ارائه یک مدل تلرانس دهی قطعات بمنظور کاهش هزینه های تولید و زیان کیفیت

پرویز فتاحی[1,*]، دکتر محمد سعیدی مهرآباد[2]، مهرداد حمیدی[3]
همدان ، دانشگاه بوعلی سینا ، گروه مهندسی صنایع
Responder Author E-mail: fattahi@basu .ac.ir

چکیده
تلرانس دهی بمنظور تنظیم حدود کنترل برای مشخصه های قطعات مورد استفاده قرار می گیرد. تلرانس با هزینه رابطه معکوس دارد. هرچقدر تلرانس قطعات در یک مجموعه کوچک تر باشد به علت نیاز به تکنولوژی پیشرفته تر یا قطعات نامنطبق بیشتر ، هزینه تولید آن قطعات افزایش می یابد. براساس نقطه نظر کنترل کیفیت پیشرفته تاگوچی، تلرانس ها باید براساس یک تبادل بین هزینه و زیان تولید تعیین گردند. در اینصورت در هنگام طراحی تلرانس ما با دو هزینه مواجه هستیم که علاقمند به کاهش همزمان آنها هستیم. همچنین با توجه به محدودیت ناشی از مشخصات فنی و کیفی مجموعه نمیتوان تلرانس تمامی قطعات مجموعه را افزایش داد. با داشتن مشخصات یک مجموعه (شامل مشخصات کیفی ، ابعاد ، موقعیت و . . .) گزینه های مختلفی برای تلرانس دهی قطعات مجموعه وجود دارد که مشخصات مجموعه را نیز رعایت کنند. تفاوت بین این گزینه ها در هزینه تولید و هزینه زیان کیفیت آنها است. در روش تلرانس دهی آماری تلرانس قطعات به روش آماری تعیین می گردد. با توجه به استقلال قطعات ، تلرانس مجموعه از تلرانس قطعات با توجه به رابطه بین آنها به روش آماری بدست می آید. تلرانس قطعات به نحوی تنظیم می گردد که تلرانس مجموعه ناشی از قطعات مشخصات مجموعه را بپوشاند. در این مقاله ما بعد از بررسی روشهای مختلف تلرانس دهی و طراحی تلرانس ، با استفاده از تکنیک SA ، روشی را برای دستیابی به بهترین گزینه تلرانس قطعات یک مجموعه که دارای حداقل هزینه تولید و زیان کیفیت با رعایت محدودیت ها باشد را ارائه می کنیم. نتایج عددی بدست آمده از تست های صورت گرفته نشان دهنده این است که الگوریتم پیشنهادی برای طراحی تلرانس قطعات بمنظور کاهش هزینه تولید کارا می باشد و از این الگوریتم می توان برای طراحی تلرانس قطعات پیچیده نیز استفاده کرد.

واژه های کلیدی : طراحی تلرانس، تلرانس دهی آماری ، بهینه سازی ، SA

---

[1] عضو هیات علمی ، مربی
* نگارنده مخاطب
[2] عضو هیات علمی ، دانشیار
[3] دانشجوی مهندسی صنایع

1. مقدمه

رقابتی شدن بازار تجارت جهانی ، منتوع شدن سلیقه مصرف کنندگان و اهمیت بالای کیفیت، تولیدکنندگان را واداشت تا در زمینه کاهش هزینه ها، بهبود بهره وری ، بهبود کیفیت بصورت پیشگیرانه و ارائه خدمات بیشتر به مشتری به جنگی تمام عیار با یکدیگر بپردازند. اهمیت هزینه های کیفیت تولید کنندگان را واداشت که قبل از تولید و در هنگام طراحی محصول و فرایند به کیفیت و هزینه های تولید توجه نمایند. تولیدات جدید معمولاً شامل اجزایی می باشند که می توانند با همدیگر مونتاژ شده و یک مجموعه را تشکیل دهند که عملکرد خود را مطابق با طراحی آن برعهده داشته باشند. در فاز ساخت یک سری از عملیات ها روی اجزاء انجام می شود که مشخصات هندسی، اندازه و مکان آنها را کنترل کند. تغییرات هم در فرایندها و مواد خام از قبیل تغییرات خصوصیات مواد، سایش ابزار ، خطای فیکسچر، خطای راه اندازی، دما، مهارت کارکنان و غیره منجر به این می شود که قطعات دقیقاً مثل هم تولید نشوند. این تغییرات که در نهایت موجب تغییرات در محصول می گردد هم روی کیفیت محصول تاثیر منفی داشته و هم باعث افزایش هزینه تولید می گردد. بدیمنظور کاهش تغییرات اجزاء تشکیل دهنده محصول حائز اهمیت است. یک از منابع این تغییرات، متغیرهای ابعادی از قبیل جابجایی قطعات از ابعاد مورد نیاز و هندسه ابعاد می باشد. در این زمینه، تلرانسها برای کنترل اندازه، موقعیت و هندسه ابعاد بمنظور اطمینان از اینکه قطعات و مجموعه های مونتاژ شده عملکرد مورد نیاز را برآورده کند، تعیین می گردند.

تلرانس قطعات در یک مجموعه محصول نقش بالایی در میزان هزینه و کیفیت تولیدات خواهد داشت. ادبیات مطرح شده در این موضوع به دهه 1950 بر می گردد[1و2]. مفهوم کلی طراحی تلرانس را در چندین کتاب می توان یافت [3-5]. تعیین تلرانس برای قطعات دارای محدودیت های فنی می باشد که مربوطه به شرایط قطعه و مجموعه بوده و یا توسط متخصصین طراح تعیین می گردد. برای قطعات یک مجموعه تلرانسهای متفاوتی می توان تعیین کرد اما بهترین تلرانس اختصاص داده شده تلرانسی است که محدودیت ها را رعایت نموده و کمترین هزینه را بدنبال داشته باشد.

در خیلی از تحقیق ها در هنگام طراحی تلرانس، تنها کاهش هزینه های تولید بعنوان هدف در نظر گرفته شده است. Shan و Roth [6] روشی را برای تلرانس دهی آماری با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه کرده اند. در روش آنها هدف کاهش هزینه های تولید می باشد. آنها رفتار قطعات را بصورت آماری در نظر گرفتند و مدلی ارائه کردند که براساس آن تلرانس های اجزاء بمنظور کاهش هزینه های تولید با توجه به محدودیت های فنی مجموعه تخصیص داده می شد.

هزینه دیگری که با تلرانس ارتباط دارد هزینه زیان کیفیت[4] می باشد. براساس نقطه نظر کنترل کیفیت پیشرفته، تاگوچی پیشنهاد کرد که تلرانس ها باید براساس یک تبادل بین هزینه و زیان تولید تعیین گردند[7و8]. این مساله در مدل ارائه شده توسط Wu ، Chen و Tang [9] در نظر گرفته شده است. آنها مدلی را برای حداقل سازی همزمان هزینه تولید و زیان کیفیت در هنگام طراحی تلرانس ارائه کردند. مدل ارائه شده توسط آنان یک مدل ریاضی می باشد. در مدل آنها حالت سه بعدی و وجود چندین تلرانس برای یک جزء در نظر گرفته نشده است.

طراحی تلرانس در حالت سه بعدی و زمانی که یک جزء دارای چندین تلرانس باشد در ادبیات فوق در نظر گرفته نشده است که ما در این تحقیق قصد بررسی آن را داریم. همچنین در مسائل واقعی زمانی که تعداد اجزاء و پیچیدگی مساله افزایش می یابد استفاده از مدلهای قطعی بسیار سخت و حتی غیر ممکن می باشد. بدینمنظور در این تحقیق ما با استفاده از تکنیک SA الگوریتمی را برای طراحی تلرانس با هدف حداقل سازی همزمان هزینه تولید و زیان کیفیت ارائه می کنیم. این الگوریتم توانایی پذیرش حالت های پیچیده را نیز دارد. ساختار این مقاله به اینصورت است: در بخش 2 روشهای مختلف طراحی تلرانس مورد بحث قرار می گیرد. در بخش 3 هزینه های مختلف و ارتباط آنها با تلرانس مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش 4 مدلسازی مساله ارائه می گردد و در بخش 5 این مدل به حالت سه بعدی تعمیم داده می شود. در بخش 6 الگوریتم مبتنی بر SA برای حل مدل ارائه می شود. در بخش 7 این الگوریتم برای یک مثال کاربردی مورد استفاده قرار گرفته و در بخش 8 نتیجه گیری ارائه می گردد.

2. روشهای طراحی تلرانس

[4] Quality loss function

تلرانس های قطعه جزء مشخصات فنی قطعه بوده که در هنگام طراحی تعیین می گردد. مطالعه رفتار تجمعی از یک سری از متغیرهای تکی برای تعیین تلرانس، تحلیل تلرانس[5] نامیده می شود[10]. در تحلیل تلرانس که اثر تجمعی متغیرهای ابعادی روی کل مجموعه مطالعه می شود، مجموعه و عملکرد محصول در مقابل نیازمندیهای طراحی آن بررسی و تصدیق می گردد. اگر نیازمندیهای طراحی پوشانده نشود، طراح بعضی از تلرانس ها را مجدداً تخصیص داده و رویه طراحی را تکرار می کند. فرایند تصمیم گیری در ارتباط با اینکه کدام تلرانس باید تغییر یابد و چه مقدار باید تغییر یابد، توزیع تلرانس نامیده می شود. توزیع تلرانس ها در صورتی که نتایج تحلیل تلرانس در نظر گرفته شود، سنتز تلرانس[6] نامیده می شود[11]. تحلیل تلرانس و ترکیب تلرانس با همدیگر طراحی تلرانس را تشکیل می دهند.

دو تکنیک در طراحی تلرانس مورد استفاده قرار می گیرد: تلرانس دهی بدترین حالت[7] و تلرانس دهی آماری. در تلرانس دهی بدترین حالت، تمامی ابعاد مرتبط بصورتی در نظر گرفته می شود که بدترین وضعیت خود را داشته باشند. تلرانس ها تحت بدترین مقدار از یک عملکرد طرح تحت هر تغییرات ممکن ناشی از تلرانس ها تعیین می گردند. تکنیک بدترین حالت مجموعه و محصول نهایی را در ارتباط با اجزاء داخل محدوده تلرانس ضمانت می کند. این روش تلرانس دهی در مواقعی که ایمنی بسیار حائز اهمیت است و تلرانس های کوچک هزینه های بالایی را تولید می کنند مورد استفاده قرار می گیرد. در این موارد، تصمیمات روی تلرانسها برپایه بدترین شرایط مجموعه است که در عمل ممکن است اتفاق بیافتد.

در واقعیت احتمال اینکه بعد تولید شده در بدترین شرایط خود قرار گیرد بسیار کم است. برعکس اکثر ابعاد تولیدی نزدیک به مقدار میانگین خود تولید می شوند.[12]. علاوه براین، برای یک مجموعه کامل، احتمال اینکه تمامی ابعاد آن بصورت همزمان در بدترین حالت خود قرار گیرند بسیار کمتر خواهد شد. شاید این اتفاق یکبار در هر ملیون و حتی بیشترمجموعه رخ دهد. در اینجا یک تعادلی بین فاکتورهای اقتصادی و حالت بدبینانه را می توان درنظر گرفت. به علت اینکه ابعاد قطعات تولیدی متغیرهای تصادفی هستند، استفاده از فنون آماری در این زمینه مفید می باشد.

در نظر گرفتن رفتار تصادفی متغیرهای ابعاد تولید و استفاده از فنون آماری در هنگام تلرانس دهی منجر به تکنیک دیگری از تلرانس دهی می گردد که تلرانس دهی آماری نام دارد. در تلرانس دهی آماری، مقادیر ممکن برای یک بعد تکی از یک قطعه با منطقه ای که دارای بیشترین فرکانس ممکن از فرایند تولید است شرح داده می شود. با قبول اینکه کسر کوچکی از مجموعه مونتاژ نشوند یا عملکرد لازم را نداشته باشند، افزایش قابل توجهی برای تلرانس قطعات تکی بدست می آید و ممکن است هزینه های تولید به میزان معنی داری کاهش یابند. تحلیل تلرانس آماری احتمال اینکه محصول مونتاژ شود و عملکرد لازم را داشته باشد تحت تلرانس های تکی داده شده را محاسبه می کند و اغلب از روشهای آماری مثل روش مونت کارلو استفاده می کند. ارتباط بین تلرانس مجموعه و اجزاء به روش های بدبینانه و آماری در روابط (1) و (2) نمایش داده شده است.

(1)
$$t_r = \sum_i \left(\left| \frac{\partial G}{\partial X_i} \right| \times t_i \right)$$

(2)
$$t_r = \left(\sum_i \left(\left| \frac{\partial G}{\partial X_i} \right|^2 \times t_i^2 \right) \right)^{0.5}$$

3. تلرانس و هزینه

تعیین تلرانس دونوع هزینه بهمراه دارد: هزینه تولید و هزینه زیان کیفیت. ارتباط قوی بین هزینه تولید اجزاء و میزان دقت مورد نیاز آنها وجود دارد. هزینه تولید با تلرانس اجزاء رابطه عکس دارد. هرچقدر تلرانس محدودتر گردد هزینه تولید افزایش می یابد. این افزایش هزینه معمولاً ناشی از تنظیم بیشتر، عملیات با ماشین های دقیق تر، ابزارهای اندازه گیری و . . . می باشد. شکل 1 رابطه بین هزینه ساخت و

[5] Tolerance analysis
[6] Tolerance synthesis
[7] Worst-case method

تلرانس برای اجزاء را نشان می دهد. از آنجا که یک قطعه قابل ساخت توسط فرایندهای مختلف یـا توسـط پیمانکـاران مختلـف کـه دارای توانمندیهای متفاوت می باشند، ممکن است ما با مجموعه گسسته ای از تلرانس های قابل تخصیص به یک جزء قطعه مواجه باشیم. بـدین دلیل منحنی هزینه ساخت را می توان بصورت گسسته براساس شرایط تولید کننده در نظر گرفت. در بیشتر مواقع معمولا معادلات نمـایی و معکوس مطابق با روابط (3) و (4) را برای نشان دادن رابطه بین هزینه ساخت و تلرانس در نظر می گیرند[9].

$$C(t) = a_1 + a_2 \times e^{-a_3 t} \quad (3)$$

$$C(t) = a_1 + a_2 \times t^{-a_3} \quad (4)$$

که پارامترهای a_i ضرایب ثابت هستند.

اگر یک مجموعه شامل n عضو باشد و هریک از اعضاء دارای هزینه ساخت $C_i(t_i)$ باشند آنگاه می توان هزینـه سـاخت کـل مجموعـه M را بصورت زیر تخمین زد.

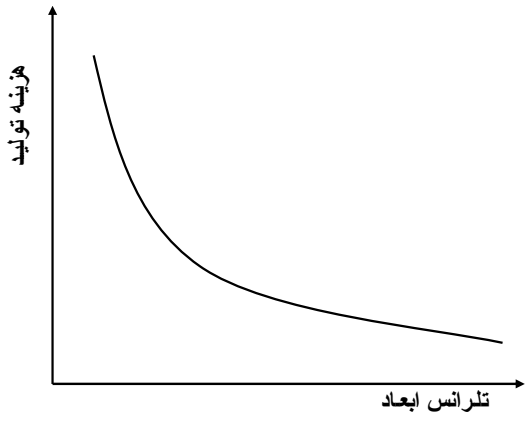
$$M = \sum_{i=1}^{n} C_i(t_i) \quad (5)$$

هزینه دیگری که با تلرانس ارتباط دارد هزینه زیان کیفیت[8] می باشد. براساس نقطه نظر کنترل کیفیت پیشرفته، تاگوچی پیشنهاد کـرد کـه تلرانس ها باید براساس یک تبادل بین هزینه و زیان تولید تعیین گردند[11و12]. یک تابع کوادراتیک در شکل 2 تخمینی از هزینه هـای زیان کیفیت را نشان می دهد. زیان اقتصادی می تواند بیشتر از صفر گردد اگر مشخصه عملکردی از ارزش هدف آن منحـرف گـردد. زیـان اقتصادی را می توان براساس تابع زیر معرفی کرد.

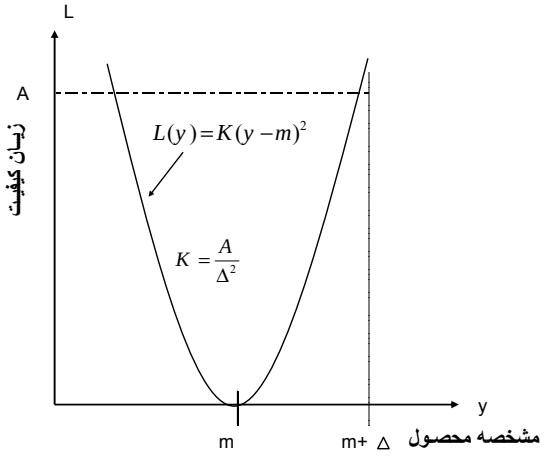
$$L(y) = K(y-m)^2 \quad (6)$$

$$K = \frac{A}{\Delta^2} \quad (7)$$

در این تابع $L(y)$ مقدار زیان اقتصادی ناشی از تغییرات y از مقدار هدف آن m می باشد.مقدار Δ نشان دهنده فاصله مقدار هدف m از حدود تعریف شده برای y می باشد و A یک ضریب ثابت برای معرفی هزینه می باشد. معادله (6) روشی را برای ارزیابی هزینه زیـان کیفیت محصولات تکی را مهیا می کند. این معادله در صورتی استفاده می گردد که هزینه محصول در صورت خروج از دو طـرف محـدوده تعریف شده یکسان باشد. در صورتی که یک محصول تابع زیان نامتقارنی داشته باشد نیاز است که در دوطرف مقدار هدف هزینه متفاوت در نظر گرفته شود. این حالت در شکل 3 نمایش داده شده است [13].



شکل1. رابطه بین تلرانس و هزینه



شکل2. تابع زیان تاگوچی

هزینه زیان کیفیت برای یک محصول در حالت متقارن درصورتی که توزیع احتمال محـصول بـا تـابع چگـالی F مـشخص شـده باشـد، براساس رابطه زیر تخمین زده می شود.

[8] Quality loss function

$$L = \int_{-\infty}^{\infty} F(y)K(y-m)^2 dy = Kz^2 \quad (8)$$

که z برابر انحراف معیار استاندارد بعد محصول با میانگین m می باشد. این انحراف معیار با تلرانس محصول ارتباط دارد. برای مثال در صورتی که محصول دارای توزیع نرمال باشد و و فاصله بین حدود تلرانس محصول 6 برابر انحراف معیار محصول باشد، احتمال مشاهده یک محصول خارج از تلرانس برابر 0/0027 می باشد. در این حالت رابطه (6) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$L = KAt_r^2 \quad (9)$$

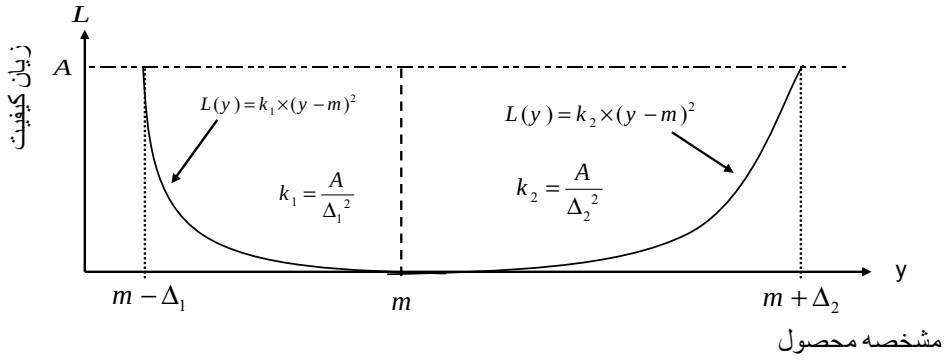
که A یک ضریب بوده که براساس نوع توزیع محصول و احتمال پذیرفته شده برای محصولات خارج از تلرانس تعیین می گردد t_r تلرانس مجموعه نهایی می باشد. در حالتی که تابع زیان کیفیت نامتقارن باشد روابط (6) و (7) بصورت زیر تعیین می گردند:

$$L = \int_{-\infty}^{m} F(y)K_1(y-m)^2 dy + \int_{m}^{\infty} F(y)K_2(y-m)^2 dy \quad (10)$$

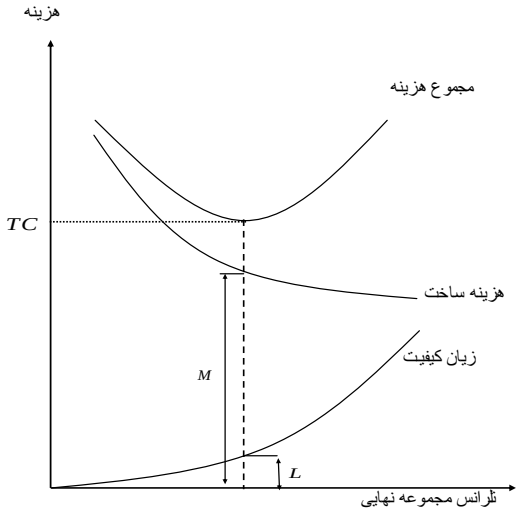
(11)

$$L = \frac{1}{2}(K_1 + K_2)At_r^2$$

در این تحقیق هر دو هزینه ساخت و زیان کیفیت در بهینه سازی تلرانس در نظر گرفته می شود. بدین منظور هزینه بصورت مجموع دو هزینه ساخت و زیان کیفیت همانطوری که در شکل 4 نمایش داده شده است در نظر گرفته می شود.



شکل 3. تابع زیان نامتقارن



شکل 4. مجموع هزینه در مقابل تلرانس

4.مدلسازی مساله

در هنگام طراحی تلرانس ما بدنبال تعیین تلرانس اجزاء یک مجموعه می باشیم به نحوی که نیازهای عملکردی محصول برآورده شده ، محدویت های فنی رعایت گردد و هزینه کل حداقل گردد. بنابراین مدل مساله بصورت زیر خواهد بود :

(12)

$$Min \quad TC = M + L$$

st :

$$t_r \le T_{allow} \tag{13}$$

$$t_{i_{\min}} \le t_i \le t_{i_{\max}} \quad for \quad i = 1,...,n \tag{14}$$

$$g(t_1, t_2, ..., t_n) = t_r \tag{15}$$

$$\psi(t_1, t_2, ..., t_n) \le 0 \tag{16}$$

در مدل فوق n نشاندهنده تعداد اجزاء مجموعه می باشد. رابطه (12) حداقل سازی مجموع هزینه می باشد که از روبط (5) و (9) یا (11) استفاده می کند. رابطه (13) حداکثر تلرانس مجاز برای بعدهای مجموعه را مشخص می کند. رابطه (14) حداقل و حداکثر تلرانس مجاز برای هر جزء را که از مشخصات فنی اجزاء و شرایط تولید بدست می آید را مشخص می کند. رابطه (15) ارتباط بین تلرانس های اجزاء و تلرانس مجموعه را نشان می دهد. رابطه (16) سایر محدویت های فنی ناشی از ارتباط بین تلرانس ها را مشخص می کند. این رابطه با توجه به شرایط محصول ممکن است به چندین رابطه مختلف تبدیل گردد. فضای قابل قبول t_i ها می توانند پیوسته یا گسسته براساس شرایط تولید تعیین گردد.

5. مدلسازی مساله در حالت سه بعدی

مدل بحث در بخش 4 یک مجموعه شامل n عضو را شنان می دهد که دارای یک بعد بوده و هر یک از اجزاء نیز دارای یک بعد می باشند. در اغلب محصولات مدل فوق صادق نمی باشد و معمولا مجموعه ها بصورت 3 بعدی می باشند. مجموعه دارای چند بعد و همچنین هریک از اجزاء آن نیز دارای چند بعد می باشد. ارتباط خطی بین ابعاد وجود نداشته و حتی تلرانس یک بعد از یک جزء روی چند بعد مجموعه اثر می گذارد. بمنظور در نظر گرفتن شرایط فوق ما فرض می کنیم که یک مجموعه دارای D بعد و n جزء می باشد. هر جزء دارای d_i بعد می باشد.در این حالت روابط (5) و (9) را بصورت زیر می توان اصلاح کرد :

$$M = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{d_i} C_{ij}(t_{ij}) \tag{17}$$

$$L = h(A_1 t_{r1}^2, A_2 t_{r2}^2, ..., A_D t_{rD}^2) \tag{18}$$

که در آن $C_{ij}(t_{ij})$ هزینه ساخت بعد j ام جزء i ام با در نظر گرفتن تلرانس t_{ij} برای آن می باشد. A_s ضریب هزینه برای بعد s ام محصول و t_{rs} تلرانس بعد s ام محصول و h تابعی است که هزینه های زیان کیفیت را با همدیگر جمع می کند می باشد.

با درنظر گرفتن موارد فوق می توان مدل طراحی تلرانس در حالت سه بعدی را بصورت زیر نوشت :

(19)

$$Min \quad TC = M + L$$

st :

$$t_{rs} \le T_{s,allow} \quad for \quad s = 1,...,D \tag{20}$$

$$t_{i,j_{\min}} \le t_{i,j} \le t_{i,j_{\max}} \quad for \quad i = 1,...,n \quad j = 1,...,d_i \tag{21}$$

$$g(t_{1,1}, t_{1,2}, ..., t_{1,d_1}, t_{2,1}, t_{2,2}, ..., t_{2,d_1}, ..., t_{n,1}, t_{n,2}, ..., t_{n,d_1}) = t_{r,s} \quad for \quad s = 1,...,D \tag{22}$$

$$\psi(t_{1,1}, t_{1,2}, ..., t_{1,d_1}, t_{2,1}, t_{2,2}, ..., t_{2,d_1}, ..., t_{n,1}, t_{n,2}, ..., t_{n,d_1}) \le 0 \tag{23}$$

در مدل فوق رابطه (19) حداقل سازی مجموع هزینه می باشد که از روبط (17) و (18) استفاده می کند. رابطه (20) حداکثر تلرانس مجاز برای بعدهای مجموعه را مشخص می کند. رابطه (21) حداقل و حداکثر تلرانس مجاز برای هر بعد از هر جزء را که از مشخصات فنی اجزاء و شرایط تولید بدست می آید را مشخص می کند. رابطه (22) ارتباط بین تلرانس های اجزاء و تلرانس های مجموعه را نشان می دهد. رابطه (23) سایر محدویت های فنی ناشی از ارتباط بین تلرانس ها را مشخص می کند. این رابطه با توجه به شرایط محصول ممکن است به چندین رابطه مختلف تبدیل گردد. فضای قابل قبول t_{ij} ها می توانند پیوسته یا گسسته براساس شرایط تولید تعیین گردد.

در مدل فوق روابط غیر خطی وجود داشته و برای مسائل واقعی حل آن با استفاده از روش های قطعی بسیار مشکل و حتی غیر ممکن می باشد. بدین دلیل در این تحقیق ما یک الگوریتم برای حل آن با استفاده از تکنیک Simulated Annealing ارائه می دهیم.

6. روش ابتکاری

الگوریتم Simulated Anneling (آنیلینگ شبیه سازی شده) یک روش تصادفی بوده که از مکانیزم آماری جهت یافتن جواب های مسائل بهینه سازی استفاده می کند [14]. اولین بار کرک پاتریک و همکارانش [14] این روش را پیشنهاد کردند و کاربرد تکنیک های شبیه سازی آماری را برای مسائل بهینه سازی محاسباتی نشان دادند. SA بر مبنای فرایند آنیلینگ شکل گرفته است. جستجوی جواب با استفاده از SA، با تولید یک جمعیت اولیه آغاز می شود و هر جواب بعنوان یک آرایش مولکولی با سطح انرژی برابر با مقدار تابع هدف برای رشته جواب متناظر در نظر گرفته می شود، سپس دمای اولیه الگوریتم با تابع از پیش تعریف شده ای کاهش داده شده و در هر دما چندین جمعیت تولید و سپس ارزیابی می شود. جواب های بهتر جایگزین جواب های قبلی شده و جوابهای بدتر در هر مرحله با احتمال $p(n)$ جایگزین رشته جواب جمعیت قبل می شوند. شانس جابجایی یک جواب خوب با یک جواب بدتر، خروج الگوریتم از جواب بهینه موضعی را تضمین می کند و از طرف دیگر کاهش احتمال جواب بدتر با کاهش دما، موجب تضمین همگرایی SA است[15]. به همین ترتیب الگوریتم ادامه می یابد تا شرایط مورد نظر حاصل گردد (مثلا دمای الگوریتم به زیر دمای حداقل تعریف شده برسد).

الگوریتم پیشنهادی برپایه SA برای یافتن تلرانس بهینه به شرح ذیل می باشد:

قدم 1 : انتخاب یک راه حل اولیه x_1 در مجموعه X

محاسبه مقدار تابع F برای x_1 و قرار دهید: $x^* \leftarrow x_1, \quad F^* \leftarrow F(x_1)$

قدم 2 : تکرار ، $n = 1, 2, \ldots$ و x_n راه حل جاری می باشد.

x را در همسایگی x_n ($V(x_n)$) بصورت تصادفی انتخاب کنید.

اگر $F(x) \le F(x_n)$ سپس $x_{n+1} \leftarrow x$

اگر $F(x)$ p $F(x_n)$ سپس $x^* \leftarrow x, \quad F^* \leftarrow F(x)$

در غیر اینصورت ($F(x)$ f $F(x_n)$) یک عدد تصادفی p بین $[0,1]$ انتخاب کنید

اگر $p \le p(n)$ سپس $x_{n+1} \leftarrow x$

قدم 3 : توقف ، اگر قاعده توقف برآورده شده است ، توقف کنید در غیر اینصورت به قدم 2 برگردید.

در الگوریتم فوق x_1 یک راه حل اولیه از تلرانسها می باشد که محدودیت های مدل را رعایت نموده باشد. $F(x)$ مقدار تابع هدف (هزینه کل) به ازاء x می باشد. x_n یک راه حل جاری در مرحله n ام می باشد و $V(x_n)$ یک مجموعه نشاندهنده همسایه های x_n می باشد. p یک عدد تصادفی می باشد که در زمان برخورد با جواب بدتر بمنظور بررسی پذیرش یا عدم پذیرش آن جواب بکار می رود (در روش SA جواب های بدتر بمنظور اجتناب از بهینه محلی با احتمال $p(n)$ پذیرفته می شوند). $p(n)$ احتمال پذیرش در مرحله n ام می باشد.

بمنظور عملیاتی شدن الگوریتم تصمیمات تاکتیکی زیر گرفته می شود:

الف) انتخاب احتمال پذیرش $p(n)$:

احتمال پذیرش مطابق با معادله زیر تعریف می گردد:

(24)

$$p(n) = \exp\left(-\frac{\Delta F_n}{T(n)}\right)$$

که $\Delta F_n = F(x) - F(x_n)$ و $T(n)$ دما در مرحله n ام می باشد.

ب) انتخاب دما در هر مرحله

برنامه دما یا برنامه انجماد باید به نحوی باشد که در جستجوی های اولیه احتمال پذیرش جواب های بدتر زیاد و در جستجو هـای انتهایی احتمال پذیرش جواب های بدتر کم گردد. در این حالت ابتدا با یک دمای T_0 شروع شده و بعد از هر L مرحلـه، دمـا بـا ضریب ثابتی ($0 < \alpha < 1$) کاهش می یابد. در نتیجه بعد از kL مرحله $T(kL) = \alpha^k T_0$ خواهد بود. در این رابطـه T_0 دمـای اولیه، α نرخ انجماد و L طول یک دوره کاهش دما می باشد.

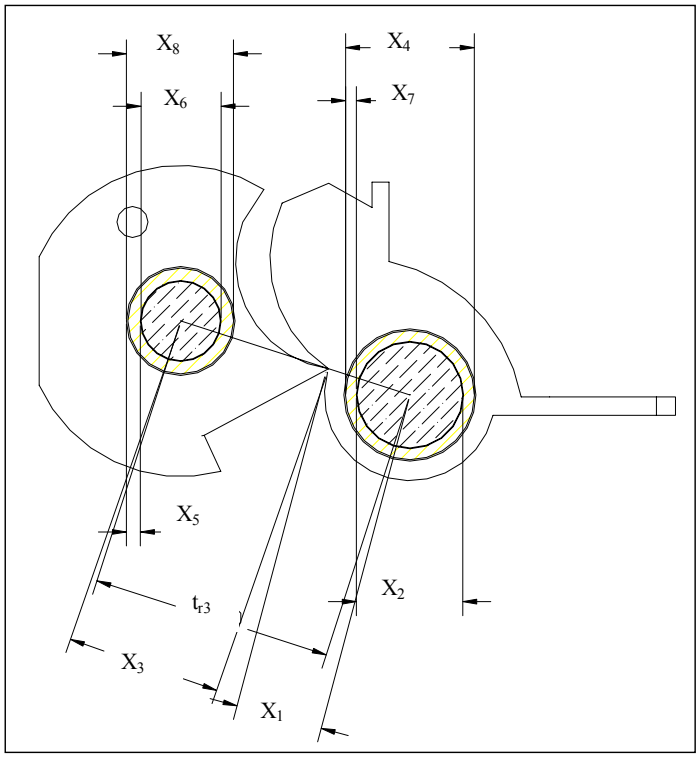
ج) انتخاب قاعده توقف

معمولا یکی از دو قاعده توقف زیر استفاده می گردد:

- اگر F^* حداقل با $\varepsilon_1\%$ از k_1 سری پی در پی از مراحل L توسعه نیابد الگوریتم متوقف می شود.
- اگر تعداد حرکت های پذیرفته شده کمتر از $\varepsilon_2\%$ از L ها برای k_2 سری پی در پی از L باشد الگوریتم متوقـف مـی شود.

7. مثال عددی

بمنظور بررسی کارایی الگوریتم در این قسمت مثال ساده ای که مربوط بکارگیری الگوریتم برای طراحی تلرانس اجزاء تشکیل دهنده یک زیرمجموعه از قفل خودرو می باشد را مورد بررسی قرار می دهیم. شکل 5 یک زیرمجوعه که قسمتی از براکت قفل خودرو است را نمایش می دهد.



شکل 5 – یک زیرمجموعه از مجموعه براکت قفل

روابط موجود بین تلرانس اجزاء و تلرانس های مجموعه در ذیل آمده است. x_i ها نشان دهنده ابعاد مختلف قطعه بوده و تلرانس مرتبط با آن با t_i نشان داده شده است. t_{rj} نشان دهنده j امین تلرانس مجموعه می باشد. روابط ذیل ارتباط بین تلرانس اجزاء و تلرانس های مجموعه را نشان می دهد.

(25)

$$t_{r1} = \sqrt{t_2^2 + t_7^2 + t_4^2} \quad , \quad t_{r1} \le 0.15$$

(26)

$$t_{r2} = \sqrt{t_5^2 + t_6^2 + t_8^2} \quad , \quad t_{r2} \le 0.15$$

(27)

$$t_{r3} = \sqrt{t_1^2 + t_3^2} \quad , \quad t_{r3} \le 0.05$$

(28)

$$0.01 \le t_i \le 0.15 \quad for \quad i = 1,...,8$$

رابطه (25) تا (27) ارتباط بین 3 تلرانس مجموعه و تلرانس های 8 جزء مجموعه را نشان می دهد. همچنین محدودیت تلرانس های مجموعه نیز در این روابط ذکر شده است. رابطه (28) محدودیت حداقل و حداکثر برای تلرانس اجزاء را نشان می دهد. روابط فوق با مدل واقعی دارای مقداری تفاوت می باشد ولی این تفاوت تاثیری روی کارایی الگوریتم ندارد. هدف تخصیص تلرانس ها با حداقل مجموع هزینه می باشد. در جدول 1 سایر پارامترهای در نظر گرفته شده در الگوریتم برای حل مساله تخصیص تلرانس فوق نشان داده شده است.

در هنگام استفاده از تکنیک SA تنظیم پارامترهای آن دارای اهمیت زیادی می باشد. بدیمنظور برای هر مساله خاص ممکن است پارامترها به روش مناسبی تنظیم گردند. تنظیم این پارامترها در عملکرد الگوریتم نقش بالایی دارند. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم SA برای مثال فوق به شرح ذیل و جدول 2 می باشند.

قاعده توقف : قاعده توقف در نظرگرفته شده به این صورت می باشد: اگر F^* به تعداد h سری پی در پی از مراحل L توسعه نیابد، الگوریتم متوقف می شود

راه حل اولیه : راه حل اولیه بصورت یک بردار شامل تلرانس اجزاء مورد بررسی بصورت مشخص شده در شکل6 تعریف می گردد. ابعاد این ماتریس $n \times v$ می باشد که v نشاندهنده ماکزیمم تعداد تلرانس های مجزای اجزاء می باشد. راه حل اولیه بصورت مجموعه ای از تلرانسها که بصورت تصادفی انتخاب شده اند و محدودیت های مساله را رعایت می کنند تشکیل می گردد.

همسایگی : انتخاب روش جستجوی همسایه در عملکرد الگوریتم بسیار حائز اهمیت می باشد. در این تحقیق ما همسایگی را با استفاده از تغییر یک مولفه از تلرانس اجزاء تعریف می کنیم. تلرانس اجزاء بصورت تصادفی انتخاب می گردند. مقدار تغییر در تلرانس قطعه کاندیدا برابر با ± 0.001 در نظر گرفته شده است و علامت آن بصورت تصادفی انتخاب می گردد. پس از انتخاب همسایه تست قابل قبول بودن الگوریتم صورت می گیرد و در صورتی که نقطه همسایه غیر ممکن باشد، اصلاح می گردد.

	a_1	a_2	a_3
x_1	7	750	80
x_2	18	1850	31
x_3	6	650	50
x_4	4	450	45
x_5	5	420	90
x_6	14	1340	31
x_7	6	660	60
x_8	7	770	40

اجزاء

	k	A
t_{r1}	177777	0/111
t_{r2}	177777	0/111
t_{r3}	1600000	0/111

مجموعه

جدول 1 – پارامترهای در نظر گرفته شده در بمنظور طراحی تلرانس مثال فوق

ردیف	پارامتر	مقدار	ردیف	پارامتر	مقدار

1	دمای اولیه (T_0)	0/95	3	طول L	40
2	نرخ انجماد (α)	0/99	4	قاعده توقف (h)	100

جدول 2 پارامترهای در نظر گرفته شده در الگوریتم SA

الگوریتم با استفاده از نرم افزار ویژوال فورترن کد نویسی شده است. تلرانس های اجزاء زیر مجموعه براکت با استفاده از این برنامه اجرا و نتایج بدست آمده در جدول 3 نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده از جدول 3 نشان می دهد که با درنظر گرفتن تابع زیان ممکن است مجموعه از تمامی تلرانس قابل اختصاص استفاده نکند. این میزان استفاده بستگی به ضرایب هزینه های تابع زیان کیفیت و هزینه ساخت دارد. در صورتی که هزینه زیان کیفیت کمتر باشد تلرانس های کمتری به اجزاء تخصیص داده می شود و درصورتی که هزینه زیان کیفیت ناچیز باشد از حداکثر تلرانس قابل اختصاص استفاده می گردد. بمنظور بررسی همگرایی الگوریتم، برنامه در شرایط مختلف و جوابهای اولیه متفاوت اجرا شده است و نتایج بدست آمده همگرا بودن الگوریتم را نشان می دهد. الگوریتم پس از جستجوی 6605 نقطه توقف یافته و هزینه 1462 را بعنوان کمترین هزینه اعلام نموده است. نتایج بدست آمده از اجرای برنامه و مسیر طی شده برای رسیدن به جواب بهینه در شکل 7 نمایش داده شده است.

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & . & . & . & t_{1d_1} \\ t_{21} & t_{22} & . & . & . & t_{1d_2} \\ . & & . & & & . \\ . & & & . & & . \\ . & & & & . & . \\ t_{n1} & t_{n2} & . & . & . & t_{nd_n} \end{bmatrix}$$

شکل 6 یک نمونه راه حل از تخصیص تلرانسها

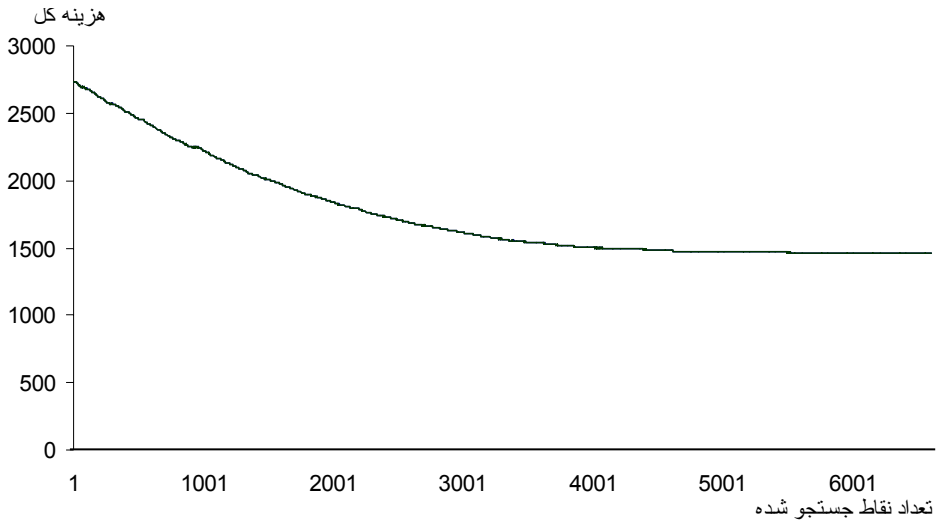
تلرانس اجزاء

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
0/0245	0/08	0/026	0/049	0/033	0/071	0/047	0/057

مجموعه

تلرانس های مجموعه			هزینه کل
t_{r1}	t_{r2}	t_{r3}	1462
0/11	0/01	0/036	

جدول 3 نتایج بدست آمده از اجرای برنامه برای مثال قطعات قفل خودرو



شکل 7. مسیر رسیدن به جواب بهینه

8. نتیجه گیری

در سیستم های تولید پیشرفته، هزینه تولید و زیان کیفیت در طراحی تلرانس به اندازه همدیگر حائز اهمیت هستند. یک الگوریتم برمبنای تکنیک SA ارائه گردید که با استفاده از آن می توان تلرانس اجزاء یک مجموعه را با رعایت مشخصات عملکردی مجموعه و محدودیت های فنی مجموعه با هدف کاهش هزینه های تولید و زیان کیفیت تعیین کرد. این الگوریتم از روشهای تقریبی استفاده نموده ولی ادبیات مطرح در ارتباط با این تکنیک، توانایی این تکنیک را در ارتباط با حل مسائل پیچیده نشان می دهد. حل مسائل پیچیده با استفاده از روش های قطعی سخت و حتی غیر ممکن بوده و ما ناچار به استفاده از الگوریتم ابتکاری برپایه تکنیک های متاهیوریستک ها هستیم. الگوریتم پیشنهادی با استفاده از نرم افزار ویژوال فورترن کد نویسی شده و نتایج بدست آمده از آن نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی برای طراحی تلرانس اجزاء بمنظور کاهش هزینه تولید و زیان کیفیت کارا بوده و می توان از آن برای طراحی تلرانس محصولات پیچیده نیز استفاده کرد. در این تحقیق ما فرض کرده ایم که قطعات در دوره تولید خود از توزیع، میانگین و واریانس از قبل تعریف شده خود تبعیت می کنند. در صورتی که در محیط های واقعی در دوره تولید معمولا انحراف از میانگین و توزیع های از قبل تعریف شده می تواند برای محصولات اتفاق بیافتد. بدینمنظور در نظر گرفتن تغییرات فوق در مدل های طراحی تلرانس و طراحی محصول می تواند زمینه تحقیقات آتی باشد.

مراجع

1. C.J. Marks، Tolerance charts control production machining، Am. Machinist 97(5) 1953، 114–116.
2. E.W. Pike، T.S. Silverberg، Assigning tolerances for maximum economy، Machine Design، Sept. 1953، 139–146.
3. O. Bjorke، Computer-Aided Tolerance، 2nd edn.، ASME Press، New York، 1991
4. I. Zeid، Mechanical tolerancing، in: CADrCAM Theory and Practice، McGraw-Hill، New York، 1991.
5. M.F. Spotts، Dimensioning and Tolerance for Quantity Production، Prentice-Hall، Englewood Cliffs، NJ، 1983.
6. A. Shan and R. N. Roth. Genetic Algorithms in Statistical Tolerancing. Mathematical Computer Modeling. 38، 2003،1427-1436.
7. G. Taguchi، E.A. Elsayed، T.C. Hsiang، Quality Engineering in Production System، McGraw-Hill، New York، 1989.
8. G. Taguchi، On Robust Technology Development، ASME Press، New York، 1993.
9. C. C. Wu، Z. Chen، G. R. Tang. Component tolerance design for minimum quality loss and manufacturing cost. 35، 1998،223–232.
10. G. Zhang and M. Porchet، Some new development in tolerance design in CAD، Advances in Design Automation، DE65، ASME، 1993، 175-185.
11. A. Shan، R.N. Roth and R.J. Wilson، A new approach to statistical geometrical tolerance analysis، International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15، 1999، 222-230.
12. C.A. Gladman، Applying probability in tolerance technology، %ns. Inst. Eng. Australia، Eng. ME 5، 1980، 82-88.
13. M.J. Chandra ، Statistical quality control، CRC Press،2001.
14. F. Kikpatrik، C. Gelatt and M. Vecci، Optimization by simulated annealing. Science، vol. 20، 2، 1983، 117-133.

15. M. Pirlot. General local search methods. European Journal of Operation Research، 92، 1996، 493-511.