



مطالعه تجربی و تحلیلی پارامترهای مؤثر بر زبری سطح در فرایند سوراخ‌کاری فولاد به کمک ارتعاشات فرماحتی

مهندی ظهور^{۱*}، اسعد شاهویسی^۲، بهمن قربانی^۲، توحید سلطان‌زاده^۲

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۵-۱۹۹۶، MZohoor@kntu.ac.ir

چکیده

دقت و کیفیت سطح نهایی از عوامل قابل توجه در محصولات، به ویژه در فرایندهای سوراخ‌کاری است. یکی از راههای کاهش یا حذف پلیسه و بهبود زبری سطح در سوراخ‌کاری به کار بردن ارتعاشات فرماحتی در فرایند سوراخ‌کاری می‌باشد. سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فرماحتی یکی از روش‌های نوین ماشین‌کاری است که برای سوراخ‌کاری مواد سخت و غالباً غیرهادی الکتریکی به کار می‌رود. لذا در این پژوهش تأثیر برخی پارامترهای مؤثر از قبیل، سرعت دورانی (۷۱۰-۵۰۰ دور بر دقیقه)، نرخ پیشروی (۰/۰۸-۰/۱۶ میلی‌متر بر دور)، دامنه ارتعاشات مته (۱-۵ میکرومتر) بر روی زبری سطح دیواره سوراخ در فرایند سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فرماحتی بر روی دو نوع فولاد (VCN-150 و VCN-37) (فولاد سردکار) به صورت تجربی بررسی شده است. سپس، نتایج به دست آمده با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها آنالیز گردید و اثر هر یک از پارامترها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که در سوراخ‌کاری فولاد سخت‌تر (VCN-150) با افزایش دامنه ارتعاشات مته و افزایش سرعت دورانی سطح صافتری به دست آمده در سوراخ‌کاری فولاد نرمتر (VCN-37) با افزایش دامنه ارتعاشات و سرعت دورانی، سطح سوراخ پرتر می‌شود. در نهایت می‌توان بیان کرد که رفارم برخی پارامترها بر روی دو نوع فولاد مشابه ولی رفتار بعضی پارامترها بر روی دو نوع فولاد مقاومت و مضاد می‌باشد. کلید واژگان: سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فرماحتی، زبری سطح، سرعت دورانی، دامنه ارتعاشات، نرخ پیشروی

Experimental and Analytical Study on Effective Parameters on Surface Roughness of Steel in Ultrasonic Assisted Drilling

Mehdi Zohoor^{1*}, Asaad Shahveis¹, Bahman Ghorbani¹, Tohid Soltan zadeh²

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, MZohoor@kntu.ac.ir

ABSTRACT

The accuracy and quality of the final products are of desired properties especially in the drilling processes. One way to reduce or eliminate the burr and surface roughness improvement is the utilization of ultrasonic vibrations in the drilling process. Ultrasonic Assisted Drilling is one of the advanced machining processes that is being used for hard and non-conductive materials. In this study, the effect of the spindle speed (500-710 RPM), feed rate (0.08-0.16 mm/rev), vibration amplitude (5-10 µm) (ultrasonic power) have been studied on surface roughness of the machined steels ST37 (soft steel) and VCN-150 (cold worked) in ultrasonic assisted drilling, experimentally. Then, the results were analyzed by using design of experiment and the effects of each parameter were studied. Results showed that the surface quality can be improved with increasing the vibration amplitude and spindle speed in hard metal (VCN-150). On the other hand, the surface quality decreased with increasing the vibration amplitude and spindle speed in mild steel (ST37). Finally, it can be stated that the behavior of some of the parameters is similar on two steels but the behavior of others may be different on the same workpieces.

Keywords: Ultrasonic vibration assisted drilling, surface roughness, spindle speed, vibration amplitude, feed rate

ارتعاشات فرماحتی می‌باشد که در آن علاوه بر حرکت چرخشی متدالو خود با فرکانس در حدود ۱۶ تا ۴۰ کیلوهertz و دامنه ۲ تا ۳۰ میکرومتر در جهت طولی در راستای محور دوران ارتعاش می‌گردد [۱-۴]. ارتعاشات فرماحتی سبب صلبیت ابزار، کاهش سرخوردن ابزار در ابتدای سوراخ‌کاری، افزایش عمر مته می‌گردد [۲]. مزیت‌های مستند فراوانی برای سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فرماحتی وجود دارد. این مزیت‌ها شامل این موارد می‌شوند [۳-۶]. کاهش نیرو و گشتاور (که این مزیت علاوه بر ذخیره انرژی، احتمال تغییر شکل قطعات نازک در حین سوراخ‌کاری را کاهش می-

- ۱- مقدمه

تقرباً بیش از ۲۰٪ از فرایندهای ماشین‌کاری مربوط به عملیات سوراخ‌کاری می‌باشد. دقت و کیفیت سطح نهایی از عوامل قابل توجه در محصولات، به ویژه در فرایندهای سوراخ‌کاری است. پلیسه معمولاً به عنوان یک خروجی منفی در مراحل مونتاژ در نظر گرفته می‌شود. یکی از راههای کاهش یا حذف پلیسه و بهبود زبری سطح در سوراخ‌کاری به کار بردن ارتعاشات فرماحتی در فرایند سوراخ‌کاری می‌باشد. سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات فرماحتی یکی از روش‌های نوین ماشین‌کاری است که برای سوراخ‌کاری مواد سخت و غالباً غیرهادی الکتریکی به کار می‌رود. این روش ترکیبی از ماشین‌کاری سنتی و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Zohoor, A. Shahveis, B. Ghorbani, T. Soltan zadeh, Experimental and Analytical Study on Effective Parameters on Surface Roughness of Steel in Ultrasonic Assisted Drilling, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 291-295, 2015 (in Persian)

۲- روش انجام آزمایش

در این پژوهش برای سوراخ کاری علاوه بر حرکت متداول ابزار، از ارتعاشات التراسونیک استفاده شد. ترانسdiyosr بکار رفته در مجموعه التراسونیک از نوع پیزو الکترونیک بود که امواج الکترونیکی تولید شده ژنراتور را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می کند. جنس هرن از آلومینیوم ۷۰۷۵ بوده و برای ایجاد حرکت دورانی از دستگاه تراش مدل TN40A ساخت کارخانه ماشین سازی تبریز استفاده شد.

برخی تجهیزات دیگر به شرح زیر است:

۱- ژنراتور^۱ برای تبدیل برق ۵۰ هرتز شهری به فرکانس بیشتر از ۱۷۵۰۰ کیلوهertz و رزلوشن ۱ هرتز می باشد.

۲- کامپیوتر برای کنترل توان و فرکانس که از نرم افزار Labview^۲ توسعه داده شده توسط شرکت مسترسونیک^۳ بهره می گیرد.

۳- مته از جنس فولاد تنیده به قطر ۵ میلی متر

۴- زبری سنجدستی

فرکانس تشدید برای ابزار گیر در آزمایشها ۲۳۴۶۰ هرتز بود.
در شکل ۱ کله گی التراسونیک و فیکسچر مشاهده می شود.

در جدول ۱ پارامترها و سطوحهای مورد بررسی در آن درج شده است.
لازم به ذکر است که مته در سرعت دورانی کمتر از ۵۰۰ دور بر دقیقه شکسته شده و همچنین دامنه ارتعاشات نوک مته در توان ۲۵٪ حدود ۵ میکرون و در توان ۵٪ در حدود ۱۰ میکرون می باشد.

با استفاده از طرح عاملی کامل [۱۵] تعداد ۱۶ = ۴^۴ آزمایش ممکن برای طرح مورد بررسی وجود دارد. با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته از هر نوع فولاد ۸ نمونه آماده گردید. نحوه آماده سازی نمونه ها بدین صورت بود که از شفت هایی به قطر ۳۰ mm ۳۰ میلی متر، نمونه هایی به طول ۲۰ mm بریده شد.



شکل ۱ مجموعه ابزار گیر و فیکسچر و قطعه کار

جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی به همراه سطوح آنها

	پارامتر	سطح ۱	سطح ۲
۷۱۰	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	۵۰۰	A
۰/۱۶	نرخ پیشروی (میلی متر بر دور)	۰/۰۸	B
۵۰	توان فرماصوتی (درصد)	۲۵	C
VCN-150	جنس قطعه کار	St37	D

6. Generator MSG.1200.IX
7. Labview
8. Mastersonic

دهد)، افزایش دقت مکانی^۱ (به ویژه در مواردی که سوراخ روی سطح شبیه دار ایجاد می شود)، کاهش یا حذف پلیسه، بهبود قابل ملاحظه در خروج براده از سوراخ (که این مزیت به ایجاد سوراخ های عمیق تر کمک می کند)، بهبود گردی^۲ و اندازه سوراخ، افزایش عمر مته، قطعه کار را از فرایندهای برقوزنی و پلیسه گیری بی نیاز می کند. این روش برای ماشین کاری مواد خاص نیز مفید است که می توان به مواد چند لایه اشاره کرد که با استفاده از این روش در هنگام سوراخ کاری لایه لایه^۳ نمی شود و مواد لایافی که در هنگام ماشین کاری کمتر الیاف آن جدا می شود و همچنین مواد سخت و ترد با استفاده از این تکنیک کمتر دچار ترک خوردگی می شود^[۶].

اولین کارهای تجربی در زمینه سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فرماصوتی به اوائل سال های ۱۹۵۰ برمی گردد^[۷]. مزایای این روش باعث شده است تا امروزه تحقیقات متعددی در این زمینه صورت پذیرد که برخی از آن ها به شرح ذیل است:

خامدی و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۸ از این روش برای سوراخ کاری استخوان که کاربرد فراوان در جراحی ارتوپدی دارد استفاده نمودند و اثر نرخ پیشروی و سرعت دورانی را بر روی نیروی سوراخ کاری و دما بررسی کردند. پوچانا و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۹ پارامترهای نیروی پیشروی، تعییر فرم براده و دما را بررسی کردند.

فادنیس و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۲ اثر نرخ سرعت بر بشی را در سوراخ کاری سنتی و سوراخ کاری التراسونیک بر روی نیروی برادری بررسی نمودند.

مخدوم و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۲ اثر نرخ پیشروی را در نیروی سوراخ کاری بررسی نمودند. اسپیندل و دامنه ارتعاش را بر روی نیروی سرعت روش تاگوجی بررسی کردند.

اسپیندل و بهبهانی [۱۲] در سال ۲۰۱۳ اثر نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و دامنه ارتعاش را بر روی دایروی و استوانه ای بودن و صافی سطح سوراخ بررسی کردند.

شکوری و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۴ از این روش برای سوراخ کاری استخوان ران گاو جهت بررسی نیروی محوری استفاده نمودند. لذا در این نوشتار با توجه به تحقیقات پیشین اثر برخی پارامترهای مهم فرایند مانند سرعت دورانی، نرخ پیشروی، توان فرماصوتی (که باعث تعییر دامنه ارتعاشات می شود) و جنس قطعه کار بر روی زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است.

عامل زبری سطح به عنوان متغیر خروجی و عوامل (سرعت دورانی، نرخ پیشروی، توان فرماصوتی و جنس قطعه کار) به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده اند. پس از طراحی آزمایش ها، آزمایش های تجربی مطابق این طراحی انجام شده و متغیر خروجی اندازه گیری و سپس با استفاده از روش آماری آنالیز واریانس^۴، تاثیر متغیرهای ورودی بر خروجی بررسی می گردد. به دلیل حجم نسبتا بالا در تحلیل داده ها، از نرم افزار مینی تب^۵ استفاده شد.

1. Positional Accuracy
2. Roundness
3. Delamination
4. ANOVA
5. Minitab

پیشروعی افزوده شده و آن منجر به افزایش زاویه براده در حین کار به میزان ۴٪ و در مقایسه زاویه آزاد مته کوچکتر می‌شود (روابط ۴-۲). افزایش زاویه براده سبب کاهش اندازه براده، کاهش نیروی شکل‌گیری براده و کاهش نیروهای ماشین کاری می‌شود.

$$Z(t) = A \sin(2\pi ft) + F_{nt} \quad (1)$$

$$\alpha_w = \alpha - \mu \quad (2)$$

$$\gamma_w = \gamma + \mu \quad (3)$$

$$\tan \mu = \frac{a_f}{\pi \cdot D} \quad (4)$$

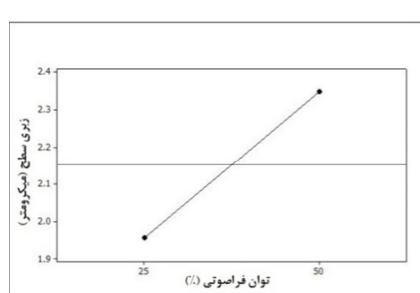
در مرحله برگشت، ارتعاش منفی است و از حرکت پیشروعی کسر می‌شود و زاویه براده در حین کار نسبت به زاویه براده مته کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان چسبندگی براده به مته و اصطکاک روى ابزار کاهش می‌یابد.

در هر سیکل ارتعاش ابزار، پیشروعی کوچک بوده و کمک می‌کند که تولید براده ضخیم‌تر، کوچک‌تر و ناپیوسته شکل بگیرد و همچنین حرکت نوسانی ابزار عمل ضربه فراصوتی^۱ را منجر می‌شود. به علاوه، هنگامی که براده‌ها کوچک هستند، با خاطر پدیده ضربه فراصوتی، براده‌ها در شیارهای مته براحتی حرکت می‌کنند و ضربه‌های بین براده‌ها و سطح سوراخ کاهش می‌یابد. بنابراین، این ممکن است منجر به چسبندگی کمتر براده‌ها بر روی سطوح سوراخ شود.

شکل ۲ تاثیر توان فراصوتی بر زبری سطح را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، توان (دامنه ارتعاشات) پایین‌تر موجب تغییر کمتر بر روی زوایای آزاد و براده موثر و در نتیجه زبری سطح کمتر دیواره را نتیجه می‌دهد.

در سوراخ کاری قطعه‌کار از جنس فولاد VCN-150، با افزایش توان فراصوتی از ۰٪ به ۵۰٪ (که باعث افزایش دو برابری دامنه ارتعاشات می‌شود)، میانگین زبری سطح از ۲/۳٪ به ۲/۰٪ میکرومتر کاهش یافت. علت این بهبود ۱۵ درصدی صافی سطح آنست که با افزایش دامنه ارتعاشات، براده‌ها ریزتر و نازک‌تر شده و به آسانی از سوراخ خارج می‌شوند. در نتیجه نیروهای برشی کاهش یافته، تغییر شکل پلاستیک کمتری رخ داده و صافی سطح بهبود می‌یابد.

در سوراخ کاری قطعه‌کار از جنس فولاد St37، با افزایش توان فراصوتی از ۰٪ به ۵۰٪ میانگین زبری سطح از ۱/۵٪ به ۲/۶٪ میکرومتر افزایش یافت. این نشان دهنده اینست که افزایش دامنه ارتعاشات باعث کاهش کیفیت سطح در فولاد نرم می‌شود. درنتیجه در سوراخ کاری فولاد نرم بهتر است از توان فراصوتی پایین (در نتیجه دامنه ارتعاشات پایین) استفاده شود. در سوراخ کاری سنتی بنا به دلیل توانایی براده برداری توسط لبه برشی فرعی بسیار ضعیف است: یکی زاویه براده منفی این لبه و دوم سرعت



شکل ۲ اثر توان فراصوتی بر روی میزان زبری سطح

در این آزمایش از ۸ مته از جنس فولاد تندری با روکش کبات استفاده شد، یعنی هر مته برای سوراخ کاری دو نمونه استفاده گردید. همچنین از مایع خنک کننده نیز استفاده نشده است.

زبری سطح دیواره سوراخ توسط دستگاه زبری سنج دستی مدل TR200 که قابلیت اندازه‌گیری زبری سطح با دقت یک هزار میکرون را دارد می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

بعد از انجام آزمایش‌ها، زبری سطح دیواره سوراخ از طرف ورود مته سه مرتبه و از طرف خروج مته نیز سه مرتبه اندازه‌گیری و میانگین نتایج آن‌ها برحسب میکرومتر در جدول ۲ ثبت گردید.

با توجه به این که آزمایش‌ها فقط یکبار انجام شدند، اگر همه اثرهای اصلی و اثر تعامل در نظر گرفته شوند، به دلیل صفر شدن خطای میانگین مربع^۱ نمی‌توان تحلیل را انجام داد. بنابراین، با توجه به این که اثر تعامل هر چهار عامل به احتمال قوی ناچیز خواهد بود لذا از این اثر صرف نظر گردید و سپس تحلیل انجام شد.

با انجام تحلیل توسط نرم‌افزار، و با فرض خطای نوع اول به اندازه $\alpha = 0.05$ و با توجه به مقادیر P به دست آمده فاکتور C (توان) و تعامل-اثرهای AC (تعامل اثر سرعت دورانی اسپیندل و توان)، AD (تعامل اثر سرعت دورانی اسپیندل و جنس قطعه‌کار) و CD (تعامل اثر توان و جنس قطعه‌کار) مؤثرند و مقدار P برای BD (تعامل اثر نرخ پیشروعی و جنس قطعه‌کار)، ۰/۰۶۸ می‌باشد.

۳-۱- اثر توان فراصوتی

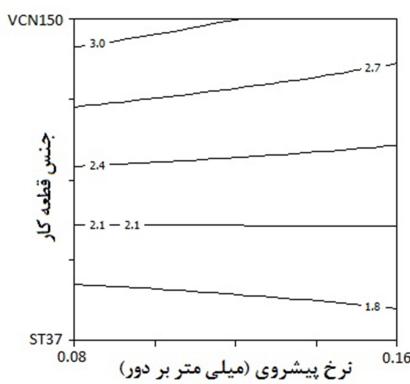
در حین دوران مته، ارتعاشات محوری در جهت پیشروعی مته اعمال می‌شود. تاثیر ارتعاش بر عملکرد مته بدین صورت است که حرکت نوسانی آن به دو مرحله رفت و برگشت قابل تقسیم است.

در مرحله رفت، ارتعاش مثبت است و مطابق رابطه (۱)، به حرکت

جدول ۲ ماتریس آزمایش به همراه نتایج زبری سطح دیواره سوراخ

شماره آزمایش	زبری سطح (µm)	جنس قطعه‌کار	توان فراصوتی (%)	نرخ پیشروعی (mm/r)	سرعت دورانی (RPM)
۱	۱/۶۷۲	St37	۲۵	۰/۰۸	۵۰۰
۲	۱/۳۸۸	St37	۲۵	۰/۰۸	۷۱۰
۳	۱/۵۲۳	St37	۲۵	۰/۱۶	۵۰۰
۴	۱/۶۱۴	St37	۲۵	۰/۱۶	۷۱۰
۵	۱/۹۰۸	St37	۵۰	۰/۰۸	۵۰۰
۶	۲/۷۸۵	St37	۵۰	۰/۰۸	۷۱۰
۷	۲/۳۹۵	St37	۵۰	۰/۱۶	۵۰۰
۸	۳/۶۲۱	St37	۵۰	۰/۱۶	۷۱۰
۹	۲/۹۶۶	VCN	۲۵	۰/۰۸	۵۰۰
۱۰	۱/۸۶۳	VCN	۲۵	۰/۰۸	۷۱۰
۱۱	۳/۰۴۸	VCN	۲۵	۰/۱۶	۵۰۰
۱۲	۱/۵۸۳	VCN	۲۵	۰/۱۶	۷۱۰
۱۳	۲/۰۸۲	VCN	۵۰	۰/۰۸	۵۰۰
۱۴	۲/۰۵۰	VCN	۵۰	۰/۰۸	۷۱۰
۱۵	۲/۰۶۲	VCN	۵۰	۰/۱۶	۵۰۰
۱۶	۱/۸۸۵	VCN	۵۰	۰/۱۶	۷۱۰

1. Mean Square Error (MSE)



شکل ۴ تأثیر نرخ پیشروعی و جنس قطعه کار بر روی زبری سطح

برشی پایین. اما در سوراخ کاری به کمک ارتعاشات زاویه موثر براده لبه برش فرعی و سرعت برشی بیشتر می‌شود و هر چه دامنه ارتعاشات بیشتر شود، توانایی براده برداری توسط این لبه بیشتر می‌شود.

۳-۲-اثر سرعت دورانی

سُرخوردن مته در حین عملیات سوراخ کاری منجر به حرکت نامنظم براده‌ها شده و باعث می‌شود براده‌ها بر روی سطح داخلی سوراخ کوییده و همچنین بر روی سطح سوراخ خراشیده شوند.

افزایش سرعت دورانی باعث کاهش ضخامت براده و کاهش نیروی برشی شده و پایداری فرایند سوراخ کاری افزایش می‌یابد و منجر به کاهش سُرخوردن مته می‌شود. کاهش ضخامت براده باعث بهبود خروج براده از ناحیه ماشین کاری می‌شود. به دلیل ارتعاشات محوری ابزار، براده‌های تولید شده کوچکتر می‌باشد.

همان‌گونه که در شکل ۳ تأثیر سرعت دورانی اسپیندل و توان نشان می‌دهد، در دامنه ارتعاشات پایین، با افزایش سرعت دورانی به دلیل همپوشانی پستی و بلندی‌های سطح موجب کاهش زبری سطح می‌گردد. ولی با افزایش دامنه ارتعاشات تغییرات بر روی زوایای آزاد و براده موثر بیشتر شده و زبری سطح کاهش خواهد یافت.

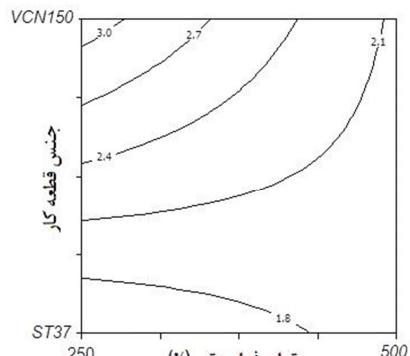
اما در سرعت دورانی پایین، با افزایش در دامنه ارتعاشات، حرکت نوسانی ابزار موجب اصلاح پروفیل سطح ایجاد شده براساس حرکت پیشروعی ابزار شده و کیفیت سطح بهبود می‌یابد.

با افزایش سرعت دورانی از ۵۰۰ به ۷۱۰ دور بر دقیقه در سوراخ کاری فولاد VCN-150، میانگین زبری سطح از ۲/۴۵ به ۱/۸۵ کاهش یافت. این بهبود ۲۷ درصدی به دلیل افزایش زاویه موثر براده و کاهش زاویه موثر آزاد می‌باشد. اما در سوراخ کاری قطعه کار از جنس فولاد St37، با افزایش سرعت دورانی از ۵۰۰ به ۷۱۰ دور بر دقیقه، میانگین زبری سطح از ۲/۳۵ به ۱/۸۵ میکرومتر افزایش یافت. کاهش کیفیت سطح با افزایش سرعت دورانی در این نوع فولاد به دلیل افزایش دما در ناحیه براده برداری می‌باشد.

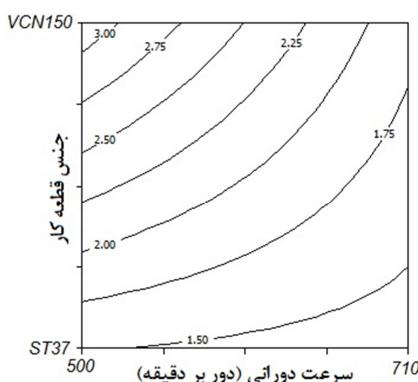
۳-۳-اثر نرخ پیشروعی

با افزایش نرخ پیشروعی، سُرخوردن مته بیشتر شده و همچنین ناپایداری در فرایند سوراخ کاری افزایش یافته و زبری سطح افزایش می‌یابد.

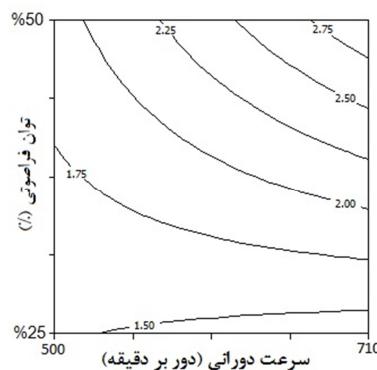
مقدار P تأثیر نرخ پیشروعی و جنس قطعه کار، ۰/۰۶۸ می‌باشد و با فرض خطای نوع اول به میزان ۷ درصد، این تأثیر نیز موثر می‌باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که در قطعه کار با جنس St37 افزایش نرخ پیشروعی، به دلیل ایجاد لبه انشا شده بر روی لبه‌های برنده مته، زبری سطح افزایش می‌یابد.



شکل ۵ تأثیر تأثیر نرخ پیشروعی بر زبری سطح



شکل ۶ تأثیر تأثیر تأثیر سرعت دورانی در جنس قطعه کار بر زبری سطح



شکل ۷ تأثیر تأثیر تأثیر سرعت دورانی در تأثیر تأثیر تأثیر سرعت دورانی بر زبری سطح

- assisted drilling of bone, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 194-200, 2014. (In Persian)
- [15] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5th Edition, John Wiley & Sons Inc, New York, 2001.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر هر یک از پارامترهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و توان فرما صوتی بر روی زیری سطح دو نوع فولاد VCN-150 و St37 در فرایند سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فرما صوتی مورد بررسی قرار گرفت و ملاحظه گردید، افزایش نرخ پیشروی و سرعت دورانی در فولاد VCN-150 موجب کاهش زیری سطح شده، بنابراین می‌توان برای فولادهای سخت، نرخ پیشروی و سرعت دورانی را بالاتر انتخاب نمود که این به معنی افزایش سرعت ماشین کاری و کاهش هزینه‌های تولید می‌باشد.

۵- فهرست علائم

a_f	میزان پیشروی
f	فرکانس
n	تعداد دوران
t	زمان
	علایم یونانی
α	زاویه آزاد
μ	زاویه مارپیچ پیشروی
γ	زاویه براده
	زیرنویس‌ها
W	در حال کار

۶- تشکر و قدردانی

بدین وسیله نگارندگان این مقاله از امکاناتی که توسط دانشگاه صنعتی شریف جهت کارهای آزمایشگاهی در اختیار آنان قرار داده شده، تشکر می‌نمایند.

۷- مراجع

- B. Azarhoushang, J. Akbari, Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1027-1033, 2007.
- D. Y. Zhang, Study on the drill skidding motion in ultrasonic vibration microdrilling, *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 34, pp. 847-857, 1994.
- S.S. Chang, G.M. Bone, Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6, *Precision Engineering*, Vol. 34, pp. 369-375, 2010.
- Y. Liao, Y. Chen, H. Lin, Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1988-1996, 2007.
- S.S. Chang, G.M. Bone, Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance, *Robotics and computer-integrated manufacturing*, Vol. 21, pp. 442-450, 2005.
- P. Thomas, V. Babitsky, Experiments and simulations on ultrasonically assisted drilling, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 308, pp. 815-830, 2007.
- J. Kumabe, *Fundamentals and Applications of Vibration Cutting*, Jikkyo publishing, Tokyo, 1979.
- V. Khademi, J. Akbari, F. Fahramand, ultrasonic assisted drilling of bone, *Journal of Majlesi Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 69-74, 2009 (In Persian)
- J. Pujana, A. Rivero, A. Celaya, L.N. Lopez de Lacalle, Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009.
- V.A. Phadnis, F. Makhdum, A. Roy, V.V. Silberschmidt, Ultrasonically Assisted Drilling In Cfrp Composites, *ECCM15-15th European Conference On Composite Materials*, Venice, Italy, 2012.
- F. Makhdum, L.T. Jennings, A. Roy, V.V. Silberschmidt, Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics, *Journal of Physics*, Vol. 382, pp. 12-19, 2012.
- P. Mehbudi, V. Baghlan, J. Akbari, A.R. Bushroa, N.A. Mardi, Applying ultrasonic vibration to decrease drilling-induced delamination in GFRP laminates, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 577- 582, 2013.
- M. Mandegari, S. Behbahani, Experimental Analysis of a Novel Rotary Ultrasonic Assisted Drilling (RUAD) Machine, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.28, pp. 481-487, 2013.
- E. Shakouri, M.H. Sadeghi, M. Maerefat, M.R. Karafi, M. Memarpour, Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic