

## انتخاب بهینه پارامترهای ماشین کاری فولاد ضد زنگ آستینیتی بر اساس معیارهای مدیریتی تولید

محمدرضا وزیری سرشک، استادیار  
دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران  
vaziri@kashanu.ac.ir

ارسال مقاله: ۹۰/۵/۱۰ اصلاحیه: ۹۰/۸/۷  
پذیرش مقاله: ۹۰/۹/۲۳

**چکیده:** فولادهای ضد زنگ آستینیتی، کاربرد وسیعی در ساخت تجهیزات صنایع مرتبط با سیستم‌های انرژی از جمله صنعت نفت و نیروگاه‌ها دارند؛ بنابراین انتخاب مناسب پارامترهای برش با هدف کاهش هزینه تولید قطعات از این جنس، می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش هزینه‌های سیستم‌های انرژی داشته باشد، اما خواص مکانیکی ویژه‌ای، تراشکاری این نوع فولادها را متمایز از سایر فولادها کرده است. کیفیت نامناسب سطح و سایش شدید ابزار به دلیل کارسخت‌شوندگی و چقرمگی زیاد، از مشکلات اختصاصی براده‌برداری از این نوع فولادهاست و محاسبات ویژه‌ای را می‌طلبد. در این مقاله با توجه به نقش سرعت در وضعیت ویژه تشکیل لبه انباشته و به کمک نتایج مجموعه‌ای از آزمایش‌ها، رابطه ارائه شده در مراجع برای محاسبه زبری ایده‌آل سطح فقط بر حسب پیشروی و شعاع نوک ابزار، برای اعمال اثر سرعت برش اصلاح می‌شود. با توجه به اینکه علاوه بر کنترل سایش ابزار، عوامل دیگری هم در بازده کلی تولید مؤثر هستند اما در تدوین جدول‌ها و نمودارهای موجود در نظر گرفته نشده‌اند. نتایج این مقاله با لحاظ کردن این معیارها این اجازه را به کاربر می‌دهد تا مطابق با نیاز خود، شرایط مناسب برش را انتخاب کند. این نیاز می‌تواند کمترین هزینه تولید و یا تولید سریع‌تر باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پارامترهای بهینه برش، فولاد ضد زنگ آستینیتی، هزینه تولید، سرعت تولید، زبری واقعی سطح، سایش ابزار.

ماده پایه ایده آل و پر استفاده در تولید تجهیزات صنایع مرتبط با انرژی مطرح کرده است. استحکام خزشی بالا باعث شده که این فلز به طور موفقیت آمیزی در کاربردهایی در دماهای بالا و در محیط‌های خورنده نظیر آنچه تجهیزات در صنایع نفت و گاز و نیروگاهی با آن مواجه‌اند، به کار گرفته شود. مثال‌هایی از این تجهیزات می‌تواند شیرهای صنعتی، چک ولوها، تله‌های بخار، بدنه فیلترها، مخازن و خطوط لوله، و خطوط بخار اشباع و فوق اشباع باشند. همه این مزیت‌ها باعث کاربرد و استفاده مقدار فراوانی فولاد ضد زنگ در کشورهای صنعتی و در حال توسعه شده است. بر اساس ارزیابی نشریه «متال بولتن»، تولید این نوع فولاد در جهان با افزایش ۲۰۰ درصدی از ۱۴ میلیون تن در سال ۱۹۹۴ به ۲۸ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ رسیده که مؤید رشد ۱۲/۵ درصدی در سال می‌باشد [۷]. در ایران هم کاربرد این فلز در صنایع مرتبط با انرژی رو به افزایش است؛ برای مثال، پروژه‌ای در مورد استفاده از فولادهای ضد زنگ در جاذب‌های نیروگاه خورشیدی در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (کد طرح ۱۰۱۲۰۸۸۳) در حال انجام است [۷]. با توجه به اینکه هزینه واقعی تولید فولاد ضد زنگ در نتیجه نوآوری‌های فنی و تکنیکی کاهش یافته است، قطعاً کاهش در هزینه‌های فرآیند تولید قطعات صنعتی نظیر ماشین کاری هم نقش به‌سزایی در کاهش هزینه‌های سیستم‌های انرژی خواهد داشت.

### ۳. انتخاب ابزار

آزمایش‌های برش فولاد ضد زنگ آستینیتی نشان می‌دهد که با توجه به تشکیل فازهای میانی در سطح، نرخ رشد گودشدگی لبه ابزار کربایدی، اندکی پس از ابتدای برش، بسیار آهسته خواهد بود [۱]. با توجه به همین ویژگی، معمولاً در برش این نوع از فولادها به کارگیری ابزار کربایدی از آلیاژ WC-Co توصیه می‌شود.

### ۴. انتخاب عمق برش

فولادهای ضد زنگ آستینیتی، بسیار کارسخت‌شونده هستند؛ البته باید در نظر داشت که مشکلات خاصی در براده‌برداری از سطوح فلزی با این خصوصیت وجود دارد. این سختی می‌تواند از براده‌برداری مراحل قبلی ماشین کاری با ابزار بسیار کند به جا مانده باشد؛ بنابراین به کارگیری ابزارهای تیز و پیشروی‌های به طور منطقی زیاد، دو توصیه کاربردی برای پرهیز از آسیب ابزار در مواجهه با این پدیده (سخت‌شوندگی) خواهند بود [۱]. از این رو مسئله تعویض به موقع ابزار در برش این فولادها بسیار حائز اهمیت است. پیامد دیگر این خصوصیت، تفاوت مراحل انتخابی پیش‌تراشی و پرداخت نسبت به مراحل معمول برای سایر فولادهاست به گونه‌ای که حداقل مراحل متوالی پیش‌تراشی منظور گردد تا سطح به کمترین مقدار ممکن سخت

## ۱. مقدمه

استحکام بالا، ضریب هدایت حرارتی کم، چقرمگی زیاد و کارسخت‌شوندگی بالای فولاد ضد زنگ آستینیتی، عواملی هستند که باعث مشکل‌تر شدن ماشین کاری این نوع از فولادها از سایر فولادهای کربنی و کم‌آلیاژ شده‌اند. کیفیت نامناسب سطح و سایش شدید ابزار، از مشکلات اختصاصی براده‌برداری از این نوع فولادها می‌باشند [۱]؛ بنابراین این دو پارامتر به طور ویژه و سایر پارامترهای تولید به طور ضمنی باید مورد توجه قرار گیرند تا شرایط بهینه برش برای این نوع فولاد تعیین شود. از این منظر، مراحل برش که علاوه بر ماشین کاری شامل مجموعه‌ای از زمان‌های اتلافی هم می‌شود، باید با نگاه کلی به فرآیند تولید طراحی شود. کوک [۲] و آرمارگو و براون [۳] در دو تحقیق مجزا با احتساب این زمان‌ها و فقط برای فرآیند براده‌برداری خاصی، سرعت برش و پیشروی مناسب برای آن شرایط را ارائه کرده‌اند، اما ترنت و رایت [۱] در تحقیقی کامل‌تر، جدولی را برای عموم فولادها و آن هم برای دو پیشروی خاص ارائه نموده‌اند. این در حالی است که ماشین کاری فولاد ضد زنگ بسیار سخت‌تر از فولادهای کربنی و کم‌آلیاژ است. هرچند که در هندبوک ماشین کاری ASM [۴] «نمودار ماشین کاری» برای این نوع فولاد در دسترس است، اما محدوده انتخاب وسیع می‌باشد و فقط عدم تشکیل لبه انباشته خیلی بزرگ و سایش سریع ابزار را تضمین می‌کند. تکینر و یسیلیورت [۵] تأثیر پارامترهای مختلف برش را بر کیفیت سطح به جا مانده از براده‌برداری و سایش ابزار در فولادهای ضد زنگ آستینیتی بررسی کرده‌اند، اما هدف آن‌ها تعیین محدوده بهینه نبوده و کنترل غیرمستقیم زیری سطح مد نظر بوده است. در تحقیقی دیگر، کرکوت و همکاران [۶] محدوده بهینه سرعت برش را برای این نوع از فولادها ارائه کرده‌اند، اما این مقادیر فقط برای یک پیشروی خاص و بر اساس دستیابی به سایش کمتر ابزار و صافی بهتر سطح تعیین شده‌اند.

در تحقیق حاضر، سعی شده تغییرات تمامی پارامترهای تولید در محدوده مجاز ماشین کاری محاسبه شود تا امکان برقراری تعادل بین خواسته‌ها در انتخاب شرایط بهینه فراهم شود. نتایج این تحقیق به کاربر اجازه می‌دهد بر حسب نیازهای متفاوت، شرایط برش مناسبی را انتخاب کند تا برای مثال، تعویض ابزار تا حد اکثر ممکن به تأخیر افتد یا قطعه در سریع‌ترین زمان ممکن تولید شود و یا هزینه کلی تولید کمترین مقدار باشد.

## ۲. فولادهای ضد زنگ آستینیتی

فولادهای ضد زنگ آستینیتی، آلیاژی از آهن، نیکل و کروم هستند که در مقابل خوردگی و زنگ‌زدگی مقاوم‌اند. طول عمر زیاد، نیاز به حفاظت اندک و همچنین بازیافت‌پذیری کامل، آن‌ها را به عنوان یک

شود. در این باره، پس از تعیین پیشروی و سرعت برش بر حسب توان دستگاه، باید بیشترین عمق برش ممکن انتخاب شود.

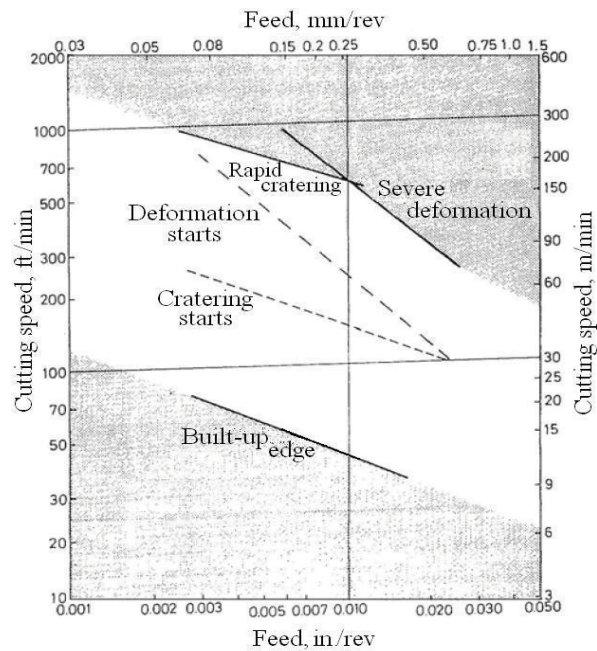
### ۵. انتخاب پیشروی و سرعت برش

ترنت و رایت [۱] جدول (۱) را به عنوان راهنمای انتخاب ماکزیمم سرعت برش (سرعت برشی  $v$  به  $m/min$  و پیشروی  $f$  به  $mm/rev$ ) برای عموم فولادها در تراشکاری با ابزار سمیتید کرباید ارائه کرده‌اند. مبنای تدوین این جدول، پیشنهاد حداکثر سرعت برش برای ایجاد تعادل بین نرخ تولید و سایش ابزار بوده است.

جدول (۱): ماکزیمم سرعت برش برای تراشکاری عموم فولادها [۱]

سختی ویکرز	ماکزیمم سرعت برش پیشنهادی، $v$						
	کمترین	۹۰	۱۶۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰
۴۵۰	۵۰۰	۱۶۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰
۴۰۰	۴۵۰	۱۶۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰
۳۵۰	۴۰۰	۱۶۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰
۲۵۰	۳۵۰	۱۶۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰
۱۶۰	۲۵۰	۱۶۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰
۹۰	۱۶۰	۱۶۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰
کمترین	۱۶۰	۱۶۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰

اما مطابق آنچه گفته شد، رفتار فولاد ضد زنگ آستینیتی بسیار متفاوت از سایر فولادهای کربنی و یا کم‌آلیاژ است؛ بنابراین ارائه مقادیر مناسب مختص این نوع فولاد لازم به نظر می‌رسد. هندبوک ماشین‌کاری ASM [۴] «نمودار ماشین‌کاری» نشان داده شده در شکل (۱) را برای فولاد ضد زنگ آستینیتی در برش با ابزارهای کربایدی مخصوص تراشکاری فولاد ارائه کرده است.

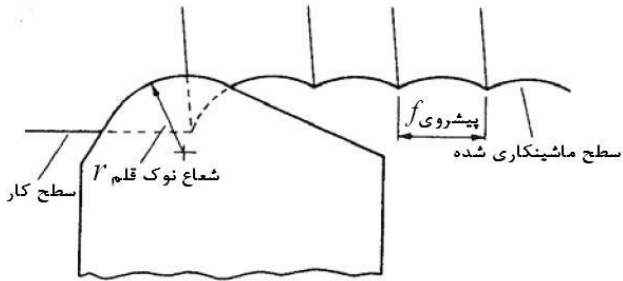


شکل (۱): «نمودار ماشین‌کاری» فولاد ضد زنگ آستینیتی [۴]

در شکل (۱) محدوده‌های نامناسب که همراه با تشکیل لبه انباشته و تغییر شکل و سایش شدید ابزار می‌باشد، با هاشور مشخص شده است. اما ضمن ارائه محدوده وسیعی از پارامترهای برش، انتخاب بر اساس این معیار فقط تضمین‌کننده عمر ابزار خواهد بود؛ لذا در بخش‌های بعدی این تحقیق علاوه بر معرفی سایر عوامل مؤثر بر فرآیند تولید، تأثیر آن‌ها در انتخاب شرایط بهینه برش نیز در نظر گرفته خواهد شد.

### ۶. زبری سطح

ناهمواری واقعی سطح تراشکاری شده را می‌توان شامل دو بخش متفاوت ناهمواری ایده‌آل و ناهمواری طبیعی دانست. ناهمواری ایده‌آل متأثر از شکل هندسی قلم و آهنگ پیشروی است. در عمل، قلم‌ها معمولاً نوک گرد دارند. شکل (۲) سطح حاصل از چنین قلمی را در شرایط ایده‌آل نشان می‌دهد.



شکل (۲): مدل ایده‌آل ناهمواری سطح ماشین‌کاری شده با قلم نوک گرد [۸]

به دست آوردن معادله‌ای نظری برای مقدار میانگین حسابی ( $R_a$ ) برای چنین سطحی دشوار است، اما می‌توان نشان داد که این مقدار ناهمواری با پیشروی ( $f$ ) و شعاع نوک قلم ( $r$ ) رابطه‌ای به شرح زیر دارد [۸]:

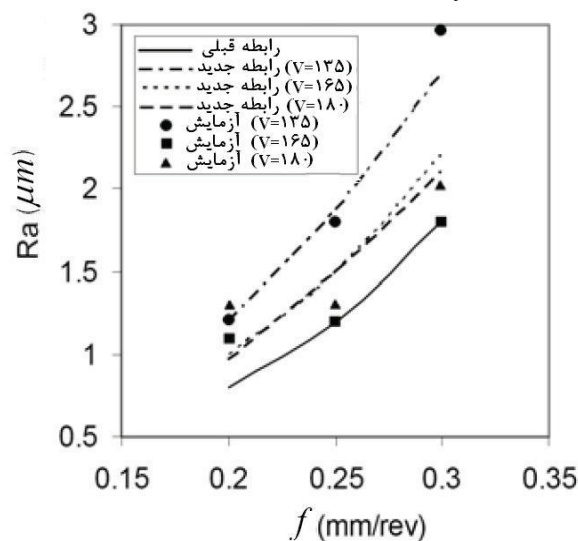
$$R_a = 0.0321 \left( \frac{f^2}{r} \right) \quad (1)$$

شرایط لازم برای ایجاد حالت ایده‌آل در عمل به ندرت پیش می‌آید و معمولاً ناهمواری‌های طبیعی که ناشی از هرگونه بی‌نظمی در فرآیند تراش می‌باشند، بخش بزرگی از ناهمواری‌های واقعی را تشکیل می‌دهند. فولاد ضد زنگ آستینیتی، خواص مکانیکی ویژه‌ای دارد که منجر به تشکیل و شکست لبه انباشته می‌شود. ذره‌های شکسته شده به وسیله سطح زیرین براده به سطح تراشیده شده حمل شوند. بدیهی است که در نتیجه این عمل سطح ناهموارتر می‌شود [۸]. تشکیل این لبه، فرآیندی متأثر از سرعت برش است که تأثیر آن در رابطه (۱) لحاظ نشده است. در ادامه با توجه به زبری سطح اندازه گرفته شده در سرعت‌های مختلف برش، تلاش می‌شود این رابطه برای اعمال اثر سرعت اصلاح شود.

## ۲.۶. ارزیابی مدل زبری واقعی سطح

برای ارزیابی عملکرد مدل ریاضی ارائه شده از داده‌های آزمایش دیگری که توسط تکینر و سیلیورت [۵] انجام شده، استفاده می‌شود. آزمایش‌های آن‌ها بر روی میله‌ای از فولاد ضد زنگ آستنیتی AISI 304 به طول و قطر به ترتیب ۲۰۰ و ۳ میلی‌متر و به عمق ثابت برش ۲/۵ میلی‌متر انجام شد. سرعت‌های برش ۱۸۰، ۱۶۵ و ۱۳۵ و پیشروی‌های ۰/۳، ۰/۲۵ و ۰/۲ بود. ابزار برش هم سمیتید کرباید WCISO P10 بود زبری سطح با تجهیز Wild Heerbrugg instrument اندازه‌گیری شد. شکل (۴) نتایج مدل ریاضی پیشین برای زبری ایده‌آل سطح (رابطه ۱) و مدل ریاضی جدید برای زبری واقعی سطح (رابطه ۲) را با داده‌های آزمایش مقایسه می‌کند.

همان‌طور که دیده می‌شود، در سرعت‌های برش کمتر (۱۳۵ m/min) که احتمال تشکیل و تثبیت لبه انباشته بیشتر است، مدل زبری واقعی سطح نتایج بسیار بهتری را پیش‌بینی می‌کند، اما با افزایش سرعت و کم شدن تأثیر لبه انباشته، مقادیر به آنچه مدل زبری ایده‌آل سطح پیش‌بینی می‌کند هم نزدیک می‌شود، اما در مجموع می‌توان عملکرد مدل زبری واقعی سطح را بهتر از مدل زبری ایده‌آل سطح دانست.



شکل (۴): مقایسه نتایج آزمایش [۵] با نتایج مدل زبری ایده‌آل و واقعی

## ۶. بزرگی زبری سطح در «نمودار ماشین کاری»

در «نمودار ماشین کاری» فولاد ضد زنگ آستنیتی مطابق شکل (۱) منطقه ایمن ماشین کاری مشخص شده است. انتخاب پارامترهای برش بر اساس این نمودار، تضمین‌کننده عدم تشکیل لبه انباشته بزرگ و سایش شدید ابزار است. با هدف اینکه تخمینی از بزرگی زبری واقعی سطح به جا مانده از تراشکاری در اختیار کاربر قرار گیرد، به کمک

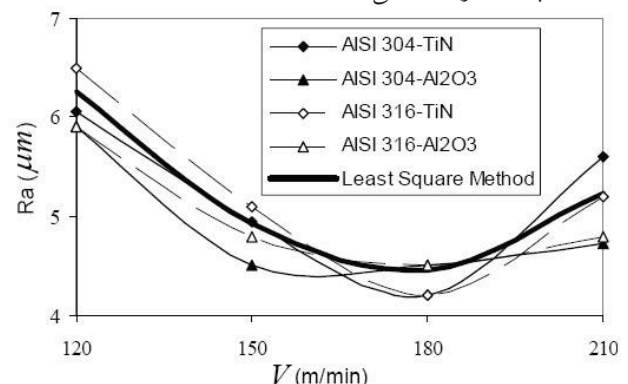
## ۱.۶. ارائه مدل ریاضی برای زبری واقعی سطح

شرایط تراشکاری ایده‌آل هنگامی حاصل می‌شود که لبه انباشته تشکیل نشود و «ابزار لرزه» و سایر خطاها در حرکات ماشین وجود نداشته باشد. با توجه به اینکه اثر سرعت به صورت فرآیند تشکیل و شکست لبه انباشته - که نوعی بی‌نظمی در فرآیند تراش است - ظاهر می‌شود، روش تحلیلی برای مدل کردن این پدیده موجود نیست؛ بنابراین از روش تجربی و انجام آزمایش می‌توان کمک گرفت. با هدف اصلاح رابطه ریاضی (۱) اثر سرعت به صورت یک تابع چندجمله‌ای در نظر گرفته می‌شود. برای عمومیت بخشیدن به رابطه برای تراش فولادهای ضد زنگ آستنیتی، آزمایش‌های کیفیتکی [۹] در نظر گرفته شده که هم بر روی دو نوع فولاد AISI 304 و AISI 316 صورت گرفته و هم دو ابزار سمیتید کرباید با دو پوشش لایه‌ای متفاوت TiC/TiCN/TiN و TiCN/TiC/Al2O3 به کار رفته است. قطعه کار میله‌ای به طول و قطر به ترتیب ۱۵۰ و ۴۰ میلی‌متر است که با ماشین تراش Jahnford TC35 CNC turning center با سرعت دورانی ۴۰۰۰ rpm و توان ۱۰ KW تراش داده شده است. از روانساز استفاده نشده و تراشکاری مطابق روش استاندارد ISO 3685 است. سرعت‌های برش به کار رفته ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ می‌باشند. پیشروی و عمق برش ثابت، و به ترتیب ۰/۱۶ mm/rev و ۱/۶ mm است. شعاع نوک ابزار ۰/۸ mm اندازه‌گیری شد. زبری سطح به کمک تجهیز Mitutoyo surfest 211 instrument اندازه گرفته شد. بهترین منحنی انطباق داده شده به داده‌های آزمایش به کمک روش «کمترین مربعات (خطا) مطابق رابطه (۲) به دست آمد.

$$R_a = 0.0321 \left( \frac{f^2}{r} \right) \times \left( 2.1605 \times 10^{-6} V^3 - 5 \times 10^{-4} V^2 - 2.7 \times 10^{-2} V + 12.8 \right) \quad (2)$$

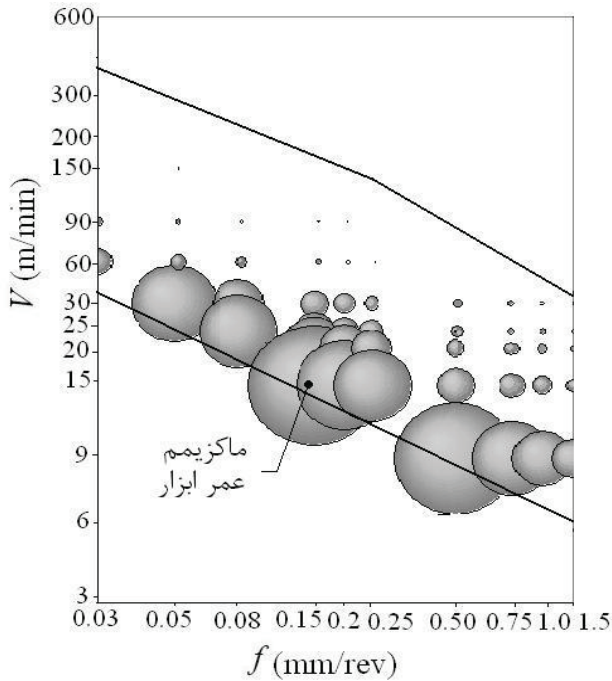
شکل (۳) مقادیر به دست آمده از آزمایش [۹] و منحنی انطباق

داده شده به آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۳): زبری سطح به دست آمده از آزمایش [۹] و منحنی منطبق شده

۰/۱۵ و سرعت برش ۱۵ m/min اتفاق می‌افتد. این شرایط می‌تواند مطلوب کاربری باشد که می‌خواهد تعویض ابزار را تا حداکثر ممکن به تأخیر اندازد.



شکل (۶): مقایسه بزرگی طول عمر ابزار در شرایط مختلف برش

## ۸. ملاحظات تکمیلی اقتصاد ماشین کاری

هزینه‌های تکمیلی فرآیند تولید علاوه بر هزینه ماشین کاری، شامل هزینه ماشین و بالاسری، هزینه اپراتور، هزینه ابزار، هزینه زمان اتلافی تعویض قطعه تراشیده شده قبلی با قطعه خام جدید، هزینه بابت زمان اتلافی مربوط به تعویض لبه کند شده ابزار و در نهایت، هزینه زمان‌های اتلافی در فرآیند تولید است. لازم به ذکر است که مسئله اقتصاد تراشکاری، زمانی مهم‌تر جلوه می‌کند که مطابق آنچه در صنعت اتفاق می‌افتد، حجم براده‌برداری بالایی مد نظر باشد و این عمل نیازمند چندین مرتبه تیز کردن ابزار خواهد بود. در چنین شرایطی، منظور از انتخاب بهینه پارامترهای ماشین کاری، ایجاد تعادل بین عواملی است که تأثیر متقابل بر هزینه کلی تولید دارند؛ بدین معنی که در براده‌برداری‌های ممتد، انتخاب سرعت برش و پیشروی، هم در عمر ابزار اثرگذار است و هم در حجم براده برداشته شده در زمان حاضر به کاری ابزار (فاصله زمانی بین دو تیزکاری)؛ برای مثال، سرعت برش بیشتر یعنی حجم براده برداری بیشتر در زمان، که مطلوب هم هست اما سایش شدیدتر ابزار را در پی دارد. این ویژگی معادل کم شدن طول عمر ابزار و افزایش تعداد

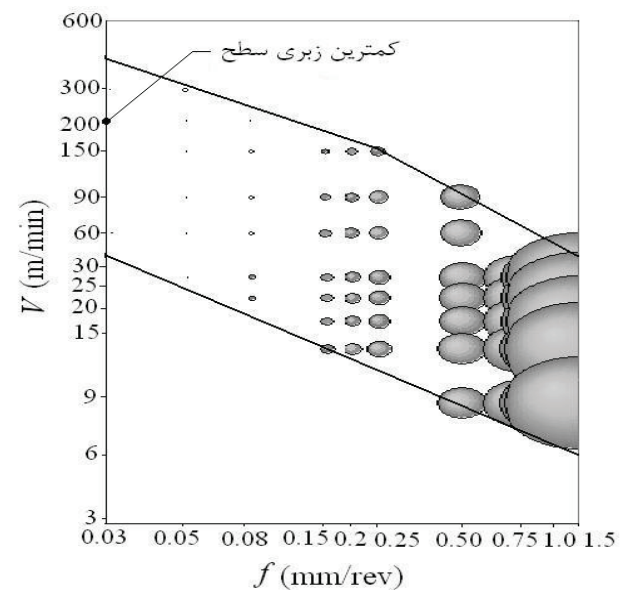
رابطه (۲) این پارامتر برای محدوده مجاز در «نمودار ماشین کاری» محاسبه و در شکل (۵) نشان داده شده است. برای ارائه تخمینی قابل قیاس و نیز پرهیز از مقادیر عددی، بزرگی مقادیر به دست آمده با بزرگی سطح دایره‌های نشان داده شده که مختصات مرکزش سرعت برش و پیشروی را در آن شرایط برش مشخص می‌کند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، کمترین زبری سطح در کمترین پیشروی یعنی ۰/۰۳ اتفاق می‌افتد، اما سرعت برش ۲۰۰ m/min است. با توجه به اینکه رابطه (۲) هم اثر پیشروی و هم اثر سرعت را در نظر می‌گیرد، تخمین ارائه شده نسبت به آنچه مدل زبری ایده‌آل سطح (رابطه ۱) ارائه می‌کند، به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود.

## ۷. عمر ابزار

محدوده پارامترهای برش توصیه شده در «نمودار ماشین کاری» [۴] شکل (۱) در نظر گرفته شد و عمر ابزار در برش فولاد ضد زنگ مطابق رابطه (۳) که در هندبوک ماشین‌کاری ASM [۴] و به طور اختصاصی برای تراش این نوع از فولاد ارائه شده، محاسبه می‌شود.

$$T = \frac{8.3 \times 10^5}{V^{4.34} f^{1.95}} \quad (3)$$



شکل (۵): مقایسه بزرگی زبری واقعی سطح در شرایط مختلف برش

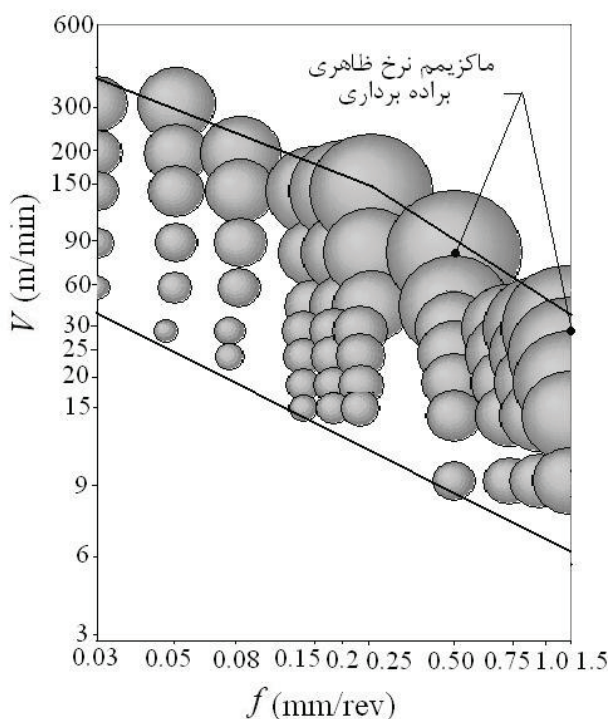
شکل (۶) نتایج محاسبات را نشان می‌دهد. مشابه آنچه در مورد نحوه ترسیم شکل (۵) گفته شد، در شکل (۶) هم بزرگی تفاوت مقادیر با بزرگی سطح دایره‌ها قابل ارزیابی است. مطابق شکل (۶) بیشترین عمر ابزار در میانه دیاگرام و در پیشروی

مرتبه تیز کردن ابزار و در نتیجه تحمیل زمان اتلافی باز کردن و بستن و تنظیم مجدد ابزار خواهد بود که نامطلوب است. هدف از این تحقیق، مقایسه محدوده‌های بهینه سرعت و پیشروی با نگرش‌های مختلف به فرآیند براده‌برداری از قبیل هزینه براده‌برداری، هزینه کلی تولید، زمان کل (نرخ براده‌برداری)، و حجم براده برداشته شده است؛ برای مثال، اگر کمترین تعداد دفعات تیز کردن ابزار مد نظر باشد، حجم براده‌برداری بیشتر مطلوب است، در حالی که انجام براده‌برداری در کمترین زمان ممکن، معادل رجحان نرخ براده‌برداری است که البته زمان‌های اتلافی برای تیز کردن ابزار هم باید لحاظ شود. در جدول‌هایی که در حال حاضر موجود است، محدوده سرعت برش برای یک یا دو پیشروی خاص به عنوان محدوده‌های بهینه پیشنهاد شده است، در حالی که نتایج این تحقیق جامع، محدوده‌هایی گسترده‌تر از سرعت برش و پیشروی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد و امکان انتخاب بهینه را با اهداف متفاوت برای او فراهم می‌کند. برای ایجاد امکان محاسبه و مقایسه، مقادیر تخمینی ارائه شده در مرجع [۱] استفاده شده است. الماس‌ها (اینسرت ها) دارای ۴ لبه برش و به قیمت ۲/۸ دلار یعنی هر لبه ۷۰ سنت هستند و پس از سایش تعویض می‌شوند. زمان لازم برای تعویض و تنظیم لبه برش جدید، ۳ دقیقه است. هزینه اپراتور ساعتی ۱۵ دلار و هزینه ماشین و بالاسری ساعتی ۷ دلار است. زمان اتلافی در حین پروسه تولید هر قطعه ۳۰ ثانیه است و در تعویض قطعه هم ۱ دقیقه زمان تلف خواهد شد. برای به دست آوردن حجم براده‌برداری مورد نیاز هر قطعه، براده‌برداری با عمق برش ۱ mm از میله‌ای به طول ۱۵۰ mm و قطر ۵۰ mm مد نظر قرار گرفته است. در ادامه با توجه به نیازهای متفاوتی که می‌تواند مد نظر کاربر باشد، محدوده شرایط مناسب برش انتخاب می‌شود تا نشان داده شود این شرایط بهینه چقدر می‌توانند متفاوت باشند. لازم به ذکر است که شرح محاسبات لازم توسط ترنت و رایت [۱] ارائه شده است، اما تفاوت محاسبات این مقاله با تحلیل‌های صرفاً ریاضی چنین مراجعی در این است که نتیجه محاسبات آن‌ها صرفاً پیشنهاد یک وضعیت برش به عنوان بهینه برای هدف خاصی است، اما محاسبات ارائه شده در این مقاله، این امکان را به کاربر می‌دهد که در محدوده مجاز «نمودار ماشین کاری» وضعیت کلیه شرایط برش را با اهداف مختلف مقایسه کند و با ایجاد تعادل بین اهداف مختلف، بهترین

انتخاب ممکن را تعیین نماید. ضمناً این تحقیق در مورد فولاد ضد زنگ آستینیتی انجام شده که به واسطه داشتن خواص مکانیکی خاصی، محاسبات آن با آنچه به طور عمومی در مورد فولادها در دسترس است، همخوانی ندارد.

## ۱.۸. نرخ براده‌برداری

نرخ ظاهری براده‌برداری با محاسبه حجم براده برداشته شده در واحد زمان فقط ماشین کاری و بدون احتساب سایر وقفه‌های تولید محاسبه و در شکل (۷) ارائه شد.



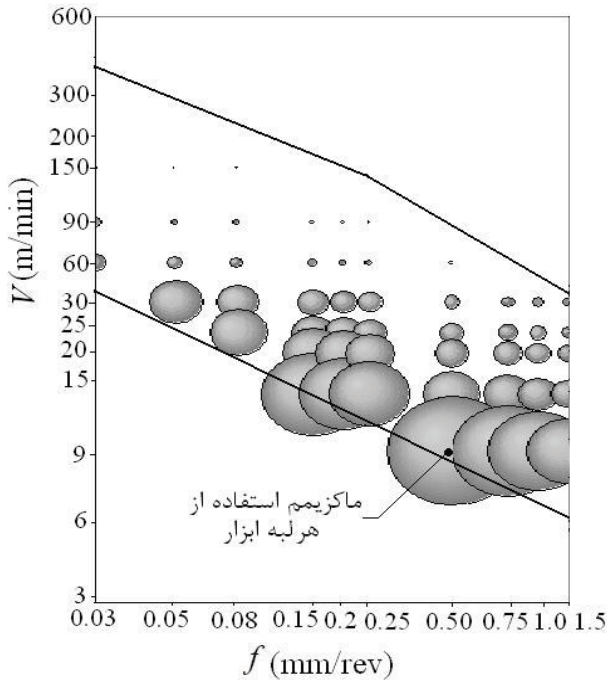
شکل (۷): مقایسه بزرگی نرخ ظاهری براده‌برداری با شرایط برش مختلف

نرخ حقیقی براده‌برداری (نرخ تولید) با محاسبه حجم براده برداشته شده در واحد زمان تولید و با احتساب وقفه‌های تولید محاسبه و در شکل (۸) ارائه شده است.

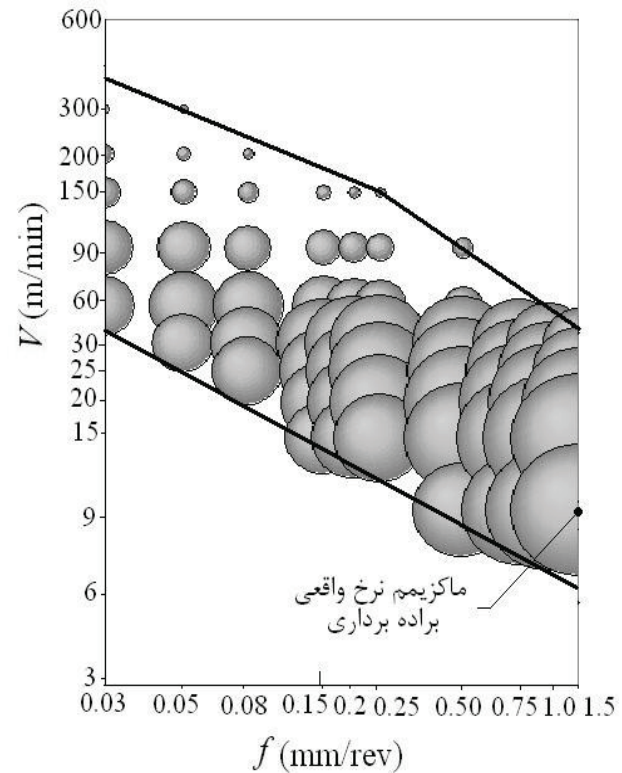
در مقایسه شکل‌های (۷) و (۸) دیده می‌شود که بدون احتساب وقفه‌های تولید تعیین نرخ ظاهری براده‌برداری، پیشروی ۱/۵ و سرعت برش ۳۰ m/min و یا پیشروی ۰/۵ و سرعت برش ۹۰ m/min توصیه می‌کند، در حالی که احتساب وقفه‌های تولید، پیشروی ۱/۵ و سرعت برش ۹ m/min را مناسب‌تر می‌داند. اهمیت تعیین صحیح نرخ براده‌برداری در این است که این پارامتر را می‌توان به عنوان معیار سرعت تولید دانست.

### ۲.۸. ماکزیمم کاربری ابزار

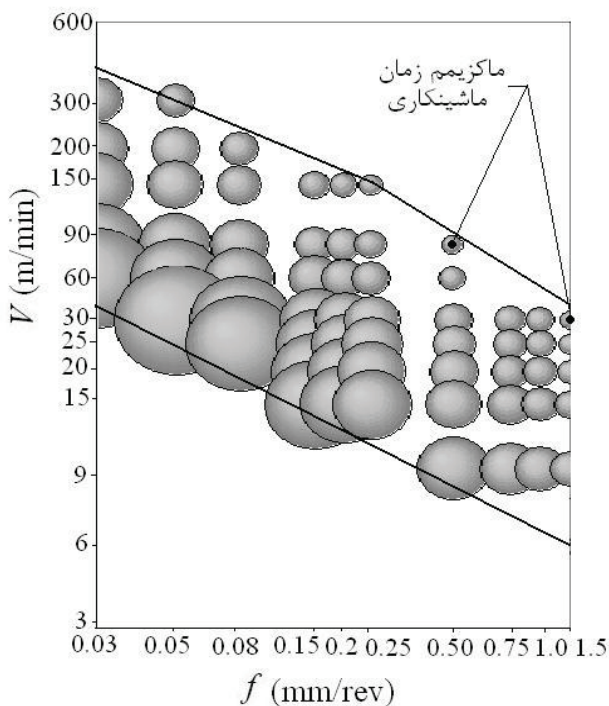
ماکزیمم کاربری ابزار با حجم براده برداشته شده با ابزار قبل از کند شدن آن شناخته می‌شود. با توجه به طول عمر ابزار و پارامترهای برش، این مقدار برای شرایط مختلف برش محاسبه شده و بزرگی مقادیر آن در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): مقایسه بزرگی ماکزیمم کاربری ابزار با شرایط برش مختلف



شکل (۸): مقایسه بزرگی نرخ حقیقی براده برداری در شرایط برش مختلف



شکل (۱۰): مقایسه بزرگی زمان ماشین کاری قطعه با شرایط برش مختلف

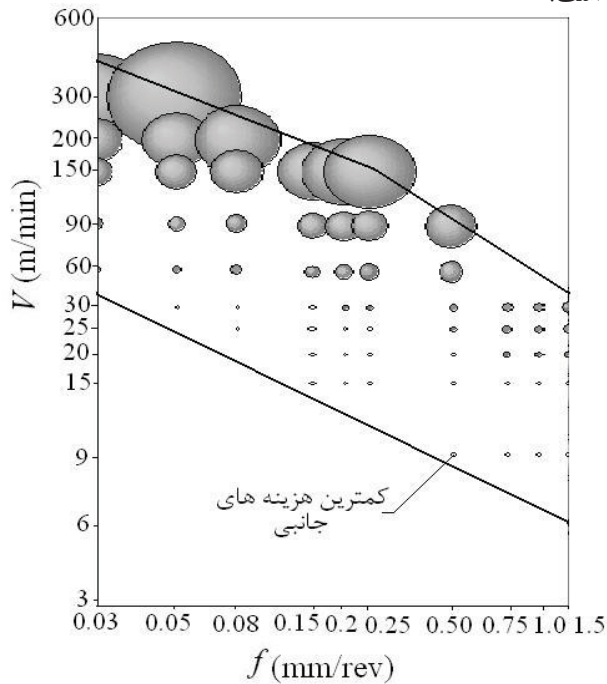
در مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۱) دیده می‌شود که زمان ماشین کاری هر قطعه در دو وضعیت برش پیشروی ۰/۵ و سرعت برش ۳۰ m/min و همچنین پیشروی ۱/۵ و سرعت برش ۹۰ m/min کمترین مقدار خواهد بود، در حالی که با احتساب وقفه‌های تولید، کمترین زمان تولید هر قطعه در وضعیت برش پیشروی ۱/۵ و

مطابق آنچه در شکل (۹) دیده می‌شود، ماکزیمم کاربری ابزار در شرایط پیشروی ۰/۵ و سرعت برش ۹ m/min اتفاق می‌افتد. اهمیت بررسی این پارامتر، نشان دادن انتخاب بهینه به کاربری است که می‌خواهد بیشترین استفاده را از ابزار خود بکند.

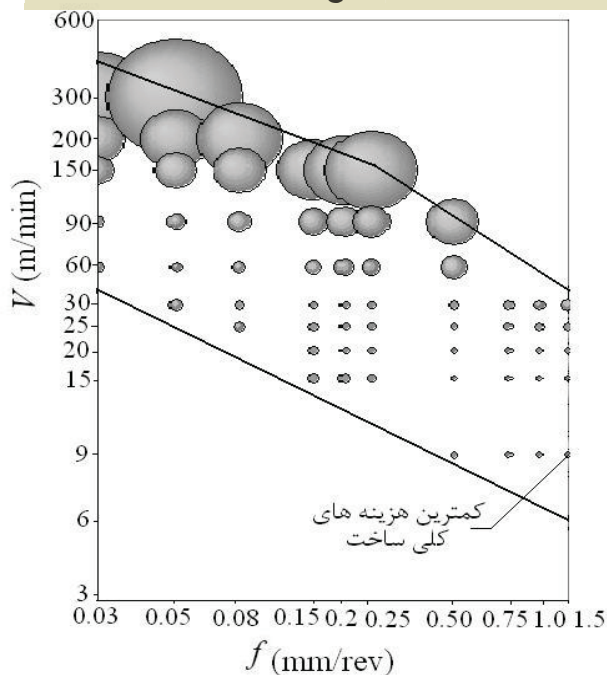
### ۳.۸. زمان تولید هر قطعه

از دو دیدگاه می‌توان زمان تولید هر قطعه را محاسبه کرد: در دیدگاه اول، با صرف نظر از وقفه‌های تولید، فقط زمان مورد نیاز برای ماشین کاری هر قطعه محاسبه می‌شود. شکل (۱۰) نتایج این محاسبه را نشان می‌دهد؛ اما در دیدگاه دوم، با احتساب زمان‌های اتلافی نظیر زمان تعویض قطعه و ابزار، زمان کل تولید هر قطعه مطابق شکل (۱۱) به دست می‌آید.

اما هزینه‌های جانبی تولید هر قطعه نظیر هزینه پرداختی به اپراتور و هزینه ماشین و بالاسری در زمان‌های اتلافی در حین پروسه که شامل وقفه تعویض ابزار و قطعه هم می‌باشند، نیز بر تولید تحمیل خواهد شد. مجموع این هزینه‌ها در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این دو هزینه باید با هم جمع شوند تا هزینه کلی تولید هر قطعه به دست آید. مجموع این هزینه‌ها در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

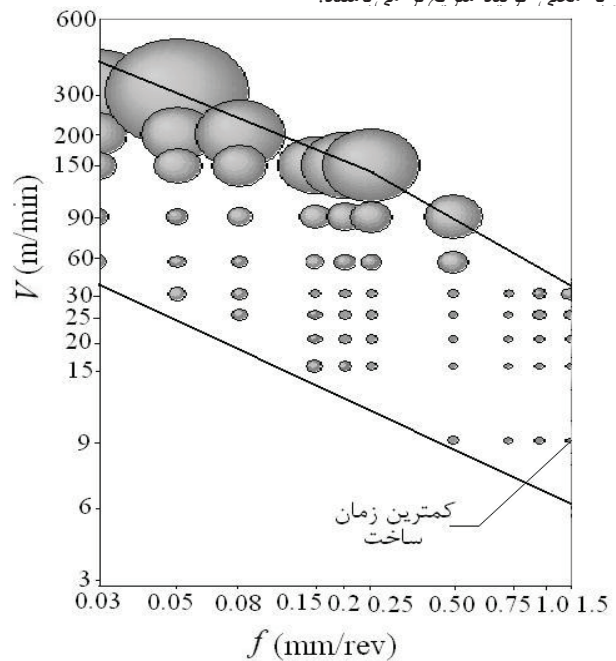


شکل (۱۳): مقایسه بزرگی مجموع هزینه‌های جنبی تولید هر قطعه



شکل (۱۴): مقایسه بزرگی هزینه کلی تولید هر قطعه

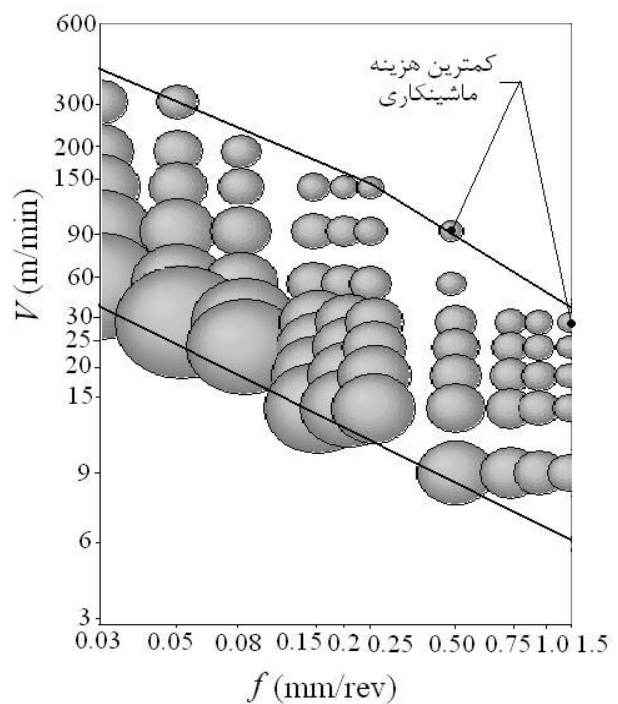
سرعت برش ۹ m/min اتفاق خواهد افتاد که با نتایج به دست آمده برای نرخ براده‌برداری حقیقی در شکل (۸) همخوانی دارد، زیرا هر دو به معنی تولید سریع‌تر می‌باشند.



شکل (۱۱): مقایسه بزرگی زمان تولید هر قطعه در شرایط برش مختلف

#### ۴.۸. هزینه تولید هر قطعه

اگر فقط هزینه تراشکاری هر قطعه مد نظر باشد، شکل (۱۲) نشان دهنده وضعیت هزینه در شرایط مختلف برش خواهد بود.



شکل (۱۲): مقایسه بزرگی هزینه تراشکاری هر قطعه



این فولاد بسیار کارسخت‌شونده مطابقت دارد. انتخاب شرایط برش در این محدوده، تضمین‌کننده کمترین هزینه تولید، کمترین زمان تولید و بیشترین نرخ تولید خواهد بود و کاربری مناسبی از ابزار نیز صورت خواهد گرفت. در صورتی که در مرحله پرداختکاری، کیفیت سطح به جا مانده از ماشین‌کاری هم، پارامتری مورد نظر باشد، باید مقدار زبری واقعی سطح با رابطه‌های به دست آمده در تحقیق حاضر محاسبه شود تا محدوده مناسب در نمودار ماشین‌کاری مشخص و با مقایسه با سایر پارامترهای تولید که در سایر نمودارها ارائه شده‌اند، شرایط برش بهینه انتخاب شود.

### ۱۰. نتیجه‌گیری

در فرآیند براده‌برداری، فولاد ضد زنگ آستینیتی، رفتار متفاوتی نسبت به سایر فولادها از خود نشان می‌دهد در نتیجه لازم است که جدول ویژه‌ای برای شرایط برش مناسب این نوع فولاد ارائه شود، اما این محدوده در این تحقیق به کمک محاسبه و ارزیابی و بهینه‌سازی بر حسب نیازهای تولید ارائه شده است. هر چند تعیین محدوده مناسب برای دستیابی به نیازهای مختلف تولید می‌تواند منجر به پیشنهاد محدوده‌های متفاوت برش گردد، اما می‌توان ناحیه مشترک این محدوده‌ها را به گونه‌ای تعیین کرد که تا حد ممکن، نیازهای مختلف تولیدکننده برآورده گردد. نتایج این تحقیق، اهمیت در نظر گرفتن وجود شرایط تولید انبوه را در انتخاب شرایط بهینه تولید نشان می‌دهد.

### سپاسگزاری

نویسنده این مقاله، از دانشگاه کاشان به دلیل حمایت مادی از این تحقیق با شماره ۳۲۳۱۰/۳ تشکر می‌کند. همچنین از هم‌فکری اعضای هیأت تحریریه نشریه علمی - پژوهشی مدیریت انرژی، کمال سپاسگزاری را دارد.

با مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۲) و بدون احتساب هزینه وقفه‌ها، هزینه ماشین‌کاری کمتر در همان شرایط برش مربوط به زمان ماشین‌کاری کمتر اتفاق می‌افتد؛ اما کمترین هزینه‌های جانبی مطابق شکل (۱۳) مربوط به شرایط برش پیشروی ۰/۵ و سرعت برش ۹ m/min خواهد بود. جمع این دو هزینه که هزینه کلی تولید است، در شرایط برش پیشروی ۱/۵ و سرعت برش ۹ m/min کمترین مقدار را خواهد داشت و مطابق شکل (۱۱) معادل کمترین زمان تولید هم خواهد بود. اما نکته جالب این است که اگر شرایط بهینه در تولید انبوه بدون دید کلی به فرآیند تولید و بر اساس فقط ماشین‌کاری یک قطعه انتخاب شود، شرایط بهینه پیشروی ۰/۵ و سرعت برش ۹۰ m/min خواهد بود؛ لذا هزینه کلی تولید هر قطعه در این شرایط برش، بیش از ۵۰ برابر هزینه تولید هر قطعه با شرایط بهینه تعیین شده بر اساس هزینه در تولید انبوه است. با این سهل‌انگاری، افزایش هزینه تولید تعداد زیادی از قطعات قابل تصور خواهد بود. محدوده برش نامناسب مشابهی توسط کرکوت و همکاران [۶] فقط برای دستیابی به کیفیت سطح بهتر و سایش کمتر ابزار و بدون در نظر گرفتن کل فرآیند تولید پیشنهاد شده است که مطابق محاسبات فوق، افزایش هزینه تولید را در پی خواهد داشت.

### ۹. شرایط بهینه برش

مطابق محاسبات انجام شده در این تحقیق، محدوده‌های مناسب پارامترهای برش که در جدول (۲) دیده می‌شود، توصیه می‌گردد.

جدول (۲): شرایط بهینه برش پیشنهادی تراش فولاد ضد زنگ آستینیتی

پارامترهای ماشین‌کاری	محدوده مناسب
$f$ (mm/rev)	۰/۷۵-۱/۵
$V$ (m/min)	۹-۲۰

نتایج به دست آمده از این تحقیق با توصیه‌های ترنت و رایت [۱] در مورد به کارگیری پیشروی‌های تا حد ممکن بزرگ در براده‌برداری از

- [1] Trent, E. M., Wright, P. K., *Metal Cutting*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [2] Cook, N. H., *Manufacturing Analysis*, Addison Wesley, Reading MA, 1966.
- [3] Armarego, E. J. A., Brown, R. H., *The Machining of Metals*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1969.
- [4] Semiatin, S. L., *ASM Handbook; Forming and Forging*, Vol. 14, ASM International, 1988.
- [5] Tekiner, Z., Yesilyurt, S., "Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel", *Materials and Design*, Vol. 25, pp. 507–513, 2004.
- [6] Korkut, I., Kasap, M., Ciftci, I., Seker, U., "Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel", *Materials and Design*, Vol. 25, pp. 303–305, 2004.
- [7] [www.irost.com](http://www.irost.com) (سایت سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران)
- [8] Boothroyd, G., Knight, W.A., *Fundamental of Machine Tools*, Second Edition, Marcel Dekker Inc., New York, 1989.
- [9] Ciftci, I., "Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools", *Tribology International*, Vol. 39, pp. 565–569, 2006.