# طراحی فرآیند و چارت تلرانسی قطعات تراشکاری به کمک کامپیوتر

**محمدعلی فارسی**[۱*]

تاریخ دریافت: ۲۸ اردیبهشت ۹۲ تاریخ پذیرش: ۲۵ تیر ۹۲

چکیده

نقشه و مدل ایجاد شده توسط یک طراح، حاصل خلاقیت و دانش اوست که به‌صورت نقشه در اختیار سازنده قرار می‌گیرد. سازنده نیز تمامی تلاش خود را نموده تا قطعه‌ای مشابه نظر طراح تولید نماید. اما به‌علت مسائل و مشکلات تولید و مواد اولیه، تولید قطعه‌ی کاملاً دقیق بسیار مشکل و هزینه‌بر است. از مهم‌ترین مشکلات این امر طراحی فرایند تولید و تلرانس‌های هر مرحله از تولید برای دستیابی به تلرانس نهایی قطعه کار است. راه حل این مساله تعیین ترتیب عملیات مناسب و استفاده از چارت تلرانسی است. انتخاب ترتیب انجام عملیات تراشکاری و پارامترهای موثر نظیر عمق برش است. هر مرحله تراشکاری دارای یک تلرانس است، به‌طوری‌که در انتها تلرانس‌های تمامی مراحل با یکدیگر جمع شده و ممکن است تلرانس نهایی حاصله بیش از تلرانس مجاز اعلام شده (بر روی نقشه) باشد. برای پیش‌گیری از انباشت تلرانس‌ها و کاهش ضایعات تولید لازم است تلرانس مجاز هر مرحله (چارت تلرانسی) مشخص شود. استفاده از سیستم‌های نرم‌افزاری برای انجام این امر، ضمن افزایش سرعت و دقت نقش چشم‌گیری در کاهش هزینه‌ها خواهند داشت. نرم‌افزاری جهت تعیین مراحل تراشکاری و تلرانس مجاز هر عملیات (چارت تلرانسی) تدوین شده است که در این مقاله تشریح می‌گردد و کارآیی آن توسط یک مثال نشان داده می‌شود.

**واژگان کلیدی:** چارت تلرانسی، طراحی فرآیند تولید، عملیات تراشکاری، کاهش هزینه‌ی ماشینکاری.

## ۱. مقدمه

معمولاً قسمت طراحی یا بخش توسعه محصول هر شرکت، سعی می‌کند قطعه را طوری طراحی کند که کم‌ترین قیمت ممکن را داشته باشد. بخش طراحی فرآیند نیز پس از طراحی قطعه، مسئولیت چیدمان خط تولید را برعهده دارد که می‌بایستی فرآیند و ماشین‌آلات خط تولید را به‌صورت بهینه انتخاب کند. ماشینکاری، فرآیندگران‌قیمتی بوده و یک کارشناس طراحی فرآیند می‌بایستی در چیدمان خط تولید به موارد زیر توجه داشته باشد[۱].

الف- از روشی استفاده کند که تعداد عملیات روی قطعه کم‌تر باشد (خشن، میانی، نقاط مبنای اولیه و...)

ب- تا حد ممکن ابعاد قطعه‌ی خام قبل از ماشینکاری را مطابق با کم‌ترین حجم ماده قابل برداشت در هر عملیات محاسبه کند.

ت- ماشینکاری را تا حد ممکن مستقیماً با ابعاد نهایی نقشه انجام دهد.

پ- ماشین‌آلات را با توجه به تلرانس‌های مورد نیاز در هر عملیات انتخاب کند.

هر ماشین‌ابزار، تلرانس خاص و تعریف شده خود را تولید کرده و نمی‌توان با تنظیم یک عدد، از هر ماشین همان عدد را گرفت. هم‌چنین ماشین‌ابزار مختلف، تلرانس‌های مختلفی را تولید کرده و لقی‌های متفاوتی دارند. این موضوع در تلرانس چارت بسیار اهمیت دارد زیرا میزان دقت ماشین‌آلات انتخابی می‌بایستی دقیقاً مشخص باشد. البته به غیر از لقی‌های ماشین‌آلات، عوامل دیگری مانند عمر ابزار و قابلیت تکرارپذیری ماشین نیز بر دقت خروجی اعمالی به قطعه تأثیر می‌گذارد که بهتر است دقت کلی در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که دقت نامی هر ماشین‌ابزار، دوباره

[۱] استادیار گروه مکانیک- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید و پژوهشگاه هوا فضا، m.farsi@yahoo.com

کاری نیز بیشتر خواهد شد و...). با توجه به این مطالب هر کارگاهی با توجه به نوع ماشین‌ابزار خود دارای یک نوع فرآیند تولید و تلرانس‌های مجاز خواهد داشت. هر مرحله تراشکاری دارای یک تلرانس است، به‌طوری‌که در انتها تلرانس‌های تمامی مراحل با یکدیگر جمع شده و ممکن است تلرانس نهایی حاصله بیش از تلرانس مجاز اعلام شده (بر روی نقشه) باشد. برای پیش‌گیری از انباشت تلرانس‌ها و کاهش ضایعات تولید لازم است تلرانس مجاز هر مرحله (چارت تلرانسی) مشخص شود. با توجه به وابستگی طراحی فرآیند تولید و چارت تلرانسی به تجربه افراد خبره و در نظر گرفتن این نکته که صنعت ساخت تولید دانش محور در ایران بسیار جوان است، استفاده از سیستم‌های جامع کامپیوتری در این زمینه ضروری است و سبب کاهش هزینه و افزایش سرعت و دقت تولید خواهد شد.

## ۲- تاریخچه

درقرن بیستم به‌ویژه بعد از جنگ جهانی دوم با گسترش صنایع مختلف نظیر صنایع خودروسازی و هوا فضا و لزوم طراحی وساخت قطعات دقیق بر اساس کم‌ترین قیمت جهت عرضه محصول در بازارهای جهانی، به مباحث علمی در صنعت ماشینکاری توجه ویژه‌ای شد. از جمله زمینه‌های که توجه بسیاری را به خود جلب نمود، مساله‌ی طراحی فرآیند تولید و چارت تلرانسی بود [۲]. لذا این امر دارای سابقه‌ای حداقل در حدود نیم قرن است ولی در ایران این مساله کمتر از یک دهه است که مطرح شده است. طراحی فرآیند یعنی تعیین نحوه‌ی تبدیل ماده‌ی خام اولیه به محصول نهایی[۲]. این امر می‌تواند به روش مولد (Generative) یا بازیافتی (Variant) انجام شود. تحقیقات انجام شده در این رابطه اکثراً براساس سیستم بازیافتی بوده و محققین مختلف [۱و۳و۴و۵] سعی در استفاده از این روش داشته‌اند. مشکل اصلی این روش وابستگی سیستم به دانش فرد خبره بوده و سیستم برای دامنه محدوده‌ای از قطعات قابل استفاده است. استفاده از روش مولد نیز بسیار محدود است و به خاطر مشکلات موجود در رابطه با اتوماسیون فرآیند سیستم‌های اندکی در این رابطه ارائه شده است.

چارت تلرانسی ابزاری ریاضی-گرافیکی برای نمایش توالی تولید، تحلیل و چک انباشت تلرانس‌های تولید و محاسبه‌ی ابعاد فرآیند تولید است. اولین کار انجام شده جهت کامپیوتری کردن تولید چارت تلرانسی کار بیورک است [۶]. که کاربرد محدود طراحی چارت تلرانسی است. بیش‌تر تمرکز او بر روی مجموعه‌های مونتاژی در مرحله طراحی بوده است. تئوری زنجیره تلرانسی او بر مبنای زنجیره‌های ابعادی اسکالر است و در چارت تلرانسی به کمک کامپیوتر قابل استفاده است. اهلووالیا و کارولین از یک بسته نرم‌افزاری به نام CATC برای طراحی چارت تلرانسی استفاده کردند. فینگولرنت و همکاران یک روش کاملا متفاوت با کاردستی را برای اتوماسیون چارت تلرانسی انجام دادند. آن‌ها یک تئوری اساس را که بین تلرانس‌های موقعیت دهی و تلرانس‌های ماشینکاری تفاوت قائل است را به کار گرفتند[۷]. یئو ، انگوی وچن با استفاده از فیچرهای ساخت کلیه عملیات‌های تولید ممکن را بررسی کرده و بهترین توالی تولید را براساس بهترین توزیع تلرانسی ممکن شناسایی کردند [۸]. وانگ و لیانگ مساله توزیع تلرانس‌ها، انتخاب فرآیند و انتخاب پارامترهای ماشینکاری را به‌طور هم‌زمان حل کردند [۹]. آن‌ها با در نظر گرفتن ۴ مرحله ابتدایی، خشن‌کاری ، نیمه پرداخت و پرداخت برای عملیات تولید، این مساله را فقط برای قطعات استوانه‌ای داخلی و خارجی حل کردند. در داخل کشور نیز جدی‌ترین مطالعه انجام شده توسط لاسمی و آرزو [۱۰] است که در این تحقیق طراحی فرآیند مورد توجه نبوده و فقط بحث چارت تلرانسی به کمک کامپیوتر برای قطعات فرزکاری تدوین شده است.

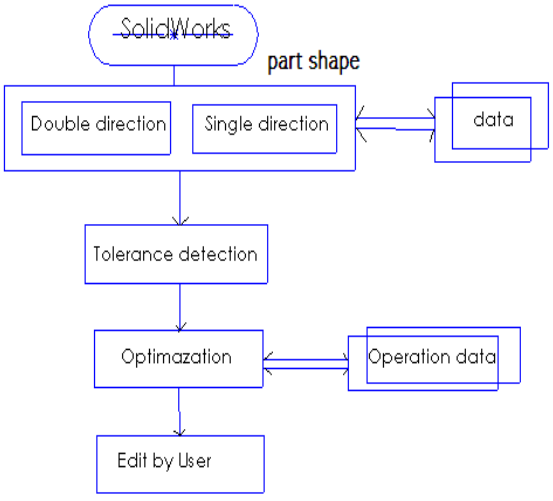
در این مقاله از روش مولد استفاده می‌شود که در این الگوریتم هندسه‌ی نهایی و اولیه قطعه کار همراه با کیفیت سطح و تلرانس نهایی همراه با مشخصات ماده نظیر سختی ماده به سیستم داده شده و سیستم براساس نوع ماشین‌ابزار موجود در بانک اطلاعاتی خود ترتیب عملیات و پارامترهای ماشینکاری را مشخص می‌کند. خروجی این بخش ورودی بخش چارت تلرانسی است. در بخش چارت تلرانسی، تلرانس‌های هر عملیات به گونه‌ای مشخص می‌شود که ضمن دستیابی به تلرانس هدف برای قطعه‌ی نهایی، تلرانس‌های عملیات‌های میانی نیز مشخص شده و هزینه‌ی تولید حداقل باشد.

### ۳- ساختار سیستم کامپیوتری

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبلی، در این مقاله نرم‌افزاری معرفی می‌شود که به کمک آن ترتیب عملیات و چارت تلرانسی تعیین می‌شود. در این نرم‌افزار توالی عملیات تولید یک قطعه تراشکاری به‌صورت اتوماتیک مشخص شده و سپس محدوده تلرانس مجاز در هر عملیات برای دست‌یابی به تلرانس نهایی بر اساس کم‌ترین هزینه تولید تعیین می‌شود. ساختار این نرم‌افزار در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم براساس مدل‌سازی در محیط سالیدورکس بوده و با گرفتن اطلاعات لازم از قطعه کار، توالی عملیت تولیدی برای قطعات تراشکاری مشخص شده و سپس وارد بخش چارت تلرانسی شده که در این بخش ابتدا زنجیره تلرانسی شناسایی شده و سپس براساس کاهش هزینه‌ی تولید بهینه‌سازی تلرانس‌ها انجام می‌شود.

### ۴- طراحی فرآیند تولید

طراحی فرآیند یعنی تعیین نحوه‌ی تبدیل ماده‌ی خام اولیه به محصول نهایی. به عنوان مثال برای یک قطعه تراشکاری در این رابطه بایستی تعداد مراحل انجام کار و نوع ماشین‌آلات مورد نیاز و پارامترهای ماشینکاری مشخص شود. طراحی فرآیند یکی از فعالیت‌های مهم سیستم تولید است که نقش عمده‌ای در تعیین هزینه‌ی تولید و کیفیت دارد.




شکل (۱): ساختار سیستم کامپیوتری

طراحی فرآیند در سیستم‌های سنتی توسط افراد باتجربه و آشنا به روش‌های ساخت و قابلیت‌های تولیدی انجام می‌گیرد. در حال حاضر با ساده‌ترین سیستم طراحی فرآیند کامپیوتری (CAPP[۱۳])۲۰ تا ۳۰ درصد کارآیی طراحی فرآیند قابل افزایش می‌باشد [۳]. علت این امر اجتناب از تکرار بعضی از پروسه‌های تکراری طراحی فرآیند می‌باشد. سیستم‌های طراحی فرآیند کامپیوتری (CAPP) به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از طراحی فرآیند فراخوان و طراحی فرآیند مولد.

در طراحی فرآیند مولد، قطعه برای کامپیوتر توصیف می‌شود و کامپیوتر با استفاده از منطق‌های تولیدی تدوین شده، فرآیند تولید مناسب را مشخص می‌نماید. در این سیستم نرم‌افزاری از روش مولد برای تعیین مراحل تراشکاری یک قطعه استفاده می‌شود. الگوریتم تعیین مراحل تراشکاری دارای ۱۳ مرحله است که در ادامه بیان می‌شود [۱].

مرحله۱: صافی سطح مورد نظر و جنس قطعه را کاربر مشخص می‌کند سپس به کمک رابطه زیر حداکثر عمق براده‌برداری ممکن محاسبه می‌شود.

$$a_{s\max} = \frac{32\,R_a}{BHN^{\,0.8}}$$

که در این رابطه BHN سختی قطعه کار برحسب برینل است.

مرحله ۲: مقدار براده‌برداری کل ($a_n$)محاسبه می‌شود وبا حداکثر عمق براده‌برداری مقایسه می‌شود. اگر مقدار آن از حداکثر مقدار براده‌برداری بیش‌تر بود به مرحله‌ی ۱۰ رفته در غیر این صورت به مرحله‌ی ۳ باید رفت.

$$a_n = initialradius - finalradius$$

مرحله ۳: مقدار $a_{sm}$ محاسبه می‌شود که: $a_{sm} = a_{s\max} - a_{a\min}$. در این رابطه $a_{s\min}$ حداقل عمق برش است که به‌منظور تصحیح عملیات قبلی باید برداشته شود.

مرحله۴: مقدار عمق برش برای مرحله‌ی قبل از $a_{sm}$ بر اساس جداول موجود در بانک اطلاعاتی (رک مرجع [۱۱]) محاسبه می‌شود. اگر مقدار آن بیش از ۱.۳۳ مقدار برش مجاز با حداکثر پیشروی ($a_{c\min}$) باشد. آن‌گاه آن را معادل مقدار

[۴] Computer Aided Process planning (CAPP)

$a_{sm}=1.33a_{c\min}$قرار داده می‌شود. که $a_{c\min}$ بر اساس نیروهای ماشینکاری مجاز وارد قلم محاسبه می‌شود.

مرحله۵: مقدار Pg محاسبه می‌شود.

$$Pg=a_n-a_{s\max}$$

مرحله ۶: اگر مقدار Pg بزرگ‌تر از $a_{sm}$ باشد به مرحله‌ی ۷ رفته در غیر این صورت به مرحله‌ی ۱۱ باید رفت.

مرحله ۷: مقدار $B_i$را محاسبه شود. این عدد تعداد مراحل خشن‌کاری را مشخص می‌کند. برای ماشینکاری حداقل سه مرحله‌ی خشن‌کاری، نیمه خشن و پرداخت لازم است. البته بایستی این عدد را به سمت عدد بزرگ‌تر رند نمود.

$$B=\frac{a_n-a_s}{1.33a_{c\min}}$$

مرحله۸: عمق برش مورد نیاز محاسبه می‌شود.

$$a_p=(a_n-a_s)/B_i$$

مرحله۹: اگر عمق برش از $a_{c\min}$ بزرگتر باشد به مرحله‌ی ۱۳ و در غیر این‌صورت به مرحله‌ی ۱۲ باید رفت.

مرحله۱۰: قراردهید: $a=a_n$ . اگر $a_n>a_{s\min}$ قطعه قابل تولید نیست.

مرحله۱۱: در این حالت عملیات برش دو مرحله دارد یک مرحله خشن‌کاری و یک مرحله پرداختکاری. که:

$a_{finish}\approx a_{a\min}, a_{rough}=a_n-a_{finish}$ و تعیین عملیات خاتمه می‌یابد.

مرحله۱۲: در حالتی که چندین مرحله خشن‌کاری باید انجام شود. آن‌گاه برای تمام مراحل خشن‌کاری به‌جز مرحله‌ی آخر خشن‌کاری میزان عمق برش برابر $a_{c\min}$ وبرای آخرین مرحله برش $a_{rough}=a_n-1.33$. در تمام این مراحل از حداکثر پیشروی دستگاه بایداستفاده شود.

میزان عمق برش برای عملیات نیمه پرداخت ۱ م م و برای حالت پرداخت نهایی تراشکاری عمق برش برابر ۰.۳۷ م م انتخاب می‌شود. پایان الگوریتم.

مرحله ۱۳: میزان عمق برش در هر مرحله خشن‌کاری $B_i-1$ برابر $a_p$ انتخاب شده و $Pg=a_n-B_i x a_p-a_{s\max}$ آن‌گاه به مرحله ۱۱ باید رفت.

همان‌گونه که در الگوریتم مشخص است در این الگوریتم به خوبی کیفیت سطح نهایی قطعه، جنس قطعه کار، پارامترهای ماشینکاری مد نظر قرار گرفته و لذا این الگوریتم از جمله الگوریتم‌های مناسب برای ماشینکاری است. در این نرم‌افزار قطعات تراشکاری به دو دسته تقسیم شده و برای قطعات یک طرفه الگوریتم به راحتی اعمال شده اما برای قطعات دو طرفه (هر دو طرف قطعه ماشینکاری می‌شود.) ابتدا سمت راست بررسی شده و سپس سمت چپ قطعه تحلیل می‌شود.

## ۵- تدوین چارت تلرانسی به کمک کامپیوتر

چارت تلرانسی به عنوان ابزاری برای نمایش توالی تولید، تحلیل و چک انباشت تلرانس‌های تولید و محاسبه ابعاد فرآیند تولید است. با استفاده از چارت تلرانسی، تلرانس‌های مورد نیاز در هر مرحله از تولید مشخص شده و از تلرانس‌های بسیار بسته که سبب افزایش هزینه‌ها می‌شوند پرهیز می‌شود. تدوین چارت تلرانسی متناسب با نوع قطعه بین چند ساعت تا چند روز ممکن است طول بکشد. برای انجام عملیات تلرانس چارتینگ، ابتدا بایستی ابتدا زنجیره تلرانسی شناسایی شده، تلرانس‌های تولید بهینه توزیع شده و تلرانس‌های هندسی به تلرانس ابعادی تبدیل شود.

### ۵-۱- شناسایی زنجیره‌ی تلرانسی به کمک کامپیوتر

در شناسایی زنجیره‌ی تلرانسی روش چارت مارپیچ و روش سطح- زنجیره مهم‌تر از بقیه‌ی روش‌ها هستند [۱۱و۱۲]. به هر حال برتری هرکدام از این روش‌ها نسبت به دیگری در سازگاری‌شان با برنامه‌های کامپیوتری بوده ونتایج نهایی همه‌ی روش‌ها با هم برابر است. در این تحقیق از روش سطح- زنجیره استفاده شده است.

اساس روش سطح- زنجیره بر دنبال کردن سطوح با هر عملیات ماشینکاری انجام شونده روی آن استوار است. ابتدا رابطه‌ای بین ابعاد طراحی و سطوح قطعه برقرار می‌شود. سپس تغییراتی که برروی سطح قطعه در اثر ماشینکاری اعمال می‌شود دنبال شده و رابطه‌ای بین عملیات ماشینکاری و سطوح قطعه پیدا می‌شود. در نهایت ۲ رابطه‌ی خاص با هم ترکیب شده، رابطه‌ای پارامتری بین عملیات ماشینکاری و ابعاد طراحی که همان زنجیره تلرانسی است حاصل می‌شود. این روش دارای سه مرحله است که عبارتند از:

مرحله ۱- ابتدا سطوح درگیر در عملیات و $T_{iMin} \le T_i \le T_{iMax}$ تلرانسی باید مشخص شوند و موقعیت ابتدایی‌شان به‌دست آید.

مرحله۲- با استفاده از موقعیت سطوح حاصل، تغییرات سطح قطعه در هر بار ماشینکاری دنبال می‌شود. مشخصا سطوح ماشینکاری‌شونده در هر عملیات تغییر موقعیت داده و در بقیه سطوح هیچ تغییری حاصل نمی‌شود.

مرحله ۳- معادله پارامتریک بعد کاری که برابر با مقدار مطلق فاصله بین سطح ماشینکاری و سطح مبنا است باید نوشته شود. بدین منظور بدون توجه به مبنا بودن یا ماشینکاری بودن، سطوح نزدیکتر به محور مختصات از سطح دورتر کم می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که مقدار حاصل مقدار مثبتی است.

با توجه به این‌که تشریح کامل این روش از حوصله این نوشتار خارج است، برای مطالعه‌ی این روش به مرجع [۱۱] مراجعه نمایید.

### ۵-۲- توزیع بهینه‌ی تلرانس‌های تولید

هزینه‌ی تولید و ماشینکاری از مهم‌ترین نکاتی است که بایستی مد نظر طراحان فرآیند و سیستم‌های کامپیوتری در تولید قرار گیرد. در مرحله‌ی تعیین ترتیب عملیات در این نرم‌افزار اساس کار بر مبنای کاهش زمان تولید و افزایش نرخ براده‌برداری است لذا در اکثر موارد سعی می‌شود ماشینکاری با حداکثر توان ماشین یعنی حداکثر عمق ممکن یا حداکثر نرخ پیشروی انجام شود. این متد گرچه مفید است است، اما کافی نیست. از جمله مسائلی که سبب می‌شود هزینه‌ی تولید افزایش یابد استفاده از تلرانس‌های بسته در تولید است.

پس از شناسایی زنجیره‌ی تلرانسی باید تلرانس‌های تولید به‌صورت بهینه توزیع شوند. معیار توزیع بهینه‌ی حداکثر شدن تلرانس‌های تولید توزیع شده است. روش کلی توزیع تلرانس‌های تولید، حداقل نمودن یک تابع هدف است که این تابع بر حسب تلرانس‌های تولید است. در این رابطه قیود زنجیره تلرانسی و قیود توانایی فرآیند باید مورد توجه قرار گیرند. فرمولاسیون مساله به‌صورت زیر است:

در این روابط C هزینه‌ی کل تولید قطعه، هزینه Ci عملیات ماشینکاری i و wi فاکتور وزنی نسبی هر عملیات ماشینکاری با توجه به هزینه‌ی آن نسبت به سایر عملیات‌ها و n تعداد عملیات ماشینکاری است. رابطه‌ی دوم قید زنجیره تلرانسی را که در بخش قبل نحوه‌ی شناسایی آن بیان شد را بر فرآیند حداکثر نمودن تلرانس‌ها اعمال می‌کند و TBj در آن تلرانس بعد طراحی شماره j و Ti تلرانس عملیات ماشینکاری شماره I می‌باشند. λi ضریب انتخاب تلرانس بوده که اگر عملیاتی در ساخت بعد طراحی j درگیر بوده مقدار λ برابر یک و در غیر این‌صورت مقدار آن صفر است. k تعداد ابعاد کاری قطعه است. فرمول سوم نیز قید توانایی فرآیند را در بهینه‌سازی بیان نموده و در آن TiMin حداقل محدوده تلرانسی و TiMax حداکثر محدوده تلرانسی است که فرآیند قادر به تولید است.

محققین بسیاری سعی در تعیین دقیق توابع و مدل هزینه- تلرانس داشته‌اند از جمله: اسپکارت، اسپاتس، ساترلند، مایکل و دانگ[۱۳]. اکثر روابط براساس داده‌های تجربی برای یک کاربرد خاص لحاظ می‌شوند. در این مقاله از مدل ساترلند استفاده می‌شود که به‌صورت ذیل است: $C = A + \frac{B}{T^k}$

که برای عملیات تراشکاری ضرایب آن در جدول ۱ ارائه شده است.

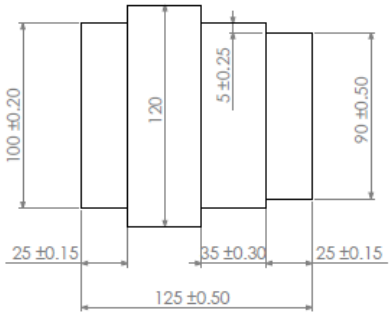
*subject to*

جدول (۱): ضرایب مورد استفاده در تابع هزینه برای فرآیند تراشکاری [۱۴]

| محدوده ابعادی (mm) | B | K | حداقل تلرانس (mm) | حداکثر تلرانس (mm) |
|---|---|---|---|---|
| ۱۷.۹۹-۳ | ۱/۷۰۶۸ | ۰/۴۵۸۸۵۷ | ۰/۰۲ | ۰/۰۸ |
| ۲۹.۹۹-۱۸ | ۱/۸۳۵۰ | ۰/۴۶۱۹ | ۰/۰۳ | ۰/۱ |
| ۷۹.۹۹-۳۰ | ۲/۱۵۰۹ | ۰/۴۶۳۸۶۹ | ۰/۰۴ | ۰/۱۵ |
| ۱۱۹.۹-۸۰ | ۲/۳۱۴۵ | ۰/۴۶۳۰۷ | ۰/۰۵ | ۰/۲ |
| ۱۷۹.۹۹-۱۲۰ | ۲/۴۶۵۴ | ۰/۴۶۳۲۲۵ | ۰/۰۶ | ۰/۲۵ |

## ۳- ارزیابی نرم‌افزار طراحی شده

برای ارزیابی الگوریتم‌ها و نرم‌افزار تهیه شده چند نمونه از قطعات تراشکاری مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه یکی از این قطعات ارائه می‌شود (شکل۲). این قطعه از جنس فولاد با سختی ۲۰۰ BHN است که قطر اولیه‌ی آن ۶۵ میلی‌متر است.




شکل (۲): قطعه کار مورد نظر

### ۳-۱- طراحی فرآیند

فرض می‌شود که ماشین‌ابزار تراش می‌تواند شرایط ماشینکاری زیر را اعمال نماید و تغییرشکل مجاز قطعه در اثر نیروهای وارده ۲۰٪ تلرانس نهایی است.

حداکثر عمق برش: ۸ میلی‌متر ، حداکثر پیشروی: ۰.۸ میلی‌متر بر دور، حداقل عمق برش : ۰.۲ میلی‌متر

با توجه به حداکثر تغییر فرم مجاز در قطعه (۲۰٪ تلرانس) میزان نیروی برش ماکزیممی که به قطعه می‌توان اعمال نمود، به کمک رابطه زیر [۱۵] محاسبه می‌شود.

$$F = \frac{3EI\delta}{L^3}$$

مقدار این نیرو در حالت خشن‌کاری معادل ۱۳۲۶۰ نیوتن و برای حالت پرداختکاری معادل ۲۱۲۰ نیوتن است. با توجه به این‌که نیروی مخصوص برش برای فولاد تقریباً ۲۲۰ است بنابراین با توجه به رابطه زیر داریم [۱]:

$$a_{c\min} = F/220^{*}\ feed^{0.75}$$

$$a_{c\min}\ (rough\ ) = 7.12\ mm$$

$$a_{c\min}\ (\ finish\ ) = 1.14\ mm$$

با انجام این محاسبات اولیه نرم‌افزار وارد الگوریتم محاسبه مراحل تراشکاری می‌شود (در این نوشتار فقط جواب نهایی ارائه می‌شود.). فرض می‌شود ابتدا مراحل خشن‌کاری و نیمه پرداخت انجام شده و در انتهای عملیات تراشکاری فرآیند پرداخت بر روی پله‌های قطعه انجام می‌شود.

برای ایجاد پله‌ی اول (قطر ۵۰ م م) نیاز به یک عملیات خشن‌کاری ویک عملیات نیمه پرداخت است و برای ایجاد پله‌ی دوم (قطر۴۵ م م) نیاز به یک عملیات خشن‌کاری یک عملیات نیمه پرداخت است و در نهایت یک عملیات پرداخت نهایی جداگانه برای هر دو پله. خروجی سیستم برای عملیات‌ها به شرح ذیل است (از کف‌تراشی اولیه‌ی قطعه صرف‌نظر می‌شود).

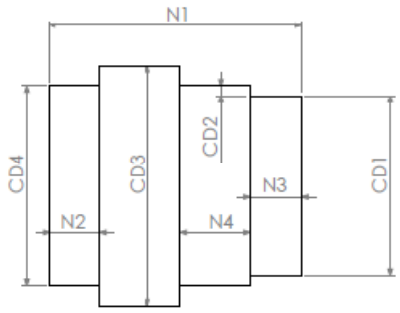
Op1: depth of cut: 6.13 mm, feed rate= feed max=0.8mm/rev.
Op2: depth of cut: 1mm, semi finishing
Op3: depth of cut: 1.5mm, feed rate= feed max
Op4: depth of cut: 1 mm, semi finishing
Op5: depth of cut: 0.37 mm, finishing operation for 50 dim.
Op6: depth of cut: 0.37 mm, finishing operation for 45 dim.

پس از تعیین عملیات‌های لازم برای تولید قطعه، محدوده تلرانس مجاز برای هر عملیات (تلرانس چارتینگ) مشخص می‌شود. در مرحله طراحی فرآیند مشخص شد که قطر ماده‌ی

خام در طی عملیات مختلف به‌صورت زیر تغییر نموده تا به قطر نهایی می‌رسد. ۶۵-۵۲.۷۴-۵۰.۷۴-۴۷.۷۴-۴۵.۷۴-۴۵و ۵۰ میلی‌متر برای ایجاد پله سمت دیگر قطعه کار بایستی باز شده وبا فرض این‌که سه نظام دستگاه قطعه را از پله ۵۰م م مهار کند، سپس طول قطعه سایز شده و سه عملیات تراشکاری (خشن‌کاری - نیمه پرداخت و پرداخت) نیزلازم است.

### ۳-۲- طراحی چارت تلرانسی

با توجه به الگوریتم سطح- زنجیره و ترتیب انجام فرآیند تراشکاری، پس از انجام مراحل سه گانه الگوریتم سطح- زنجیره نتایج زیر حاصل می‌شود. شکل۳ ابعاد طراحی را نشان می‌دهد.




شکل (۳): نمایش ابعاد پامتریک قطعه

Tol(CD1)=Tol(op1+op2+op3+op4+op5)
Tol(CD2)= Tol(op1+op2+op6)
Tol(CD3)=Tol( raw material)
Tol(CD4)=Tol(op8+op9+op10)
Tol(N1)=Tol(N3+N4+op7)
Tol(N2)=Max(tol(op8,op9,op10))
Tol(N3)=Max(tol(op3,op4,op5))
Tol(N4)= Max(tol(op3,op4,op5))+
Max(tol(op1,op2,op6))

### ۳-۳-بهینه‌سازی تلرانس‌ها:

برای حل مساله‌ی بهینه‌سازی چندمتغیره‌ی فوق بر اساس مدل ساترلند از نرم‌افزار MATLAB کمک گرفته شد و برنامه‌ای نوشته شده است که می‌تواند مسائل بهینه‌سازی فوق را تحلیل نماید. ورودی این بخش محدوده تلرانس‌های قابل قبول برای عملیات‌های ماشینکاری(خشن‌کاری-نیمه پرداخت-پرداخت) است. این مقادیر بستگی به نوع ماشین‌ابزار و قطعه کار دارد و توسط کاربر مشخص می‌شود. برای تلرانس‌های مجاز این مساله مقادیر زیر در نظر گرفته شده است:

۰.۱≥ خشن‌کاری ≥۰.۲

۰.۰۵≥ نیمه پرداخت‌کاری ≥۰.۱

۰.۰۲≥ پرداخت‌کاری ≥۰.۰۵

با اجرای برنامه بهینه‌سازی، تلرانس‌های قابل قبول هر یک از عملیات‌های تراشکاری به‌صورت ذیل حاصل شد:

Op1=0.15
Op2=0.08
Op3=0.15
Op4=0.08
Op5=0.02
Op6=0.02
Op7=0.05
Op8=0.1
Op9=0.05
Op10=0.02,

بنابراین تلرانس نهایی حاصل برای هر بعد طراحی را با نتایج نرم‌افزار مقایسه می‌شود. این مقایسه نشان می‌دهد که روش در نظر گرفته شده و محدوده تلرانس مجاز هر عملیات سبب تولید قطعه نهایی با دقت مورد نظر خواهد شد و انباشت تلرانس‌ها مشکلی ایجاد نمی‌کند.

Tol (CD1)=0.
5≤0.15+0.08+0.15+0.08+0.02=0.48
Tol(CD2)=0.25≤0.15+0.08+0.02=0.25
Tol(CD3)= Raw material
Tol(CD4)=0.2≤0.1+0.05+0.02=0.17
Tol(N1)=0.5≤0.3+0.15+0.05=0.5
Tol(N2)=0.15≤0.1
Tol(N3)=0.15≤0.15
Tol(N4)=0.3≤0.15+0.15=0.3

### ۴- نتیجه‌گیری

تراشکاری یکی از روش‌های رایج برای تولید قطعات صنعتی است که معمولا برای تولید یک قطعه چندین مرحله عملیات ماشینکاری لازم است. از جمله نکات مهمی که بایستی مورد توجه قرار گیرد انتخاب ترتیب انجام عملیات تراشکاری و پارامترهای موثر نظیر عمق برش است. هر مرحله تراشکاری دارای یک تلرانس است، به‌طوری‌که در انتها تلرانس‌های تمامی مراحل با یکدیگر جمع شده و ممکن است تلرانس نهایی

حاصله بیش از تلرانس مجاز اعلام شده (بر روی نقشه) باشد. برای پیش‌گیری از انباشت تلرانس‌ها و کاهش ضایعات تولید لازم است تلرانس مجاز هر مرحله مشخص شود. استفاده از سیستم‌های نرم‌افزاری ضمن افزایش سرعت و دقت نقش چشم‌گیری در کاهش هزینه‌ها خواهند داشت. در این مقاله نرم‌افزاری جهت تعیین مراحل تراشکاری و تلرانس مجاز هر عملیات (چارت تلرانسی) تدوین شده است که کارآیی آن توسط یک مثال تشریح گردید. در این سیستم ترتیب عملیات تراشکاری بر اساس الگوریتم خاصی تعیین شده و چارت تلرانسی نیز بر اساس مدل سطح زنجیره و مدل هزینه ساترلند تلرانس‌ها را مشخص می‌کند. با وجود مزایای مختلف این سیستم نظیر دقت و سرعت قابل قبول نقایصی نیز در سیستم وجود دارد که بایستی در تحقیقات آتی اصلاح شوند. از جمله: این سیستم برای قطعات ریخته‌گری و فورج نمی‌تواند ترتیب عملیات را مشخص کند. عملیات پیشانی‌تراشی دستی اعمال می‌شود. داده‌های مورد نیاز برای بهینه‌سازی باید دستی اعمال شود. قطعات تراشکاری که دارای سوراخ داخلی باشند را پوشش نمی‌دهد. این سیستم نیمه اتوماتیک طراحی فرآیند و چارت تلرانسی از جمله نخستین سیستم های CAD/CAM داخل کشور در رابطه با طراحی فرآیند و تلرانس چارتینگ است ونویسندگان در تلاشند درآینده نواقص موجود را رفع نمایند.

## ۵. مراجع


[1] Gideon H., Process and Operation planning, Kluwer Academic Publishers, London ,2003

[2] Whyberw, K., G. A. Britton, Tolerance Analysis in Manufacturing and Tolerance Charting, Advanced Tolerancing Techniques, John Wiley and Sons Inc., pp. 13-42, 1997.

[۳] فارسی، م.ع.، رحیمی, ع.،" طراحی فرآیند تولید قطعات ورقی به کمک کامپیوتر" ، اولین کنفرانس شکل‌دهی فلزات انجمن مهندسی مکانیک ایران، دیماه ۱۳۸۵.

[4] Hong-Chao Z., Alting, L, "Computerized manufacturing Process Planning systems", Chapman & Hall, London, Uk, 1994

[5] David D. Bedworth, M. R. Henderson, and Philip M. Wolfe, "Computer Integrated Design and Manufacturing", McGraw-Hill, 1991

[6] Bjork, Φ., Computer Aided Tolerancing, Edition 2. ASME Press, Newyork,USA, 1989

[7] Whyberw, K., Britton, G. A., CATCH: Computer Aided Tolerance Charting, Advanced Tolerancing Techniques, John Wiley and Sons Inc., pp. 461-491, 1997.

[8] Yeo, S.H., Ngoi, B.K.A., Chen, H., Process Sequence optimization based on a new cost-tolerance model, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 9, pp. 29-37, 1998.

[9] Wang, P., Liang, M., Simultaneously solving process selection, Machining parameter optimization and tolerance design problems: A Bi-Criterion Approach, Journal of manufacturing science and engineering, vol.127, pp. 533-544, 2005.

[۱۰] لاسمی، ع، تدوین چارت تلرانسی به کمک کامپیوتر برای قطعات ماشینکاری، پایان نامه کارشناسی ارشد, دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۵

[11] Xue, J. "Identifying Tolerance chains with a surface chain model in tolerance charting, Journal of Material processing technology", vol.123, pp. 93-99, 2002.

[12] Ngoi, B. K. A., Tan, C. S., Graphical Approach to tolerance charting: A Maze Chart Method, Int. Journal of advanced Manufacturing Technology, Vol.13, pp. 282-289,1997.

[13] Dong, Z., Tolerance Synthesis by Manufacturing Cost Modeling and Design optimization, Advanced Toleranceing techniques, John Wiley and Sons inc., pp. 233-260, 1997.

[14] Kumaravel, P. Cost optimization of process tolerance allocation a tree based approach, Int. Journal of advanced Manufacturing Technology, Vol.30, DoI 10.1007/s00170-006-0641-0,2006

[۱۵] شاکری، م. مقاومت مصالح جلد دوم. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۱۳۸۶