



اثر سرعت برشی بر روی نیروی برشی و کیفیت سطح در فرآیند خان‌کشی آلومینیوم ۷۰۷۵

محمد اروجی^۱، مهدی صادقی بجستانی^۲، بهنام معتکف ایمانی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، پردیس بین‌الملل دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

*مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۴۴-۱۱۱۱، imani@um.ac.ir

چکیده

خان‌کشی یکی از روش‌های خاص براده برداری است که به‌وسیله‌ی ابزار خان‌کشی (سوزن) برای ایجاد پروفیل‌های ساده و پیچیده و باکیفیت سطح پرداخت‌شده استفاده می‌گردد. خان‌کشی در تولید انبوه کاربرد فراوان دارد که به‌واسطه‌ی خاص بودن، کمتر در تحقیقات مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق تغییرات نیروهای برش با کد نویسی در متلب به‌صورت تئوری برای سرعت‌های برشی مختلف بر روی جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی و تحلیل شده است. در ادامه جهت صحت‌گذاری به نتایج، تست آزمایشگاهی جهت بررسی تأثیر سرعت برشی بر روی کیفیت سطح و نیروهای برشی انجام شده است. بدین منظور دستگاهی با مکانیسم سرو هیدرولیک و براساس کنترل موقعیت و سرعت طراحی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برشی از ۲ متر بر دقیقه به ۸ متر بر دقیقه نیروهای برشی به میزان حدود ۲۰٪ کاهش یافته و صافی سطح به میزان اندکی بهتر می‌شود که پیش‌بینی می‌شود در سرعت‌های برشی بالاتر که در این تحقیق نیل به آن مقدور نبود، این موضوع بیشتر و بهتر مشاهده شود. در عمل می‌توان از نتایج حاصله در این فرآیند نتیجه گرفت که سرعت‌های برشی بالاتر برای عملیات روی این جنس مناسب‌تر است. **کلید واژگان:** خان‌کشی، نیروهای دینامیکی برش، کیفیت سطح، سرعت برشی، آلومینیوم ۷۰۷۵

The effect of cutting speed on cutting force and surface quality in broaching of aluminum 7075

Mohammad Orouji, Mahdi Sadeqi Bajestani, Behnam Moetakef Imani*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

*P.O.B. 9177948944-1111, Mashhad, Iran, imani@um.ac.ir

ABSTRACT

As a single-pass machining operation, broaching is extensively used to produce simple and complicated profiles with finished surface quality. Broaching is often used for mass production. Since, it is a special manufacturing process, few researches has been reported in this area. In this research, the dynamic effects of cutting forces for different cutting speeds on Aluminum 7075 have been theoretically and experimentally analyzed using MATLAB. Moreover, to make sure of the results, experimental setup has also been designed to investigate the effect of cutting speed on surface quality and cutting force. For this purpose, a servo hydraulic system based on position control has been designed. With the increase of cutting speed from 2 m/min to 8 m/min, an undeniable decrease in cutting force is observable, while the surface quality experiences an interesting increase. It can be concluded that the higher cutting speeds are to be preferred for processing this material. In practice, it is applicable for especially car manufacturing industry to shorten the time and lower the cost of production.

Keywords: Aluminum 7075, Broaching, Cutting Speed, Dynamic Cutting Forces, Surface Quality

۱- مقدمه

۱-۱- خصوصیات اصلی و پارامترها
ابزارهای خان‌کشی به‌صورت تعداد متعددی دندانه که به‌طور متوالی پشت سر هم قرار گرفته‌اند می‌باشند (لبه برش) بدین‌صورت که عمق بار هر دندانه، مقدار براده‌ی برداشته‌شده^۲ را مشخص می‌کند. عمق برش (h) زاویه براده^۳ (γ) زاویه آزاد^۴ (α) به نوع ماده‌ای که خان‌کشی می‌شود (قطعه‌کار) وابسته است. مقدار زاویه آزاد همچنین به موقعیت قرارگیری دندانه روی سوزن که در قسمت خشن یا پرداخت اولیه یا پرداخت نهایی باشد مشخص می‌گردد. عرض سطح (b_{fin}) برای قسمت‌های پرداخت نهایی متفاوت از دیگر بخش‌های برش روی سوزن می‌باشد و همچنین برای مواد مختلف که خان‌کشی می-

خان‌کشی^۱ نوعی عملیات براده‌برداری شبیه اره‌کاری است که برای ایجاد سطوح تخت، شیارها، هزار خار و سطوح فرم‌دار بر روی قطعات و با یک‌بار حرکت ابزار استفاده می‌شود و در صورتی‌که قطعه‌ای به این عملیات نیاز داشته باشد می‌بایست پس از تراش کاری و فرزکاری‌های لازم قطعه را باز و بر روی دستگاه خان‌کشی بست. خان‌کشی یکی از روش‌های اقتصادی جهت تولید انبوه در رقابت با تراش کاری و فرزکاری است که به‌وسیله‌ی آن می‌توان سطوح با دقت بالا تولید نمود. توسط خان‌کشی می‌توان سطوح داخلی و خارجی قطعات را براده‌برداری کرد. همچنین می‌تواند به‌عنوان عملیات پرداخت نهایی استفاده گردد که این موضوع اهمیت ویژه‌ای به آن می‌بخشد.

2. Chip load
3. Rake angle
4. Clearance angle

Please cite this article using:

M. Orouji, M. Sadeqi Bajestani, B. Moetakef Imani, The effect of cutting speed on cutting force and surface quality in broaching of aluminum 7075, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 100-106, 2015 (in Persian فارسی)

1. Broaching

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شوند متفاوت است. این سطح موازی با محور قسمت پرداخت نهایی سوزن می‌باشد و در قسمت‌های پرداخت اولیه و خشن به‌صورت صعودی قرار گرفته است و بدین صورت دارای زاویه منفی سطح^۱ (γ_f) روی پشت سطح براده به انتهای ابزار است (شکل ۱).

۱-۲- مروری بر تحقیقات گذشته

خان‌کشی به‌طور گسترده‌ای جهت تولیدات مختلف در گذشته استفاده می‌شده است، در بعضی از کاربردهای آن با توجه به توسعه گسترده فرزهای چند محوره کنترل عددی کامپیوتری^۲ با انعطاف‌پذیری بالا و سرعت و دقت بالا، جایگزین این فرآیند شده است که این خود می‌تواند دلیلی بر کاهش چاپ و توسعه مراجع در این خصوص باشد؛ اما در ابتدا در کتابچه راهنمای فارست [۱] توسط کمپانی با همین نام، فرآیند خان‌کشی به‌صورت عملی شرح داده شد و عوامل و پارامترهای مختلف مؤثر روی فرآیند به‌تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. گرچه تقریباً منبعی قدیمی محسوب می‌شود، اما بیشتر موارد درج شده در تحقیقات و مطالعات امروزی مرتبط با عملیات خان‌کشی، از آن به‌عنوان مرجع یاد می‌شود. تری و کاترایت در [۲] فرآیند خان‌کشی توسط سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر تحلیل شده است، کیشاوی، حسینی و معتکف ایمانی [۳] انرژی در فرآیند خان‌کشی را مورد بررسی قرار دادند و نیروهای برش و سطح قطعه‌کار را نیز بررسی کردند. تنی و همکاران در [۴] با استفاده از حس‌گرهای دقیق و پیشرفته، به مانیتور کردن دقیق فرآیندهای ماشین‌کاری از جمله خان‌کشی پرداختند، آکسینت و همکاران [۵] و [۶] نیز از این موضوع برای بهبود کیفیت سطح در فرآیندهای ماشین‌کاری استفاده کردند، و به‌طور کامل و ویژه فرآیند خان‌کشی را بررسی کردند و ابزار را در این فرآیند تحلیل و مانیتور کردند. آکسینت [۷] همچنین خان‌کشی تیتانیوم را بررسی کرد و سطح قطعه کار را بعد از انجام ماشین‌کاری تحلیل کرد و [۸] برای اولین بار جنبه‌های مربوط به دینامیک خان‌کشی را، هنگامی که اشکالی با هندسه پیچیده تولید می‌شوند، ارائه داد. وی یک آنالیز تجربی از علل و نتیجه ارتعاشات کوپل شده‌ی میرا، هنگام خان‌کشی پروفیل‌های تقریباً باریک و بسته‌ای همانند دم‌چلچله‌ای دیسک‌های موتور توربین گاز را شرح می‌دهد. گیندی در [۹] شرایط بهینه‌ی برش برای آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت براساس نیروهای برش، زبری سطح و سایش ابزار را بررسی کرد. بوداک در [۱۰] به بررسی عوامل مؤثر در طراحی بهینه‌ی ابزار خان‌کشی به‌منظور افزایش

۱-۳- مدل‌سازی فرآیند خان‌کشی در متلب

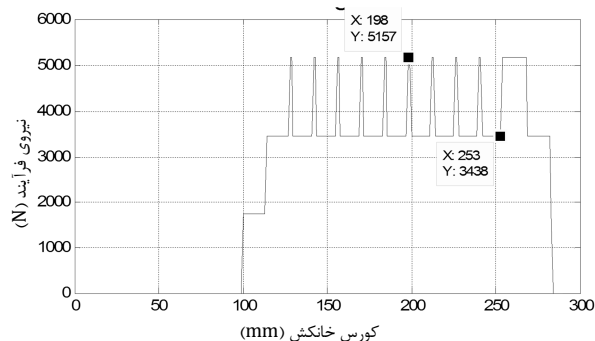
در مرحله اول، برای بررسی نیروهای خان‌کشی، فرآیند در نرم‌افزار متلب مدل شده و نمودارهای نیرویی به‌عنوان خروجی گرفته شده‌اند. در شکل ۲ نمودار نیرویی فرآیند خان‌کشی در سرعت ۲ متر بر دقیقه که توسط متلب مدل‌سازی شده است را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است در این آزمایش عیناً مشخصات سوزن خان‌کشی و همچنین قطعه کار طبق اطلاعات دریافتی از دستگاه دیجیتالیزر مدل‌سازی شده است. محور افقی کورس خان‌کشی و محور عمودی نیرو را نشان می‌دهد.

در ادامه به بررسی سیستم آزمایشگاهی تدوین شده توسط نویسندگان خواهیم پرداخت و خواهیم دید که نتایج به‌دست‌آمده از طریق آزمایش‌ها همخوانی بسیار خوبی با نتایج مدل‌سازی تئوری دارد.

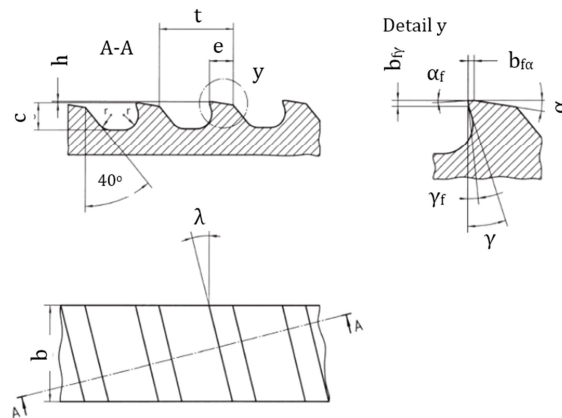
۲- مشخصات فنی

۲-۱- مشخصات و هندسه‌ی سوزن خان‌کشی

روابط ابزار خان‌کشی مورد استفاده در این تحقیق از جنس 210Cr46 با سختی ۷۸۰ ویکرز معادل ۶۳/۵ راکول‌سی است. مشخصات هندسی دقیق سوزن خان‌کشی توسط دستگاه دیجیتالیزر رنی شاول^۳ استخراج شده است (شکل ۴). این دستگاه که در مهندسی معکوس^۴ کاربرد فراوانی دارد، قادر به حرکت در سه جهت x, y, z است. حرکت این دستگاه‌ها در محورهای مختلف



شکل ۲ مدل‌سازی نیرویی فرآیند در نرم‌افزار متلب در سرعت برشی ۲ متر بر دقیقه

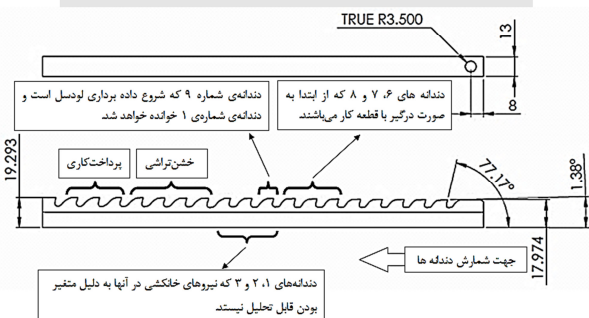
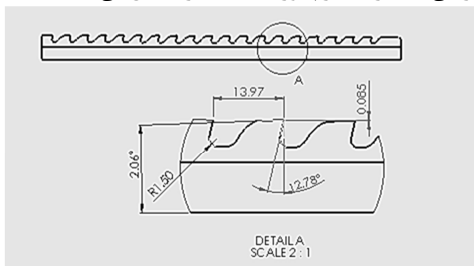


شکل ۱ جزئیات زوایا و هندسه‌ی ابزار خان‌کشی [۱]

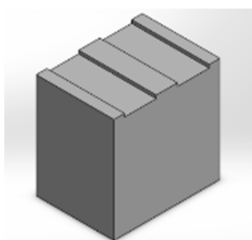
1. Land angle
2. Computer Numerical Control (CNC)

3. Renishaw Cyclone Digitizer
4. Reverse engineering

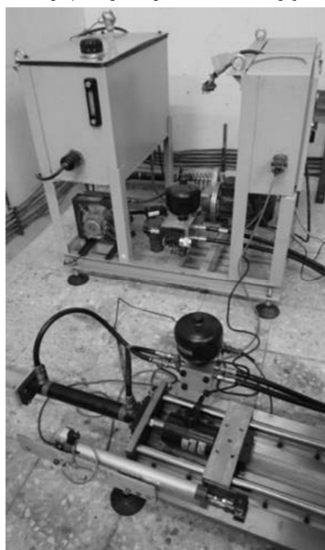
با عنایت به سوزن انتخاب شده و بار به ازای هر دندانه و همچنین ضخامت قطعه‌کار و محدودیت در کورس حرکت چک که بیشینه به اندازه ۱۹۰ میلی‌متر و با قطر پیستون و سیلندر ۲۵×۴۰ می‌باشد، سایر مشخصات دستگاه مذکور در جدول ۲ قابل مشاهده است. شکل ۸ نیز نمایش مدل سه بعدی طراحی شده از مکانیزم مورد استفاده در تحقیق می‌باشد.



شکل ۴ مشخصات و زوایای سوزن خان‌کش و توضیحات شماره‌ی دندانه‌ها



شکل ۵ تصویر سه‌بعدی قطعه‌کار بعد از انجام فرآیند خان‌کشی



شکل ۶ ستاپ سیستم آزمایش

به کمک شیرهای هیدرولیکی انجام می‌شود. از کاربردهای مهم این دستگاه می‌توان به دست آوردن اطلاعات ابعادی قطعاتی که ابعاد آن‌ها در دسترس نیست و تبدیل این اطلاعات به داده‌های قابل استفاده در طراحی به کمک کامپیوتر^۱ اشاره کرد. با اندازه‌گیری‌ها مشخص شد که عمق بار به ازای هر دندانه در منطقه‌ی دندانه‌های خشن تراشی ۰/۰۹ میلی‌متر، در منطقه‌ی پرداخت ۰/۰۵ و در دندانه‌های انتهایی صفر است. در شکل ۳ و شکل ۴ تصویر سوزن مورد استفاده در این تحقیق مشاهده می‌شود. لازم به توضیح است برای انجام فرآیند خان‌کشی، در انتهای سوزن خان‌کش یک عدد سوراخ راه به در با شعاع ۳/۵ مشاهده می‌شود که به برای کشیدن سوزن از آن استفاده می‌شود.

۲-۲- قطعه‌کار

قطعه‌کار در این آزمایش از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ انتخاب گردیده است و مطابق شکل ابعاد قطعه‌کار ۲۹/۳×۴۰×۳۹/۶ است که پس از خان‌کشی به صورت شکل ۵ و مشخصات خواص فیزیکی و استحکام جدول ۱ می‌باشد. قسمت قیدوبند قطعه‌کار و سوزن خان‌کش نیز توسط نویسندگان طراحی و ساخته شده است. لازم به ذکر این قسمت از جنس Mo40 و با عملیات حرارتی و رسیدن به سختی حدود ۳۹ راکول‌سی ساخته شده و قبل از نصب نیز با دستگاه دیجیتازر دیجیتال گردیده است. در شکل ۷ محل قرارگیری قطعه‌کار و لودسل و همچنین جهت حرکت سوزن خان‌کش نشان داده شده است.

۳-۲- مشخصات دستگاه سرو هیدرولیک

با توجه به تعریف اعمال شرایط بارگذاری مختلف بر روی سوزن که شامل تغییرات نیروی بارگذاری و نحوه بارگذاری می‌باشد و همچنین جهت اعمال بارگذاری با سرعت‌های برشی مختلف با توجه به دبی پمپ انتخاب شده و آکومولاتور موردنظر جهت انجام تست‌ها از دستگاه سرو هیدرولیک که تصویر آن در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی قطعه‌کار (آلومینیوم ۷۰۷۵)

مشخصه	مقدار
مدول الاستیسیته	۶۴ مگاپاسکال
تنش تسلیم	۱۳۵ مگاپاسکال
تنش نهایی	۲۸۰ مگاپاسکال
تنش برشی	۷۸ مگاپاسکال

جدول ۲ مشخصات کاری سیستم هیدرولیکی مورد استفاده در این تحقیق

مشخصه کاری	محدوده کاری
دمای کاری	۴۰-۴۵ درجه سانتی‌گراد
فشار کاری	۱۵۰ بار
حداکثر محدوده سرعت	۹ متربر دقیقه
حداکثر فشاری	۳۵۰ بار
محدوده موقعیت کاری	۲۱۵-۵ میلی‌متر



شکل ۳ تصویر سوزن خان‌کش مورد استفاده در این تحقیق و براده‌های حاصل

۲- نتایج

۲-۱- تحلیل رفتار نیرویی

همان‌طور که در نمودارهای رسم شده مشاهده می‌گردد در شکل ۹ با توجه به محدودیت طول کورس حرکت جک به اندازه ۱۹۰ میلی‌متر و اندازه طول سوزن خان‌کش که برابر ۲۹۰ میلی‌متر می‌باشد، امکان استفاده از کل دندان‌های موجود بر روی سوزن نمی‌باشد. به‌طور کلی در سوزن خان‌کشی مورد استفاده در این تحقیق ۱۹ دندان وجود دارد که به‌واسطه محدودیت مذکور از ۵ دندان‌های ابتدایی استفاده نشده و شروع فرآیند به‌گونه‌ای است که دندان‌های ۶، ۷ و ۸ به‌صورت درگیر با قطعه‌کار می‌باشند. لازم به توضیح است که در شکل ۹ محور افقی نشان‌دهنده خان‌کش و محور عمودی نیروی اندازه‌گیری شده توسط لودسل است که نمودار نیرویی فرآیند خان‌کشی را نشان می‌دهد. داده‌های نمودارها مربوط به دندان‌های ۹ تا ۱۹ سوزن خان‌کشی می‌باشند.

در قسمت‌های آتی، دندان‌های شماره ۹ در روی سوزن خان‌کشی برای سهولت بررسی، دندان‌های شماره ۱ خوانده خواهد شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نیروهای وارد به دندان‌های ۱، ۲ و ۳ بسیار متغیر هستند که به همین واسطه نمی‌توان تحلیل دقیقی از آن‌ها داشت، لازم به ذکر است این تغییرات نیرویی غیرقابل پیش‌بینی در این ناحیه می‌تواند دلایل مختلفی از جمله لرزش قطعه کار به‌واسطه عدم جای‌گیری درست آن قیدوبند داشته باشد.

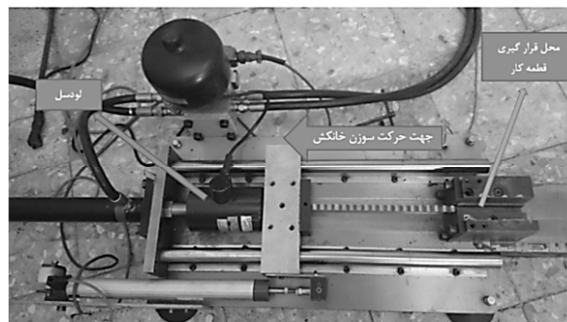
۲-۲- تفسیر نمودارها

همان‌طور که در قبل اشاره شد، با توجه به محدودیت کورس جک و با توجه به درگیری همزمان دندان‌های ۱ و ۲ و ۳ قبل از شروع خان‌کشی و همچنین متغیر بودن بار در دندان‌های مذکور، نمی‌توان تحلیل دقیقی از گزارش‌های نمودار ارائه کرد و فقط روند افزایش نیرو مشهود است.

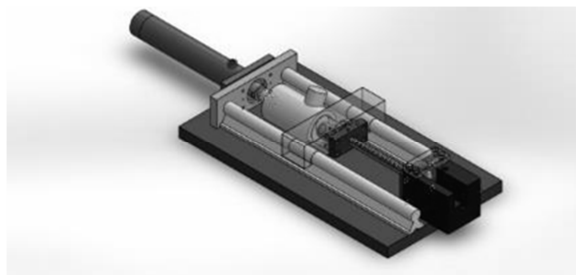
از دندان‌های ۴ تا دندان‌های ۷ که منطقه‌ی خشن تراشی سوزن خان‌کش نیز هست، تحلیل نیرویی قابل انجام است. هر کدام از قله‌های نمودار نشان‌دهنده‌ی ورود یک دندان‌های جدید از سوزن خان‌کش به قطعه کار است. لازم به ذکر است، در مناطق قعر نمودار به‌طور همزمان دو دندان با قطعه کار درگیر می‌باشد، درحالی‌که در قله‌ها سه دندان به‌طور همزمان درگیرند. افزایش نیرو به‌واسطه‌ی ورود دندان‌های جدید در سرعت‌های برشی پایین بیشتر از سرعت‌های برشی بالا می‌باشد. به‌طور مثال در سرعت برشی ۴ متر بر دقیقه افزایش نیرویی معادل ۱۲۰۰ نیوتون مشاهده می‌شود که این مقدار در سرعت برشی ۸ متر بر دقیقه تا ۷۰۰ نیوتون کاهش می‌یابد که این موضوع به خاطر افزایش سرعت برشی می‌باشد، علاوه بر این خود قله‌های نیرویی نیز رابطه‌ای عکس با سرعت برشی دارند.

برای اطمینان از صحت آزمایش‌های انجام‌شده و همچنین تکرارپذیری آن‌ها، در هر سرعت برشی، هر آزمایش چهار مرتبه تکرار شده است، که نتایج به‌دست‌آمده در هر بار تکرار مؤید صحت آزمایش‌ها مراحل قبل بوده‌اند. در هر مرتبه تکرار آزمایش بواسطه‌ی کنترل سزعت و کنترل موقعیت اعمالی روی سیستم سروهیدرولیک، این دو پارامتر مهم در کل زمان تست رصد شده است.

اختلافات جزئی موجود نیز با دلایلی از قبیل افزایش طول فاصله سوزن گیر تا قطعه در حین خان‌کشی، عدم هم‌راستای قید و بند با سوزن گیر و اصطکاک و نوسانات قابل توجه می‌باشند، که این در این تحقیق سعی بر آن



شکل ۷. نحوه‌ی چیدمان اجزای سیستم و جهت حرکت سوزن



شکل ۸. مدل سه‌بعدی مکانیزم مورد استفاده در آزمایش‌ها

۲-۴- اجزا سیستم هیدرولیک

لودسل با برند داسل و ظرفیت ۵ تن با توجه به نیروی کششی موردنیاز که با فرض ثابت برش (KC) نیوتون بر میلی‌مترمربع و ضریب اطمینان ۱/۴ موردنظر مشخص و انتخاب گردیده است. سایر مشخصات فنی لودسل مذکور جهت تبدیل از ولتاژ تحریک ۱۰ ولت و نسبت ولتاژ خروجی ۲ میلی‌ولت بر ولت استفاده شده است. لازم به ذکر است فرکانس نمونه‌برداری در لودسل برابر ۳۳۳ نمونه در ثانیه می‌باشد.

شیر هیدرولیک با بیشینه فشار ۳۵۰ بار و به مشخصات MCD6 - SP/51N/K با یک ورودی و تخلیه به تانک و با آب‌بندی کاسه نمدی از جنس NBR جهت روغن‌پایه معدنی می‌باشد. خط‌کش مورد استفاده جهت اندازه‌گیری موقعیت لحظه‌ای جک هیدرولیک در هر لحظه استفاده شده است. مدل این خط‌کش LPC - LM300 می‌باشد و خطای خطی‌سازی آن در حالت بیشینه ۰/۰۵٪ و جریان تحریک پیشنهادی ۱ میکروآمپر و کورسی معادل ۳۰ میلی‌متر دارد. مجموعه دستگاه سرو هیدرولیک که در آن دارای قطر پیستون ۲۵ میلی‌متر و قطر سیلندر ۴۰ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به سطح مقطع سیلندر پیستون مورد استفاده و همچنین دبی پمپ - که خود یکی از عوامل محدود کننده‌ی سرعت است - و با در نظر گرفتن رابطه‌ی می‌توانیم سرعت جک که همان سرعت حرکت سوزن خان‌کش است را محاسبه کنیم.

$$Q = Ax \quad (1)$$

با توجه به این‌که در سیستم از آکومولاتور استفاده می‌شود حداکثر سرعت انتخاب شده با توجه به شرایط و تجهیزات مورد استفاده در عمل و در حالت بیشینه به ۸ متر بر دقیقه خواهد رسید و بیش از این مقدار پمپ و آکومولاتور با افزایش ولتاژ تحریک توان پر نمودن جک از سرعت اعلام شده را ندارند. لازم به ذکر است کلیه تست‌های انجام شده با دستگاه مذکور به ترتیب با سرعت‌های برشی ۲، ۴، ۶ و ۸ متر بر دقیقه انجام شده است.

شده است تا موارد ایجاد کننده‌ی خطا بخصوص خطاهای انسانی با تکرار آزمایش‌ها به حداقل برسد. لازم به ذکر است برای کاهش خطاهای مذکور، گیربندی مجموعه توسط نویسندگان طراحی و ساخته شده است.

بهمحض ورود دندانه‌های ۸ الی ۱۰ (دندانه‌های پرداخت نهایی) مجدداً اختلاف به علت تغییر در ضخامت براده (صفر شدن ضخامت براده) بیشتر می‌شود. اندازه نیرو با ورود دندانه‌های جدید که بدون بار می‌باشند حدود ۱۰۰ نیوتن افزایش می‌یابد که این موضوع فقط به علت اصطکاک و لهیدگی سطح قطعه کار است. با خروج این دندانه‌ها نیرو حدود ۱۰۰۰ نیوتن کاهش می‌یابد و تکرارپذیری نیرو برای سرعت‌های برشی انجام شده حکایت از صحت مورد مذکور را دارد. مقدار بار مانده در سیستم پس از خروج آخرین دندانه و تا خروج کامل سوزن از قیدوبند حدود ۴۵۰ نیوتن می‌باشد که بهمحض خروج سوزن خان‌کشی نیرو به حدود ۱۵۰ نیوتن کاهش و سپس نیرو پس از تخلیه روغن سرو هیدرولیک به تانک حدود صفر می‌باشد که در اصل برابر نویز سیستم متغیر می‌باشد.

مقایسه نمودارهای نیرویی به‌دست آمده در شکل ۹ به رابطه‌ی (۲) منتج می‌شود که نماینده‌ی رابطه‌ی معکوس بین سرعت خان‌کشی نیروی وارده بر ابزار در این فرآیند است، بدین‌صورت که افزایش سرعت خان‌کشی باعث کاهش نیروهای خان‌کشی خواهد شد.

$$V_c \propto \frac{1}{f_b} \quad (2)$$

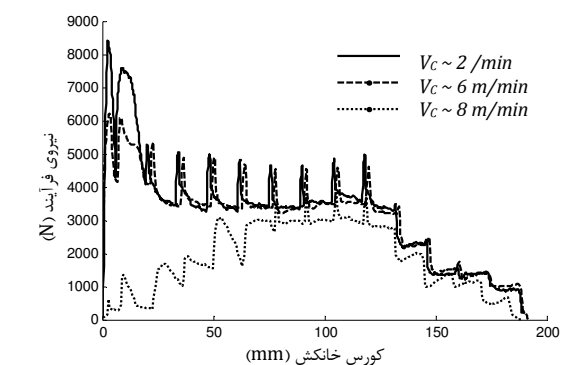
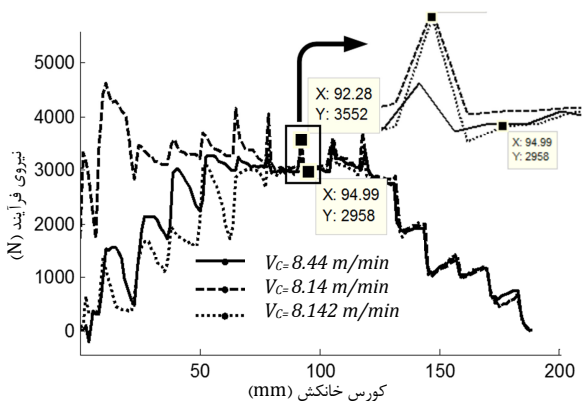
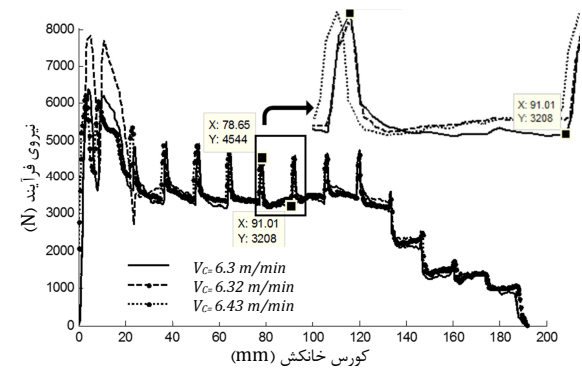
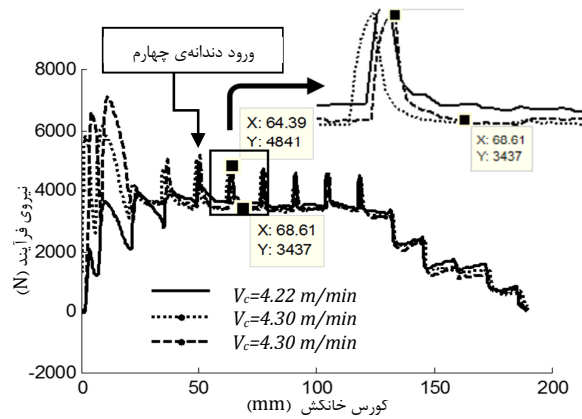
لازم به توضیح مجدد است که در این تحقیق ادعا شده است که سرعت‌های بالاتر باعث کاهش ۲۰ درصدی نیروها شده‌اند، که این موضوع به‌وضوح در نمودارهای رسم شده قابل مشاهده است.

۳-۲- تحلیل تأثیر سرعت برشی بر کیفیت سطح در سرعت‌های مختلف

بررسی دادگان کیفیت سطح موجود در جدول ۳ در سرعت‌های برشی مختلف حاکی از آن است که کیفیت سطح با افزایش سرعت برشی، بهبود یافته است. این موضوع مؤید تحقیقات انجام شده توسط فارست [۱] است، که برای جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ استفاده شده است.

جدول ۳ تأثیر سرعت برشی بر کیفیت سطح در فرآیند خان‌کشی

سرعت	شماره	R_z (mm)	R_a (mm)	عرضی	طولی
۸ متر بر دقیقه	شمار ۱ قطعه ۴	۳/۸۳	۰/۹۵۵	۰/۲۳۱	۷/۳
	شمار ۳ قطعه ۱	۲/۵۱	۰/۹۵۹	۰/۲۷۴	۵/۵۷
	شمار ۲ قطعه ۱	۰/۸۷۵	۰/۸۳۱	۰/۱۴۸	۶/۲۱
	شمار ۱ قطعه ۱	۰/۵۹۵	۰/۶۹۸	۰/۰۷۴	۴/۲۹
۴ متر بر دقیقه	میانگین	۱/۹۵۲	۰/۸۶۱	۰/۱۸۱	۵/۸۴۲
	شمار ۴ قطعه ۲	۲/۱۲	۰/۷۵۶	۰/۲۴۲	۶/۳۲
	شمار ۳ قطعه ۲	۲/۶۷	۰/۹۴۲	۰/۲۰۸	۶/۹۵
	شمار ۲ قطعه ۲	۲/۸	۰/۸۱۷	۰/۴۲	۱۰/۵
۲ متر بر دقیقه	شمار ۲ قطعه ۲	۱/۵۹	۰/۸۱۱	۰/۱۳۸	۵/۸
	میانگین	۲/۲۹۵	۰/۸۳۱	۰/۲۵۲	۷/۳۹۲
	شمار ۴ قطعه ۳	۶/۰۳	۰/۹۱۸	۰/۶۸۱	۷/۰۴
	شمار ۳ قطعه ۳	۲/۹۹	۰/۹۳	۰/۱۵۸	۶/۹۹
۲ متر بر دقیقه	شمار ۲ قطعه ۳	۵/۹۲	۰/۹۶۹	۱/۲۹	۷/۹
	شمار ۱ قطعه ۳	۱/۹۱	۱/۶۷	۰/۲۶	۱۱/۹
	میانگین	۴/۲۱۲	۱/۱۲	۰/۵۹۷	۸/۴۵۷



شکل ۹ نمودار تغییرات نیروی وارده به ابزار خان‌کشی در سرعت‌های برشی مختلف

جدول ۴ بررسی تأثیر سرعت برشی بر ضخامت براده‌ی تشکیل شده

شماره دندانه	ضخامت براده‌ی تغییر شکل نیافته (میلی‌متر)	ضخامت براده در ۲ متر بر دقیقه (میلی‌متر)	ضخامت براده در ۶ متر بر دقیقه (میلی‌متر)
۴	۰/۷۵	۰/۱۷	۰/۱۶
۵	۰/۸۰	۰/۱۶	۰/۱۴
۶	۰/۹۰	۰/۱۹	۰/۱۹
۷	۰/۹۰	۰/۳۰	۰/۳۰
۸	۰/۸۰	۰/۳۰	۰/۱۹
۹	۰/۸۵	۰/۱۹	۰/۱۷
۱۰	۰/۸۵	۰/۱۸	۰/۱۹

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا نیروهای فرآیند خان کشی توسط نرم‌افزار متلب مدل-سازی شده است، سپس نتایج این مدل‌سازی توسط آزمایش‌های عملی با تکراری‌پذیری بالا صحه‌گذاری شده‌اند. لازم به توضیح است آزمایش‌های مذکور بر روی سیستم سرو هیدرولیک با کنترل دقیق موقعیت و سرعت در آزمایشگاه طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفته‌اند. نمونه‌برداری نیرویی توسط لودسل با فرکانس نمونه‌برداری ۳۳۳ نمونه در ثانیه انجام شده است و نمونه‌برداری موقعیت نیز توسط خط‌کش اندازه‌گیری صورت گرفته است که پیش‌تر در مورد هردو به تفصیل توضیح داده شد. علاوه بر اندازه‌گیری نیرو، از تمامی نمونه‌ها بلافاصله بعد از انجام آزمایش، تست زبری گرفته شده و همچنین ضخامت براده‌های حاصل توسط میکروسکوپ مدرج به‌طور دقیق اندازه‌گیری شده است.

نتایج تحقیق فوق نشان می‌دهد که در خان کشی آلومینیوم ۷۰۷۵، با تغییر سرعت برشی از ۲ متر بر دقیقه تا ۸ متر بر دقیقه میزان نیروی فرآیند تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، زبری سطح به میزان قابل قبولی کاهش و کیفیت سطح بهبود می‌یابد، این در حالی است که با تغییرات سرعت، تغییر قابل ملاحظه‌ای در ضخامت براده مشاهده نمی‌شود. بدین ترتیب، به‌طور کلی برای خان کشی آلومینیوم ۷۰۷۵، سرعت‌های برشی بالاتر پیشنهاد می‌شود چرا که نه تنها باعث کاهش نیرو، بلکه باعث بهبود کیفیت سطح نیز می‌شود.

۵- فهرست علائم

A	مساحت سطح مقطع (m^2)
b_{fa}	عرض سطح (mm)
f_b	نیروی خان‌کشی (N)
h	عمق برش (mm)
Q	دبی (m^3/s)
R_a	میانگین ارتفاعات زبری سطح (μm)
R_z	میانگین زبری سطح (μm)
V_c	سرعت برشی ($mm \cdot min^{-1}$)
\dot{x}	سرعت خطی (ms^{-1})

علائم یونانی

α	زاویه آزاد
γ	زاویه براده
γ_f	زاویه سطح

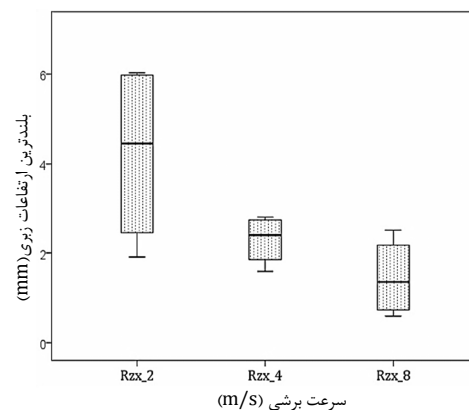
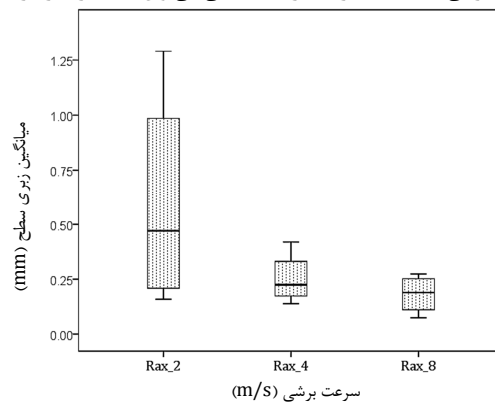
۶- مراجع

- [1] O. Forst, *Forst Broaching Manual*, Vol. 3, 1932. English
- [2] W. R. Terry, K. Cutright, Computer aided design of a broaching process,

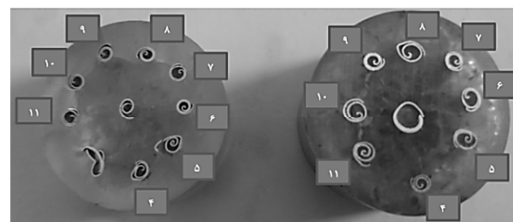
لازم به توضیح است زبری نمونه‌های آزمایش توسط دستگاه زبری‌سنج تیلر هابسن سارترونیک^۱ اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۰ نشان‌دهنده‌ی نمودار جعبه‌ای زبری سطح می‌باشد. در هر شکل جعبه‌های اول تا سوم به ترتیب سرعت‌های ۲، ۴ و ۸ متر بر دقیقه را نشان می‌دهند که شکل بالا میانگین زبری سطح (R_a) و شکل پایین بلندترین ارتفاعات زبری (R_z) را نشان می‌دهد.

۳-۴- بررسی ضخامت براده

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد، براده‌های برداشته شده با توجه به شماره دندانه آن‌ها که در شکل مشخص شده مانده‌اند و ضخامت آن‌ها توسط میکروسکوپ مدرج اندازه‌گیری شده است. شکل سمت چپ مربوط به سرعت برشی ۲ متر بر دقیقه و سمت راست مربوط به ۶ متر بر دقیقه است. ضخامت مربوط به هر دندانه در جدول ۴ درج گردیده است. ضخامت براده در سرعت برشی‌های مختلف را با تقریب مناسبی می‌توان ثابت در نظر گرفت.



شکل ۱۰ نمودار جعبه‌ای میانگین زبری سطح میانگین بلندترین ارتفاعات زبری



شکل ۱۱ بررسی ضخامت براده‌های خان کشی برای هر دندانه از ابزار. شکل سمت چپ مربوط به سرعت برشی ۲ و سمت راست مربوط به ۶ متر بر دقیقه است.

1. Taylor-Habson Surtronic

- 47, No. 14, pp. 2182-2188, 2007.
- [9] S. Mo, D. Axinte, T. Hyde, N. Gindy, An example of selection of the cutting conditions in broaching of heat-resistant alloys based on cutting forces, surface roughness and tool wear, *Journal of materials processing technology*, Vol. 160, No. 3, pp. 382-389, 2005.
- [10] U. Kokturk, E. Budak, Optimization of broaching tool design, *Proceeding of the CIRP ICME*, Vol. 4, 2004.
- [11] O. Ozturk, E. Budak, Modeling of broaching process for improved tool design, in *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, pp. 291-300.
- [12] E. Özelkan, Ö. Öztürk, E. Budak, Optimization of broaching design, *Industrial Engineering Research Conference*, USA, 2007.
- [13] A. HOSSEINI, H. KISHAWY, Prediction of cutting forces in broaching operation, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 12, No. 01, pp. 1-14, 2013.
- [14] Y. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka, Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, *International Academy for Production Engineering*, 2008.
- Computers & industrial engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 576-580, 1986.
- [3] H. A. Kishawy, A. Hosseini, B. Moetakef-Imani, V. P. Astakhov, An energy based analysis of broaching operation: Cutting forces and resultant surface integrity, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 107-110, 2012.
- [4] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld, Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 717-739, 2010.
- [5] D. A. Axinte, N. Gindy, K. Fox, I. Unanue, Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 10, pp. 1091-1108, 2004.
- [6] D. A. Axinte, N. Gindy, Tool condition monitoring in broaching, *Wear*, Vol. 254, No. 3, pp. 370-382, 2003.
- [7] D. Axinte, F. Boud, J. Penny, N. Gindy, D. Williams, Broaching of Ti-6-4- Detection of workpiece surface anomalies on dovetail slots through process monitoring, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 87-90, 2005.
- [8] D. Axinte, An experimental analysis of damped coupled vibrations in broaching, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.