشاهده می کنید.



شکل (۵) دستگاه سنجش نیرو

۳. طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها، مطالعه و بررسی توأم چندین متغیر فرآیند می باشد. با ترکیب چندین متغیر در یک مطالعه، به جای انجام مطالعات مجزا برای هر یک از آنها، تعداد آزمایش‌ها مورد نیاز به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در نتیجه درک بهتری در مورد فرآیند حاصل می گردد. مرسوم ترین روش طراحی آزمایش‌ها بررسی تمامی شرایط ممکن در یک آزمایش شامل چند فاکتور است. در این روش اگر U تعداد فاکتورهای تحت بررسی و K تعداد سطوح مدنظر هر فاکتور باشد؛ تعداد کل آزمایشات ممکن، مطابق رابطه (۱) برابر N خواهد بود.

$$N = K^U \quad (1)$$

درحالی که با استفاده از منطق تاگوچی و آرایه‌های متعامد آن می توان به نتایج مطلوب با دقت بالا و صرف زمان و هزینه کمتر به همراه تعداد آزمایش‌های به مراتب کمتر بهره برد [۹]. ابتدا با استفاده از مطالعه کتاب‌ها، مقالات و انجام آزمایش‌های عملی، فاکتورها و سطوح مورد نیاز مشخص گردید. دو فاکتور عده دوران و نرخ پیشروی مربوط به دستگاه دریل و دو فاکتور زاویه رأس و آزاد مربوط به مته انتخاب گردیدند؛ که برای هر کدام از این فاکتورها چهار سطح اتخاذ گردید. جدول ۱ فاکتورها و سطوح انتخابی فرایند را نشان می دهد.

جدول (۱) فاکتورها و سطوح انتخابی فرایند

فاکتور	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
عده دوران (rpm)	۱۶۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۲۰
پیشروی (mm/min)	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۲	۰/۲۵
زاویه رأس (درجه)	۱۰۸	۱۱۸	۱۲۸	۱۳۸
زاویه آزاد (درجه)	۸	۱۰	۱۲	۱۴

از آنجایی که استفاده از منطق تاگوچی مدنظر قرار داشت ساختار آزمایش‌ها را به وسیله نرم افزار مینیتب، بخش تاگوچی انجام گردید. با انتخاب مقدار فاکتور و سطح آن‌ها (چهار فاکتور چهار سطحی)، تاگوچی L_{16} یعنی تعداد ۱۶ آزمایش را پیشنهاد کرد. جدول ۲ ترتیب آزمایش‌ها را نشان می دهد.



چهارمین کنفرانس ملی بهینه سازی در علوم و مهندسی
*The Fourth National Conference on Optimization in
 Science and Engineering*

جدول (۲) ترتیب آزمایش‌ها به روش تاگوچی

ردیف	عده دوران (rpm)	پیشروی (mm/min)	زاویه رأس (درجه)	زاویه آزاد (درجه)
۱	۱۶۰	۰/۱۳	۱۰۸	۸
۲	۱۶۰	۰/۱۶	۱۱۸	۱۰
۳	۱۶۰	۰/۲	۱۲۸	۱۲
۴	۱۶۰	۰/۲۵	۱۳۸	۱۴
۵	۲۰۰	۰/۱۳	۱۱۸	۱۲
۶	۲۰۰	۰/۱۶	۱۰۸	۱۴
۷	۲۰۰	۰/۲	۱۳۸	۸
۸	۲۰۰	۰/۲۵	۱۲۸	۱۰
۹	۲۵۰	۰/۱۳	۱۲۸	۱۴
۱۰	۲۵۰	۰/۱۶	۱۳۸	۱۲
۱۱	۲۵۰	۰/۲	۱۰۸	۱۰
۱۲	۲۵۰	۰/۲۵	۱۱۸	۸
۱۳	۳۲۰	۰/۱۳	۱۳۸	۱۰
۱۴	۳۲۰	۰/۱۶	۱۲۸	۸
۱۵	۳۲۰	۰/۲	۱۱۸	۱۴
۱۶	۳۲۰	۰/۲۵	۱۰۸	۱۲

۴. نتایج و تحلیل آن

نظر به اینکه ترتیب آزمایش‌ها مشخص شد، عملیات سوراخ‌کاری برای به دست آوردن خروجی‌های موردنظر آغاز گردید و گشتاور هر آزمایش به وسیله لودسل صورت پذیرفت. جدول ۳ خروجی‌های حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول (۳) خروجی‌های آزمایش

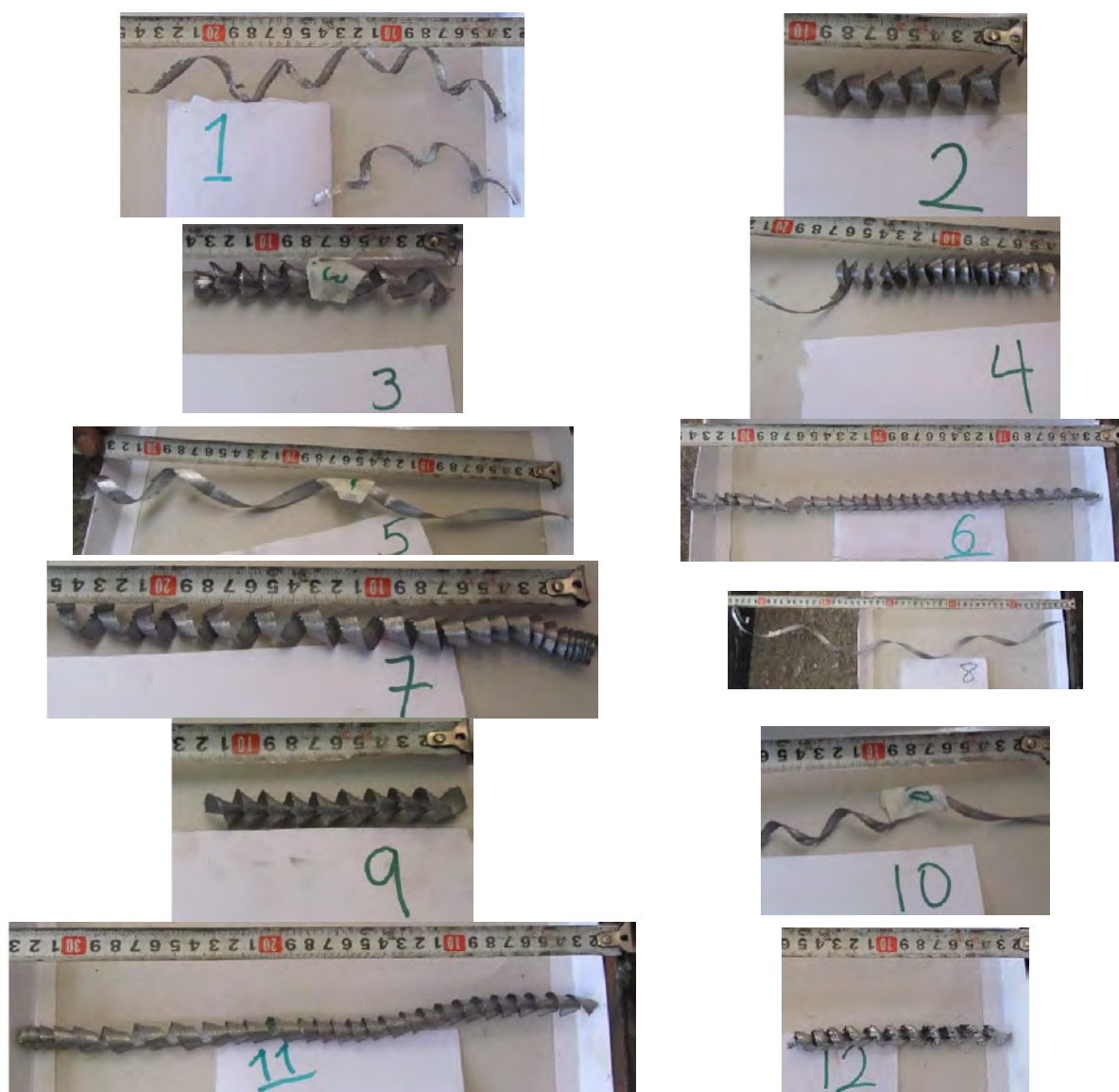
ردیف	عده دوران (rpm)	پیشروی (mm/min)	زاویه رأس (درجه)	زاویه آزاد (درجه)	گشتاور
۱	۱۶۰	۰/۱۳	۱۰۸	۸	۶۰/۷
۲	۱۶۰	۰/۱۶	۱۱۸	۱۰	۵۵/۹
۳	۱۶۰	۰/۲	۱۲۸	۱۲	۶۷/۸
۴	۱۶۰	۰/۲۵	۱۳۸	۱۴	۹۹/۳
۵	۲۰۰	۰/۱۳	۱۱۸	۱۲	۴۶/۸
۶	۲۰۰	۰/۱۶	۱۰۸	۱۴	۵۷
۷	۲۰۰	۰/۲	۱۳۸	۸	۶۸/۹
۸	۲۰۰	۰/۲۵	۱۲۸	۱۰	۷۶/۲
۹	۲۵۰	۰/۱۳	۱۲۸	۱۴	۴۴/۳
۱۰	۲۵۰	۰/۱۶	۱۳۸	۱۲	۶۰/۹
۱۱	۲۵۰	۰/۲	۱۰۸	۱۰	۶۵



چهارمین کنفرانس ملی بهینه سازی در علوم و مهندسی
*The Fourth National Conference on Optimization in
Science and Engineering*

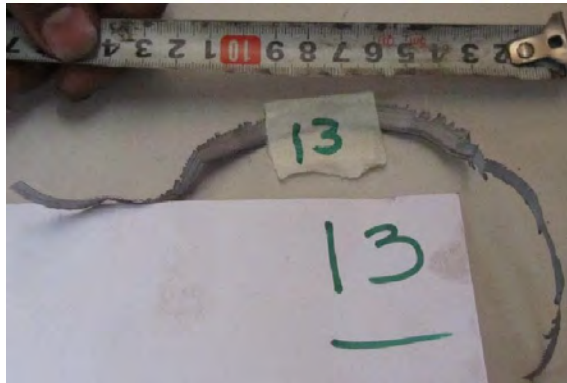
۱۲	۲۵۰	۰/۲۵	۱۱۸	۸	۷۴/۴
۱۳	۳۲۰	۰/۱۳	۱۳۸	۱۰	۴۷/۲
۱۴	۳۲۰	۰/۱۶	۱۲۸	۸	۵۳
۱۵	۳۲۰	۰/۲	۱۱۸	۱۴	۶۴/۶
۱۶	۳۲۰	۰/۲۵	۱۰۸	۱۲	۸۰/۳

همچنین برای داشتن تصویر صحیحی از براده تشکیل شده توسط مته براده‌های حاصل از هر آزمایش ثبت و در شکل ۶ قابل مشاهده است.





چهارمین کنفرانس ملی بهینه سازی در علوم و مهندسی
*The Fourth National Conference on Optimization in
 Science and Engineering*



شکل (۶) براده‌های مربوط به هر آزمایش

از آنجایی که بهینه کردن فرایند سوراخ‌کاری در کمینه کردن مقادیر گشتاور خروجی است، لذا در تحلیل سیگنال به نویز از گزینه "کوچکتر بهتر است" استفاده گردید.

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i} \right)^2 \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، S/N نسبت سیگنال به نویز، y_i مقدار متغیر پاسخ در تکرار i ام و n تعداد تکرار آزمایش است. این رابطه در مواردی کاربرد دارد که یک خصوصیت نامنفی بررسی می‌شود که ایده‌آل آن صفر است. در این حالت هرچه مقدار بدست آمده کمتر باشد، بهتر است [۱۰]. نتایج حاصل از تحلیل سیگنال به نویز برای خروجی مورد نظر در جدول ۴ و شکل ۷ قابل مشاهده است.

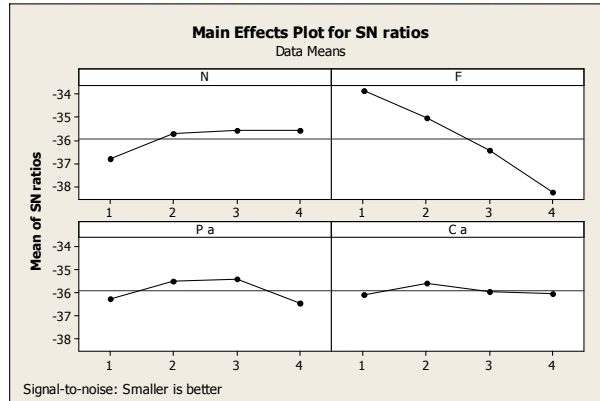
جدول (۴) تحلیل سیگنال به نویز گشتاور

Response Table for Signal to Noise Ratios				
Smaller is better				
Level	N	F	Pa	Ca
1	-36.80	-33.87	-36.28	-36.09
2	-35.73	-35.06	-35.50	-35.5
3	-35.58	-36.47	-35.42	-35.96
4	-35.57	-38.28	-36.47	-36.05
Delta	1.23	4.41	1.05	0.50
Rank	2	1	3	4



چهارمین کنفرانس ملی بهینه سازی در علوم و مهندسی

The Fourth National Conference on Optimization in Science and Engineering



شکل (۷) گراف سیگنال به نویز گشتاور

خروجی‌های به دست آمده در نرم افزار Minitab قرار گرفته و توسط تحلیل سیگنال به نویز مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل سیگنال به نویز خروجی گشتاور قابل مشاهده و به صورت زیر قابل نتیجه گیری است.

- ✓ از میان عده دوران‌های ۱۶۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۲۰ مقدار عده دوران ۳۲۰ دور بر دقیقه با داشتن بیشترین مقدار سیگنال به نویز یعنی ۳۵/۵۷- به عنوان سطح بهینه عده دوران انتخاب گردید. البته عده دوران ۲۰۰ و ۲۵۰ به دلیل اینکه مقدار سیگنال به نویز آن‌ها نزدیک به مقدار بهینه است، قابل استفاده هستند.
- ✓ نرخ پیشروی ۰/۱۳ میلی‌متر بر دقیقه دارای بیشترین مقدار سیگنال به نویز یعنی ۳۵/۵۶- است که از نسبت سیگنال به نویز پیشروی‌های ۰/۱۶، ۰/۲ و ۰/۲۵ بهتر بوده و به عنوان سطح بهینه پیشروی مطرح می‌شود.
- ✓ با توجه به مقدار ۳۵/۴۵- برای زاویه رأس ۱۲۸ درجه، این نتیجه حاصل می‌گردد که این زاویه از زوایای رأس ۱۰۸، ۱۱۸ و ۱۳۸ بهتر بوده و به عنوان سطح بهینه مطرح می‌شود.
- ✓ زاویه آزاد ۱۰ درجه با مقدار سیگنال به نویز ۳۵/۵۰- به عنوان سطح بهینه از میان سطوح ۸، ۱۲ و ۱۴ درجه انتخاب گردید.

جدول ۵ نتیجه حاصل از آنالیز واریانس را نشان می‌دهد که بر مبنای آن از میان فاکتورهای عده دوران، پیشروی، زاویه رأس و زاویه آزاد، فاکتور پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی نیرو می‌گذارد و این به دلیل بیشترین مقدار F و کمترین مقدار P در این فاکتور می‌باشد.

جدول (۵) آنالیز واریانس گشتاور

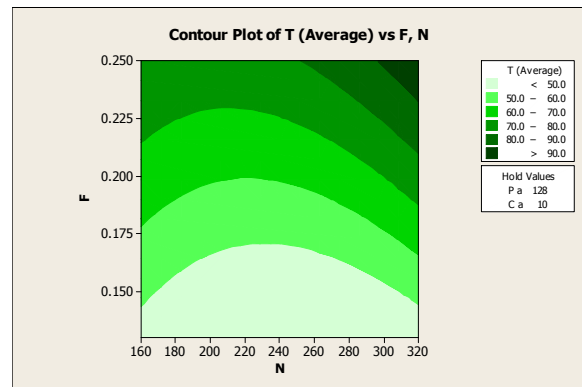
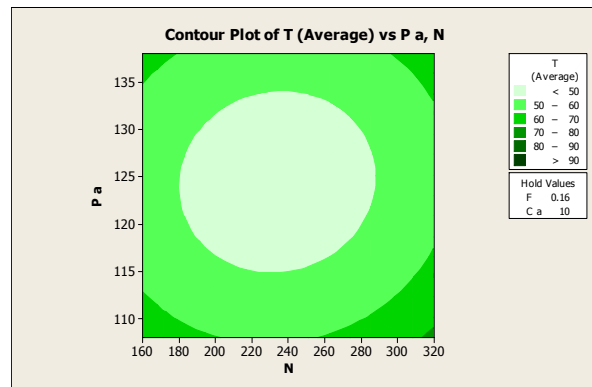
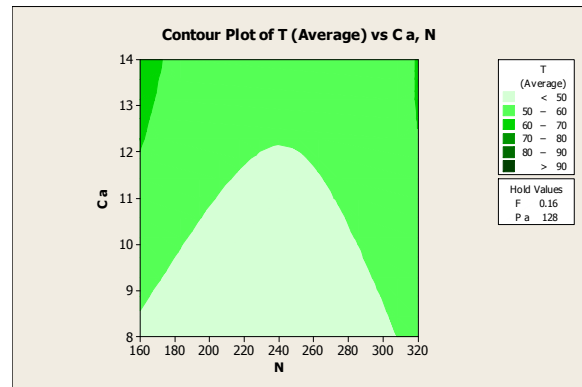
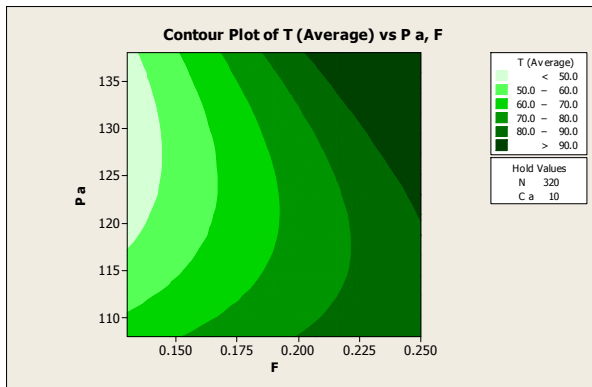
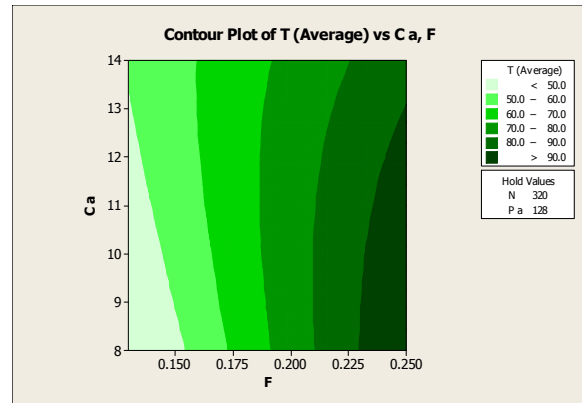
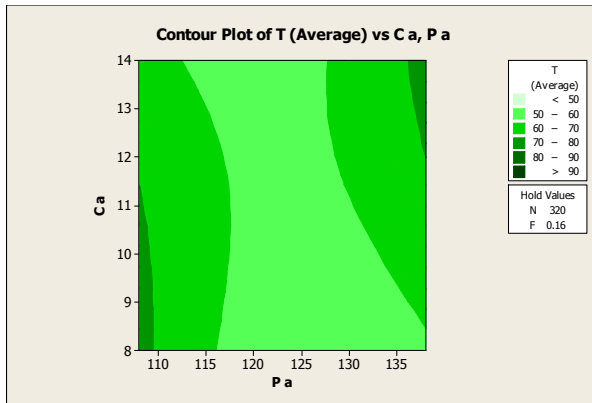
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
N	1	181.04	181.04	181.04	4.24	0.064
F	1	2346.67	2346.67	2346.67	55.02	0.000
Pa	1	19.96	19.96	19.96	0.47	0.508
Ca	1	16.27	16.27	16.27	0.38	0.549
Error	11	469.16	469.16	42.65		
Total	15	3033.09				

S = 6.53075 R-Sq = 84.53% R-Sq(adj) = 78.91%

در شکل ۷ دو پارامتر ثابت بوده و دو پارامتر دیگر باهم ارزیابی می‌شوند. در دو پارامتر ثابت، سطوح بهینه آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. رنگ سبز روشن نشان‌دهنده محدوده انجام عملیات سوراخ کاری در حالت کمینه گشتاور است. از این رو انتخاب سطوحی از فاکتورها که در این محدوده هستند، حالت بهتری از عملیات سوراخ کاری را در پی خواهد داشت. مدل کانتور حاصل از روش پاسخ سطح گشتاور را نشان می‌دهد.



چهارمین کنفرانس ملی بهینه سازی در علوم و مهندسی
The Fourth National Conference on Optimization in Science and Engineering



شکل (۷) کانتور روش پاسخ سطح گشتاور

۴. نتیجه گیری

بهینه سازی فرایند سوراخکاری در یکی از شرکت های سوله سازی با استفاده از روش تاگوچی صورت پذیرفت. خروجی فرایند، اندازه گیری گشتاور وارده به مته ای با قطر ۳۳ میلی متر می باشد. خروجی توسط تحلیل سیگنال به نویز و آنالیز واریانس مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر سطوح بهینه مشخص گردید. نتایج حاصل از سطح بهینه هر آزمایش به صورت زیر می باشد:

- ✓ عده دوران ۲۰۰ دور بر دقیقه
- ✓ نرخ پیشروی ۰/۱۳ میلی متر بر دقیقه



چهارمین کنفرانس ملی بهینه‌سازی در علوم و مهندسی
*The Fourth National Conference on Optimization in
Science and Engineering*

- ✓ زاویه رأس ۱۱۸ درجه
- ✓ زاویه آزاد ۱۴ درجه

که با توجه به تحلیل سیگنال به نوبت می‌توان نرخ پیشروی را موثرترین فاکتور بر روی خروجی فرایند دانست.

مراجع

1. P.V. Metzler, A.J. Schaut, 2001, K.A. young, "Theory of Torsional Chatter in Twist Drills: Model, Stability Analysis and composition to test", Transactions of the ASEM129
2. M.C. Shaw, 2005, "Metal Cutting Principles, Second edition", oxford university press, New York,
3. J. Wang, Q. Zhang, 2008, "a study of high-performance plane rake faced twist drills. Part I: Geometrical analysis and experimental investigation", international journal of machine tools & manufacture 48, pp. 1276-1285
4. Strenkowski, J., C. Hsieh, and A. Shih, 2004, "An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(12): pp. 1413-1421
5. Paul, A., S.G. Kapoor, and R.E. DeVor, 2005, "Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(4): pp. 421-431.
6. Isbilir, O. and E. Ghassemieh, 2011, "Finite element analysis of drilling of titanium alloy", Procedia Engineering, 10: pp. 1877-1882.
7. Naisson, P., J. Rech, and H. Paris, 2013, "Analytical modeling of thrust force and torque in drilling", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227(10): pp. 1430-1441.
8. Vankanti, V.K. and V. Ganta, 2014, "Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method", Journal of Materials Research and Technology, 3(1): pp. 35-41
9. T. N. Goh, 2001, "Industrial Systems Engineering Department Information Transformation perspective on experimental design", Journal of Quality Engineering, 13(3): pp. 349- 355
10. Genichi Taguchi, 2005, "Taguchi quality engineering handbook", New Jersey