

بهینه‌سازی نورد سرد پیوسته با تغییرات توأم کشش بین قفسه‌ای و تنظیمات ضخامت به کمک الگوریتم ژنتیک

فرشید آقاداتودی^{۱*}، حسین گلستانیان^۲، نوید نگهبانی^۳

* نویسنده مسئول: davoodi@iaukhsh.ac.ir

واژه‌های کلیدی

نورد سرد پیوسته، الگوریتم ژنتیک، تنظیمات ضخامت، کشش بین قفسه‌ای.

چکیده

نورد سرد پیوسته فرایند پیچیده‌ای است که با تغییر پارامترهای آن می‌توان به مجموعه جوابهای بهینه دست یافت. هدف اصلی این مقاله به کارگیری الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی توان مصرفی نورد به صورتی است که تنظیمات ضخامت و کشش بین قفسه‌ای به عنوان متغیر مسئله در نظر گرفته شوند. در این مقاله ابتدا روش تحلیلی محاسبات نیرو و توان نورد ارائه شده است و سپس بر اساس این روابط و پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک مجموعه جواب بهینه تنظیمات ضخامت و کشش بین قفسه‌ای به دست آمده است. در استخراج این مجموعه جواب قیود عملی خطی و غیرخطی در نظر گرفته شده‌اند و جواب به دست آمده با نتایج عملی خطوط نورد مقایسه شده است. همچنین اثر تغییر شرایط نورد شامل روانکار و جنس ورق بر الگوی توزیع ضخامت بهینه در این مقاله مطالعه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده کارایی الگوریتم ژنتیک در استخراج مجموعه جوابهای بهینه مشخص شده است. طبق نتایج به دست آمده با تغییرات شرایط نورد می‌توان الگوی مشابهی را در توزیع بهینه درصد کاهش ضخامت در طی فرایند نورد مشاهده کرد.

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

۲- دانشیار، دانشگاه شهرکرد.

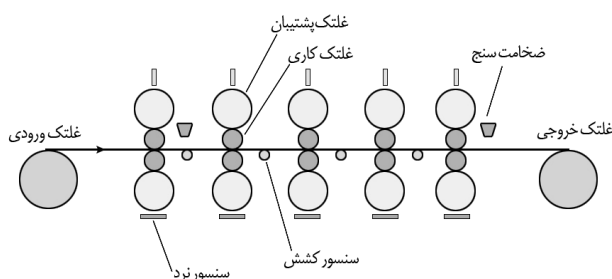
۳- کارشناس ارشد مکانیک، مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

۱- مقدمه

نورد سرد چند قفسه‌ای یا پیاپی یکی از روشهای تولید ورقهای فولادی و غیر فولادی با کیفیت بالا و تolerانسهای دقیق است. از این روش تولید امروزه در بسیاری از کارخانه‌های بزرگ فولاد دنیا استفاده می‌شود. در ایران نیز مجتمع فولاد مبارکه از این تکنولوژی در تولید ورقهای با کیفیت بالا استفاده می‌کند. دو هدف اصلی فرایند نورد سرد افزایش کیفیت سطح و بهبود خواص مکانیکی ورق فولادی است.

به دلیل علاقه‌مندی بسیاری از فولاد سازان برای افزایش نرخ تولید، همواره سعی بر آن بوده است که تنظیمات فرایند به نحوی انتخاب شوند که محصول نهایی با حداقل مصرف انرژی و در حداقل زمان تولید شود. بدیهی است با توجه به سرعت بالای خطوط نورد سرد تغییرات جزئی در میزان مصرف انرژی یا افزایش سرعت تولید باعث افزایش بهره‌وری سیستمها خواهد بود.

شمای یک خط سرد پیوسته پنج قفسه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است. در این خط از آرایش چهارتایی غلتکها استفاده شده است و غلتکهای پشتیبان نیروی لازم برای غلتکهای کاری را فراهم می‌کنند. با عبور ورق از بین قفسه‌ها ضخامت آن به تدریج کاهش می‌یابد. کاهش ضخامت در هر قفسه در اثر اعمال نیرو توسط غلتکهای کاری و غلتکهای پشتیبان است. در حین عبور ورق از قفسه‌ها، ورق وارد ناحیه پلاستیک شده و بین دو قفسه به ناحیه الاستیک باز می‌گردد. نیروی اعمالی به غلتکها از طریق جک هیدرولیکی اعمال می‌شود.



شکل (۱) شمای خط نورد سرد پیوسته.

مدلسازی فرایند نورد سرد پیوسته چند قفسه‌ای دارای پیچیدگیهایی است که بسیاری از دانشمندان علم تغییر شکل فلزات نسبت به بررسی و ارائه روش حل برای آنها اقدام کرده‌اند. ون کارمن بر اساس تئوری تغییر شکل همگن، معادلات دیفرانسیل توزیع فشار در ورق و غلتکها را در حین عبور از ناحیه نورد ارائه کرد [۱]. ون کارمن اصطکاک در ناحیه تماس غلتکی را از نوع اصطکاک خشک فرض کرد. معادلات ون کارمن به دلیل پیچیدگی قابلیت حل تحلیلی صریح را نداشتند و محققان بعدی سعی کردند با ساده‌سازی و انجام فرضیات آنها را حل کنند.

اکلوند بر اساس تئوری تغییر شکل همگن، فرایند نورد را مدل کرد. وی در مورد اصطکاک فرض کرد که در سمت ورودی اصطکاک خشک و در سمت خروجی اصطکاک ویسکوز است [۲]. اروان مدل خود را بر اساس تئوری تغییر شکل ناهمگن ارائه کرد. وی فرض کرد که اصطکاک در وسط ناحیه تماس غلتکی ویسکوز است و در نواحی ورودی و خروجی اصطکاک خشک برقرار است [۳]. در میان سایر مدل‌های ارائه شده برای نورد، مدل ارائه شده توسط بلند و فورد به دلیل فرض غیر صلب بودن غلتک دارای اهمیت ویژه‌ای است [۴]. این مدل که بر معادلات مدل اروان استوار است به صورت دقیق‌تری نیرو و گشتاور نورد را محاسبه می‌کند. هیل در کتاب خود رابطه‌ای برای محاسبه نیرو و گشتاور نورد ارائه داد. اساس این رابطه بر اساس مدل بلند و فورد است و در آن نیروی نورد به عنوان تابعی از عرض ورق، ضریب اصطکاک، نرخ کرنش، تنش سیلان ماده و شعاع تغییر شکل یافته غلتک محاسبه شده است [۵].

استون نشان داد تغییر شکل غلتک بر اثر نیروهای خمشی با استفاده از معادلات بر پایه تئوری تغییر شکل الاستیک، قابل محاسبه است. وی نیز برای تعیین شعاع غلتک تغییر شکل یافته از رابطه هیچکاک استفاده کرد [۶]. وی همچنین رابطه صریح و ساده‌ای برای نیروی نورد بر اساس تنش سیلان میانگین محاسبه و ارائه داد.

سریانارایانا و ردی [۷] در مقاله خود تحت عنوان طراحی مدلی برای فرایند نورد سرد، روشی را برای رساندن راندمان فرایند

متفاوتی به لحاظ تنظیمات درصد کاهش ضخامت وجود دارد. بدین ترتیب که می‌توان با تغییرات در میزان کاهش ضخامت هر قفسه، کشش بین قفسه‌ای، تغییر سرعت تولید یا تغییر روانکار به تنظیمات جدیدی رسید که این امر لزوم یافتن و انتخاب مجموعه جواب بهینه را نشان می‌دهد.

با توجه به سرعت قابل توجه خطوط نورد، استفاده از روشها و الگوریتمهای محاسباتی وقت‌گیر مانند روشهای تحلیلی بهینه سازی یا روش‌های اجزا محدود عملاً مقرون به صرفه نیست. استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و ترکیب آن با سایر روشها می‌تواند به یافتن تنظیمات بهینه در این فرایند کمک کند. در این مقاله سعی شده است که از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی تنظیمات در فرایند نورد سرد پنج قفسه‌ای استفاده شود. مزیت این روش، نسبت به سایر مطالعات، بررسی اثرات تغییرات کشش بین قفسه‌ای در کنار بررسی اثرات تغییرات تنظیمات کاهش ضخامت به‌طور همزمان و به‌کارگیری روش الگوریتم ژنتیک در این بررسی است.

در این مقاله محدودیتها و قیودی که ناشی از شرایط فنی و عملی است و باید در بهینه سازی لحاظ شوند، مورد اشاره قرار گرفته‌اند. سپس با معرفی پارامترهای مسئله و تابع هدف، مجموعه جواب بهینه برای تنظیمات ضخامت و کشش به کمک الگوریتم ژنتیک به‌دست آمده است. به کمک این روش، اثرات تغییر شرایط نورد بر استخراج مجموعه جوابهای بهینه مطالعه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از وجود الگوی مشابه در روند تنظیمات کاهش ضخامت به رغم تغییر شرایط است.

۲- روابط تحلیلی محاسبه توان نورد سرد پیوسته

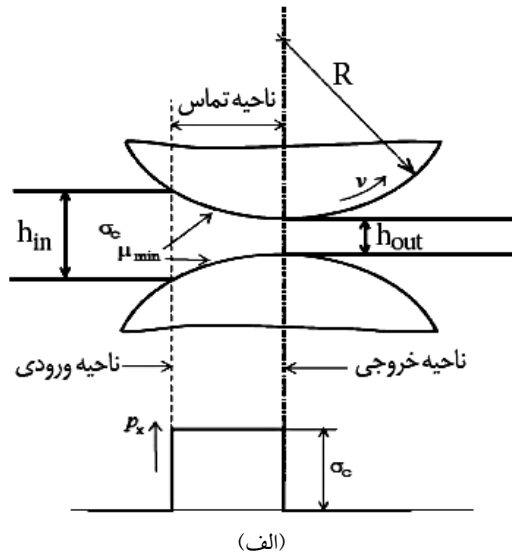
در محاسبات تحلیلی از روابط محاسبات استون با فرض پدیده تخت شدگی غلتکها استفاده شده و پدیده کارسختی ورق در نظر گرفته شده است. [۱۴]. به کمک روابط استون می‌توان ابتدا نیرو و سپس گشتاور و توان نورد را محاسبه کرد. شکل (۱) وضعیت نواحی الاستیک و پلاستیک ورق در حین عبور از هر قفسه را در نورد سرد نشان می‌دهد.

نورد سرد به ماکزیمم مقدار خود مورد بررسی قرار دادند. پیرس و همکارانش [۸] در مقاله‌ای بهینه سازی عملی یک خط نورد سرد پیوسته را مورد بررسی قرار دادند. هدف بهینه سازی در این تحقیق تعیین درصد کاهش ضخامت در قفسه‌ها بوده است. در این مقاله بهینه‌سازی شامل الگوریتم‌هایی است که در مرحله اول درصد کاهش ضخامت در هر قفسه را مشخص کرده و در مرحله دوم درصد کاهش ضخامت‌ها را بهینه‌سازی می‌کند. تابع هدف بر اساس کیفیت محصولات و افزایش بهره‌وری کارخانه تعریف شده است. تایتو و لی یو در مقاله‌ای به کمک روش بلند و فورد روشی برای محاسبه ضریب اصطکاک و مقاومت ماده در نورد سرد به کمک نتایج تجربی ارائه دادند [۹]. در این مقاله از روشهای بهینه‌سازی عددی برای محاسبه ضریب اصطکاک و مقاومت ماده بر حسب نیروی نورد استفاده شده است.

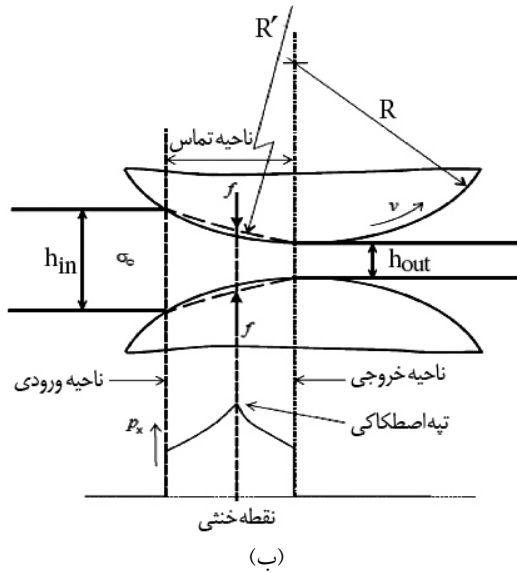
دوروفسکی و همکارانش با ارائه مقاله‌ای تحت عنوان محاسبات پارامترهای نورد چند قفسه‌ای به کمک الگوریتم ژنتیک یک روش محاسباتی ویژه برای محاسبه ضریب اصطکاک بر اساس اطلاعات موجود در خط نورد سرد ارائه کردند [۱۰]. روش محاسباتی آنها بر تئوری بلند و فورد استوار است.

هایجون و همکارانش به کمک الگوریتم ژنتیک کد محاسباتی برای بهینه سازی خط نورد سرد پیوسته ارائه کرده‌اند و نتایج عملی بهینه سازی را نیز ارائه نموده‌اند [۱۱]. اساس محاسبات آنها توزیع یکنواخت توان در موتورها و جلوگیری از لغزش ورق است. در مقاله آنها از نتایج ناشی از بهینه سازی برای بهینه سازی عملی خطوط نورد استفاده و نتایج آن ارائه شده است. پورسینا، فتاحی و همکاران نیز در مقاله‌ای اثرات تغییر تعداد قفسه‌ها و تنظیمات کاهش ضخامت را به کمک الگوریتم ژنتیک مطالعه کرده‌اند [۱۲]. اشرفی و همکاران در تحقیقی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در فرایند نورد نامتقارن مقدار نیروی نورد و شکل ورق تولیدی را بهینه کرده‌اند [۱۳].

در فرایند نورد سرد چند قفسه‌ای برای تولید کلاف ورق با ضخامت ورودی و خروجی مشخص، مجموعه جوابهای



(الف)



(ب)

شکل (۲) توزیع فشار را در غلتک و ورق در فرایند نورد سرد.

چنانچه نورد سرد با تنش‌های کششی عقب و جلو همراه باشد، در این صورت فشار میانگین نورد عبارت است از:

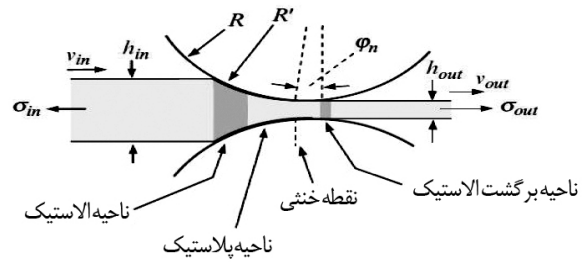
$$\frac{p_m}{\sqrt{k}} = \left(1 - \frac{T_m}{\sqrt{k}}\right) \frac{h_m}{\mu l_d} (e^{h_m} - 1) \quad (5)$$

که در آن T_m میانگین تنش‌های کششی عقب و جلو است:

$$T_m = \frac{T_b + T_f}{2} \quad (6)$$

برای فرایند نورد، مانند تحلیل فشار به روش آهنگری، از فشار میانگین استفاده می‌شود. نتیجه کلی به صورت حاصلضرب فشار میانگین در سطح تماس غلتک و قطعه کار به صورت زیر ساده می‌شود [۶]:

$$F = p_m w \sqrt{R' \Delta h} \quad (7)$$



شکل (۱) نواحی الاستیک و پلاستیک ورق را در حین عبور از قفسه نورد.

طبق حل استون فرایند نورد را می‌توان به صورت فشرده شدن قطعه کار بین دو فک یک پرس آهنگری در نظر گرفت که در بخشی از طول قطعه کار بین دو فک غلتک فشرده می‌شود. برای این شکل استون رابطه زیر را برای فشار میانگین p_m غلتک ارائه داد [۶]:

$$\frac{p_m}{\sqrt{k}} = \frac{h_m}{\mu l_d} (e^{h_m} - 1) \quad (1)$$

در رابطه فوق h_m میانگین ضخامت ورودی و خروجی هر قفسه، μ ضریب اصطکاک ورق و غلتک در حین نورد و l_d طول ناحیه تماس است.

شکل (۲) توزیع فشار را در غلتک و ورق در فرایند نورد سرد نشان می‌دهد. شکل (۲-الف) بدون در نظر گرفتن اصطکاک و شکل (۲-ب) در حضور اصطکاک است که البته مدل استون که به واقعیت تطبیق بیشتری دارد با شکل (۲-ب) تطبیق دارد.

در رابطه (۱) \sqrt{k} تنش تسلیم میانگین در شرایط کرنش صفحه‌ای است. این مقدار با توجه به کارسختی ورق و معادله لودویک برای رفتار ورق به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sqrt{k} = 1/155 \bar{Y} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{Y} \quad (2)$$

$$\bar{Y} = \frac{K(\epsilon_t^{n+1} - \epsilon_o^{n+1})}{(\epsilon_t - \epsilon_o)(n+1)} \quad (3)$$

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (4)$$

رابطه (۴) معادله لودویک برای رفتار فولاد است که ضرایب K و n از نمودار تنش-کرنش حقیقی آزمایش کشش استخراج می‌شود.

به قفسه اول و خروجی از قفسه پنجم، درصد کاهش ضخامت در قفسه های میانی به نحوی انتخاب شود که مصرف توان بهینه شود. در حل مسئله، هم درصد کاهش ضخامت ورق خروجی از هر قفسه و هم نیروهای کششی بین هر دو قفسه به عنوان متغیرهای بهینه سازی در نظر گرفته شده اند. بنابراین متغیرهای مسئله بهینه سازی طبق رابطه زیر در نظر گرفته می شود:

$$A = (h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, T_0, T_{12}, T_{23}, T_{34}, T_{45}, T_5) \quad (12)$$

قیود معادلاتی هستند که به دلیل محدودیتهای فنی یا محاسباتی در هر مسئله بهینه سازی مطرح هستند.

در مسئله بهینه سازی نورد سرد، برای درصد کاهش ضخامت در هر قفسه و نیروهای کششی بین هر دو قفسه حدود بالایی و پایینی در نظر گرفته می شود. این حدود در هر مسئله با توجه به حدود به کار رفته در خطوط عملی نورد و روابط تحلیلی در نظر گرفته شده اند. این حدود در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) حدود بالایی و پایینی توزیع درصد کاهش ضخامت و نیروی بین قفسه های

قفسه اول	قفسه دوم	قفسه سوم	قفسه چهارم	قفسه پنجم	حد پایینی	حد بالایی
۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۵	حد پایینی	حد بالایی
۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۱۵	حد پایینی	حد بالایی
۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۷	حد پایینی	حد بالایی
۲۴	۴۰	۴۰	۴۰	۲۴	حد پایینی	حد بالایی

در نورد سرد سه قید غیرخطی وجود دارد که اولی بیشینه توان تولیدی هر موتور است. در جدول (۲) بیشینه توان هر قفسه بر اساس موتورهای نورد سرد یک خط عملی نورد مشخص شده است [۱۴].

در صنعت مرسوم است نیرو به ازای واحد پهنا بیان می شود:

$$\frac{F}{w} = p_m \sqrt{R' \Delta h} \quad (8)$$

که در رابطه فوق R' ضخامت تغییر شکل یافته غلتک و Δh میزان کاهش ضخامت ورق است. رابطه (۶) به رابطه استون برای محاسبه نیرو مشهور است.

ساده ترین و مفیدترین روش محاسبه گشتاور نورد، استفاده مستقیم از نیروی نورد است. در این روش فرض می شود که نیروی نورد به صورت یک بردار عمود بر سطح قطعه کار عمل می کند و نقطه اثر و یا مرکز ثقل این نیرو در فاصله ای از محور عمودی اتصال دو مرکز غلتکهای بالا و پایین قرار گرفته است. حال با توجه به این مدل ساده از وضعیت نیروی نورد، گشتاور لازم برای به چرخش در آوردن هر دو غلتک حول مرکزهایشان به صورت زیر است:

$$M = 2Fcl_d \quad (9)$$

در این رابطه M گشتاور نورد، و c عدد ثابت برابر 0.4 در نورد سرد فرض می شود [۱۴]. با داشتن گشتاور و صرف نظر از لغزش می توان نورد را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\dot{W} = M\omega \quad (10)$$

۳- به کارگیری الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی نورد

هدف بهینه سازی در این مقاله بهینه کردن تابع هدف مصرف توان در پنج قفسه نورد سرد پیوسته است. تابع هدف در رابطه (۱۱) نشان داده شده است.

$$\dot{W}_{total} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \dot{W}_i^2} \quad (11)$$

در این معادله \dot{W}_i توان مصرفی قفسه i ام و 5 تعداد قفسه هاست. مجموعه پارامتر دیگری که در بهینه سازی نقش موثری ایفا می کند متغیرهای بهینه سازی است. در مسئله نورد سرد متغیرهای متعددی بر توان مصرفی نورد تأثیر گذارند که از آن جمله می توان به توزیع درصد کاهش ضخامت و کشش بین قفسه ای اشاره کرد. در این تحقیق مسئله اساسی آن است که با فرض کردن ضخامت ورودی

جدول (۲) بیشینه توان هر قفسه.

قفسه	قفسه	قفسه	قفسه	قفسه
اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
۳۹۰۰	۴۸۰۰	۴۸۰۰	۴۸۰۰	۵۸۵۰

بیشینه توان (kW)

دومین قید مربوط به تنش کششی قفسه‌ای است. تنش کششی بین قفسه‌ای، سبب کاهش فشار متوسط و نیرو می‌شود. بنابراین یکی از راه‌های کاهش مقدار فشار متوسط و نیروی نورد، افزایش کشش بین قفسه‌ای است. از طرف دیگر افزایش بیش از حد کشش بین قفسه‌ای سبب بروز برخی از مشکلات از جمله پارگی ورق در حین فرایند می‌شود. حداکثر مقدار مناسب جهت به کارگیری کشش بین قفسه‌ای، یک سوم تنش تسلیم میانگین ورق در قفسه مورد نظر است [۱۶ و ۱۷]. در این تحقیق فرض شده که تنش کششی خروجی هر قفسه از یک سوم تنش تسلیم میانگین ورق در آن قفسه کمتر باشد. معادله زیر این قید را برای قفسه i نشان می‌دهد. در این رابطه T کشش بین قفسه‌ای و k_i تنش تسلیم برشی ورق ورودی به قفسه i است.

$$T_{i,i+1} \leq \frac{2k_i}{3} \quad (13)$$

سومین قید غیرخطی برای جلوگیری از وقوع پدیده دو شاخه شدن مقطع ورق اعمال می‌شود. رابطه زیر برای پیشگیری از این پدیده در هر قفسه بیان شده است [۱۶].

$$\frac{h_{in}}{2R} \leq 0.905 \left(\frac{h_{in}}{h_{out}} - 1 \right) \quad (14)$$

که در آن h_{in} ضخامت ورودی، h_{out} ضخامت خروجی و R شعاع غلتک در هر قفسه است.

بهینه‌سازی مسئله با استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار MATLAB صورت گرفت. بدین صورت که ابتدا متغیرهای بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک به دست آورده می‌شوند. سپس این متغیرها توسط ابزار pattern search بهینه می‌شوند. بدین صورت که متغیرهای بهینه به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک به عنوان نقطه شروع به ابزار pattern search داده شده و این ابزار متغیرهای بهینه‌تری را پیدا می‌کند.

ترکیب جمعیت در الگوریتم ژنتیک ۶۰ نفر در نظر گرفته شده است. مقیاس سنجش برای برازش به صورت رتبه‌بندی است و تابع انتخاب به صورت چرخ رولت است. همبری دو نقطه‌ای به عنوان عملگر همبری انتخاب شده است. حداکثر تعداد نسل انتخاب شده ۴۰۰ نسل است و بیشترین تعداد نسلی که الگوریتم می‌تواند درجا زند ۲۰۰ نسل انتخاب شده است. همچنین خطای تابع بهینه‌سازی و خطای قیدهای غیرخطی 10^{-12} در نظر گرفته شده است. سایر موارد همان موارد پیش فرض MATLAB در نظر گرفته می‌شود. درحالتی که هم درصد کاهش ضخامت ورق خروجی از هر قفسه و هم نیروهای کششی بین هر دو قفسه به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند، ۱۱ متغیر بهینه‌سازی وجود دارد. بیشترین تعداد تکرار یک میلیون در نظر گرفته می‌شود.

۴- نتایج حل مسئله بهینه‌سازی

در این بخش نتایج بهینه‌سازی برای ورق فولادی جنس 1521 با پهنای ۱۱۷۰ میلیمتر در نورد پیوسته پنج قفسه‌ای ارائه شده است. در معادله لودویک ضریب مقاومت ورق ۵۶۰ MPa و نمای کار سختی آن ۰/۱۷۴ است. با توجه به اطلاعات یکی از برنامه‌های تولید خط عملی نورد مجتمع فولاد مبارکه، ضخامت ورق ورودی به قفسه اول ۳/۳ میلیمتر و ضخامت ورق خروجی از قفسه پنجم ۱/۲۵ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. همچنین سرعت زاویه‌ای قفسه اول ۱۶۴/۷۰۵ rpm است که براساس سرعت زاویه‌ای نزدیک به سرعت ماکزیمم انتخاب شده است تا ماکزیمم سرعت تولید در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است با تعیین سرعت یک قفسه و مشخص شدن ضخامتها، مقدار سرعت زاویه‌ای قفسه‌های دیگر قابل محاسبه است.

در حل مسئله هم درصد کاهش ضخامت ورق خروجی از هر قفسه و هم نیروهای کششی بین هر دو قفسه به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج در شکل‌های (۴) تا (۱۲) ارائه شده است. نمودار همگرایی بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین شکل (۵) مراحل

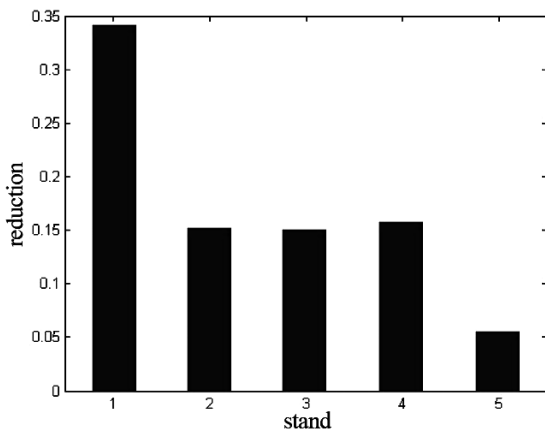
جدول (۳) توزیع درصد کاهش ضخامت بهینه .

قفسه	قفسه	قفسه	قفسه	قفسه	
اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	
۳۴/۱۶	۱۵/۱	۱۵	۱۵/۷۱	۵/۴۲	درصد کاهش ضخامت

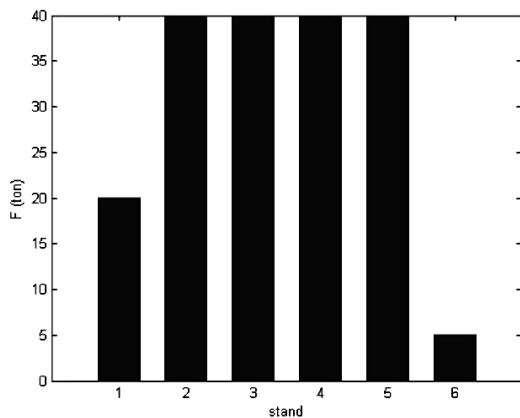
جدول (۴) توزیع نیروهای کششی بین قفسه‌ای بهینه.

قبل از قفسه اول	قفسه دوم و اول	قفسه سوم و دوم	قفسه چهارم و سوم	قفسه پنجم و چهارم	بعد از قفسه پنجم
۲۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۵

نیروی کششی بین قفسه‌ای (ton)

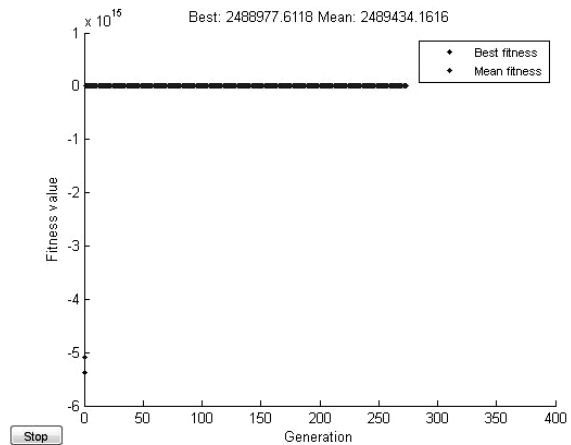


شکل (۶) توزیع درصد کاهش ضخامت.

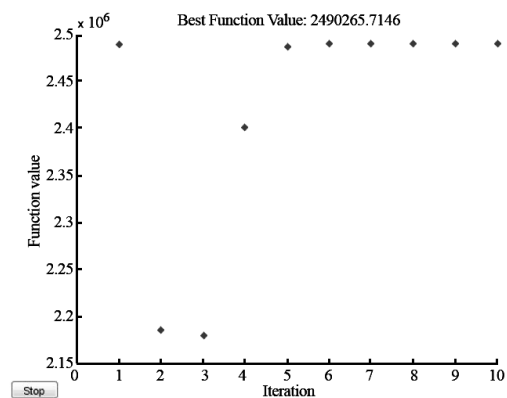


شکل (۷) توزیع نیروی کشش بین قفسه‌ای.

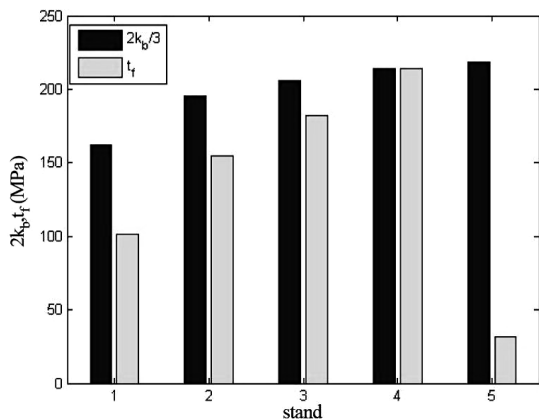
همگرایی توسط ابزار pattern search رانشان می دهد. این نمودارها حاکی از همگرایی الگوریتم ژنتیک در این مسئله است. پس از بهینه سازی توزیع درصد کاهش ضخامت مطابق جدول(۳) و نمودار شکل(۶) است. همچنین جدول(۴) و شکل (۷) نمودار توزیع نیروهای کششی بین قفسه‌ای را نشان می دهد. شکل (۸) توزیع سرعتها را نشان می دهد. قابل توجه است که سرعت ورق در حین عبور از قفسه ها افزایش می یابد. در شکل (۹) توزیع تنش کششی خروجی از هر قفسه نشان داده شده است. شکل (۱۰) نمایانگر توزیع تنش تسلیم میانگین است. قابل توجه است که تنش تسلیم میانگین ورق در حین عبور از قفسه ها به دلیل کارسختی افزایش می یابد. در شکل (۱۱) تنش کششی خروجی از هر قفسه با یک سوم تنش تسلیم میانگین مقایسه شده است که نشانگر رعایت قيود مسئله است.



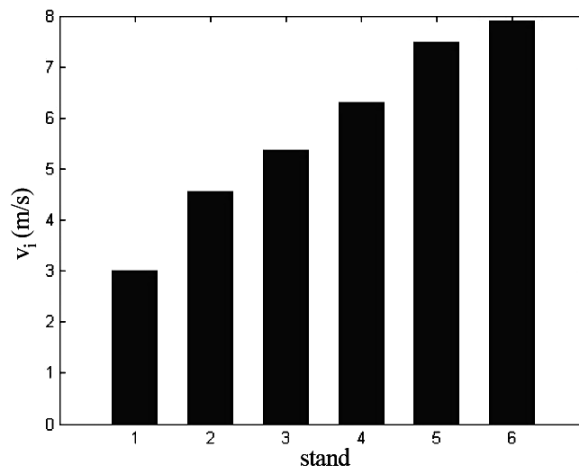
شکل (۴) نمودار همگرایی بهینه سازی الگوریتم ژنتیک.



شکل (۵) نمودار همگرایی بهینه سازی pattern search .

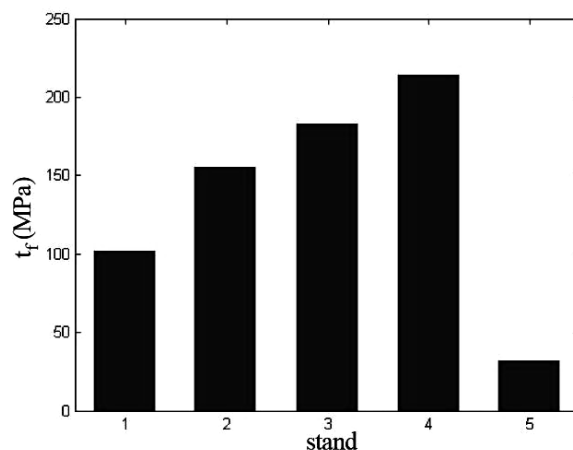


شکل (۱۱) مقایسه تنش کششی خروجی از هر قفسه با یک سوم تنش تسلیم میانگین.

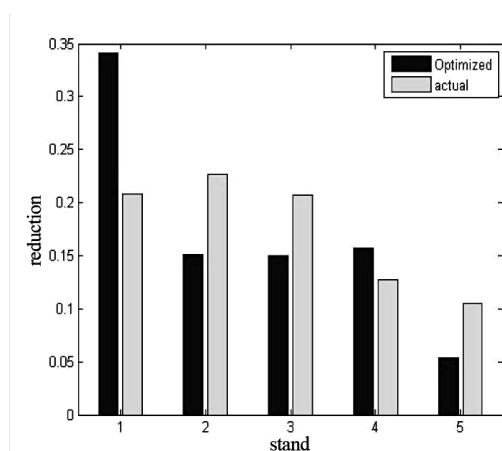


شکل (۸) توزیع سرعت.

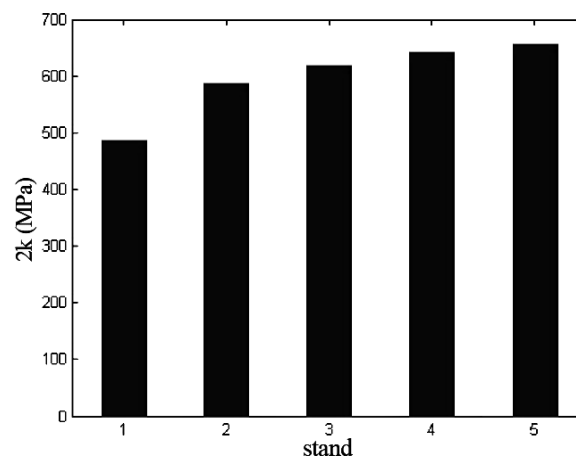
در شکل (۱۲) توزیع کاهش ضخامت به دست آمده از نتایج نرم افزار کارخانه فولاد مبارکه با توزیع کاهش ضخامت بهینه به دست آمده مقایسه شده است. در شکل (۱۳) می توان مصرفی هر قفسه در حالت بهینه سازی شده را با توان مصرفی در هر قفسه خط نورد سرد کارخانه فولاد مبارکه مقایسه نمود. در شکل (۱۲) و جدول (۵) مجموع توانهای مصرفی موتورهای تمامی قفسه‌ها در دو حالت واقعی و بهینه‌سازی شده ارائه شده است. همانگونه که در جدول مشخص است، با بهینه‌سازی ۲۰/۹۵ درصد از توان مصرفی خط کاسته می‌شود. لازم به ذکر است که با اضافه شدن متغیرهای کشش به متغیرهای کاهش ضخامت، مجموعه جواب بهینه‌تری به دست می‌آید و توان کمتری مصرف می‌شود.



شکل (۹) توزیع تنش کششی بین قفسه‌ای.



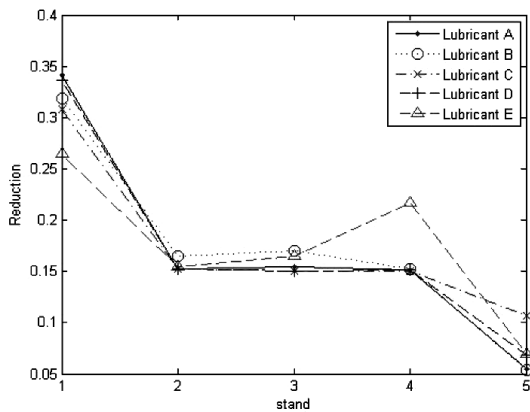
شکل (۱۲) مقایسه توزیع درصد کاهش ضخامت بهینه و عملی.



شکل (۱۰) توزیع تنش تسلیم میانگین.

جدول (۵) ضرایب اصطکاک بر اساس روانکارهای مختلف [۱۷].

روانکار	قفسه اول	قفسه دوم	قفسه سوم	قفسه چهارم	قفسه پنجم	قفسه ششم
A	۰/۰۴۵۶	۰/۰۴۳۷۹	۰/۰۴۵	۰/۰۶	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵
B	۰/۰۸۵	۰/۰۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱
C	۰/۰۶۳	۰/۰۶	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳
D	۰/۰۷۲	۰/۰۴۷	۰/۰۷	۰/۰۶۹	۰/۰۶۱	۰/۰۶۱
E	۰/۰۸۵	۰/۰۷۲	۰/۰۷۵	۰/۰۶	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷

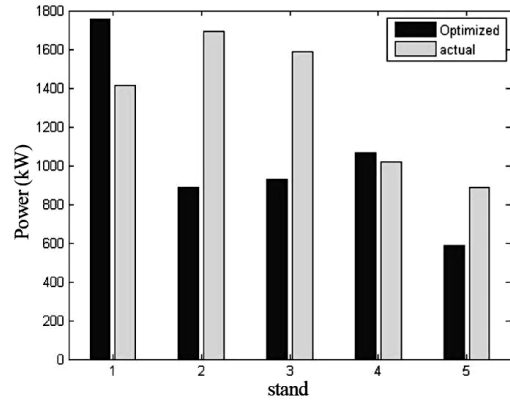


شکل (۱۴) نمودار کاهش ضخامت ورق در هر قفسه به ازای تغییرات روانکار.

در خطوط عملی نورد به دلایل نیاز به تولید محصولاتی با خواص مکانیکی مختلف، مشخصات معادله ساختاری ورق فولادی ورودی به نورد پیوسته دچار تغییراتی می‌شود. با تغییر خواص مکانیک فولاد نمودار تنش- کرنش مربوط تغییر می‌کند که اثر آن با تغییرات ضرایب کارسختی K و n در معادله لودویک همراه است. هدف این بخش بررسی حساسیت روش ارائه شده در بهینه‌سازی نسبت به سختی ورق است. اعداد مربوط به جنسهای انتخاب شده بر اساس مرجع [۱۴] در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج به دست آمده در شکل (۱۵) ارائه شده است. با توجه به این شکل مشخص است که طبق روش بهینه‌سازی انجام شده توزیع ضخامت برای ورقهای با جنس مختلف الگوی مشابهی را دنبال کرده است.

جدول (۷) ضرایب کارسختی فولادهای مختلف [۱۴].

فولاد	فولاد	فولاد	فولاد	فولاد
۱۵۲۱	۱۰۰۶	۱۰۰۸	۱۰۱۰	۵۱۱۵
K	۵۶۰	۶۱۸	۶۵۸	۷۹۵
n	۰/۱۷۴	۰/۳۱	۰/۲۴	۰/۲۲



شکل (۱۳) مقایسه توانهای مصرفی هر قفسه در دو حالت بهینه شده و واقعی.

جدول (۵) مجموع توانهای مصرفی تمامی قفسه‌ها

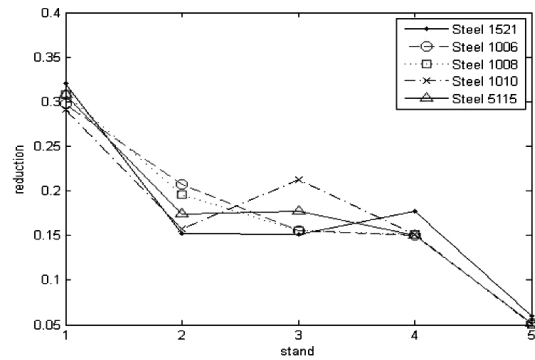
حالت	مجموع توانهای مصرفی (MW)
واقعی	۶/۶۰۳
بهینه شده	۵/۲۱۹

۹- بررسی اثر تغییرات شرایط نورد بر روند بهینه‌سازی

پارامترهایی مانند نوع روانکار و استحکام ورق بر فرایند نورد سرد و توان مصرفی اثرگذارند. در اینجا با توجه به الگوریتم ژنتیک به کارگرفته شده در بخش قبل، اثر تغییر روانکار، ضخامتهای ورودی و خروجی و استحکام (سختی) ورق بر تنظیمات بهینه بررسی شده‌اند و نتایج لازم ارائه شده‌اند. هدف اصلی این بخش بررسی میزان اثر تغییرات پارامترهای فوق بر روند استخراج مجموعه جوابهای بهینه است. قابل توجه است که به دلیل زمان‌بر بودن محاسبات، اثر هر یک از این پارامترها بر بهینه‌سازی به صورت جداگانه بررسی شده است.

بر اساس اطلاعات مرجع [۱۷] پنج نوع روانکار انتخاب شده است که اطلاعات آن در جدول (۵) آمده است. با توجه به شرایط کاهش ضخامت و غلتکها ضریب اصطکاک مربوط به هر روانکار در هر قفسه متفاوت است. الگوریتم برای این روانکارها اجرا شده و مجموعه جواب بهینه به دست آمده است. شکل (۱۴) تنظیمات بهینه در پنج قفسه را با توجه به انواع روانکارها نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که توزیع تنظیمات بهینه در همه روانکارها الگوی مشخصی را دنبال کرده است.

$w(mm)$	عرض ورق
$p_m(MPa)$	فشار میانگین نورد
$R(mm)$	شعاع غلتک
$\omega(rad/s)$	سرعت زاویه‌ای غلتک
$\dot{W}(Watt)$	توان مصرفی نورد
$M(N.m)$	گشتاور نورد



شکل (۱۵) نمودار کاهش ضخامت ورق در هر قفسه به ازای تغییرات جنس ورق.

۱۱- مراجع

- [1] Von Karman Th., Beitrag zur Theorie des Walzvorganges (Contribution to the Theory of Rolling), Vorträge der Dresdener, Tagung, Band 5, Heft 2, 1925.
- [2] Ekelund S., The Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling of Steel, 1927, vol. 111, p. 39.
- [3] Orowan, E., 1943, *The calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 150, pp. 140-167.
- [4] Bland D.R., Ford H., *The calculation of roll force and torque in cold strip rolling with tensions*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1948.
- [5] Hill R., *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, London, 1950.
- [6] Stone M. D., Rolling of Thin Strip, Parts I and II, *Iron Steel Engr.*, February. 1953, pp. 61-74; December 1956, pp. 55-76.
- [7] Venkata Reddy, N., Suryanarayana, G., A set-up model for tandem cold rolling mills, *J. Mater. of Proce. Technology*, 116, 2001, pp. 269-277.
- [8] Pires C.T.A., Ferreira H.C., Sales R.M., Set-up optimization for tandem cold mills: A case study, World Scientific, Brazil, 2005.
- [9] Tieu A. K., Liu Y. J., Friction variation in the cold-rolling process, *Tribol. Int.*, 37, 2004, pp. 177-183.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش حلی برای مسئله تعیین تنظیمات در نورد سرد پیوسته ارائه شد. با نتایج به دست آمده شامل ارائه مجموعه جواب بهینه برای کاهش ضخامت‌ها در قفسه‌های مختلف با هدف کاهش توان مصرفی بود. این نتایج در مقایسه با اطلاعات عملی نشان داد که با به‌کارگیری این الگوریتم توان مصرفی کاسته شده است. البته در استخراج این نتایج تغییرات کشش بین قفسه‌ای نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که با انتخاب کشش‌های بهینه، توان مصرفی کاهش می‌یابد. همچنین اثرات تغییر شرایط نورد شامل روانکار و جنس ورق نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که با تغییر شرایط روانکار و جنس ورق، الگوی مشابهی برای توزیع ضخامت بهینه وجود دارد و این امر نشانگر این است که الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده مستقل از شرایط نورد عمل می‌کند.

فهرست علائم

$\bar{Y}(MPa)$	تنش تسلیم متوسط
$K(MPa)$	ضریب کارسختی
ϵ_i	کرنش حقیقی در قفسه i ام
$t_i(N)$	نیروی کشش بین قفسه‌ای
$h_i(mm)$	ضخامت ورق در هر قفسه
μ	ضریب اصطکاک
$k_i(MPa)$	تنش تسلیم برشی ورق در قفسه i ام
$F(N)$	نیروی اعمالی به غلتک‌های نورد

- [10] Ďurovský F., Zboray L., Ferková Z., Computation of Rolling Stand Parameters by Genetic Algorithm, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 5, No. 2, 2008.
- [11] Haijun Ch., Xinyan H., Jingming Y., *Optimization of schedule with multi-objective for tandem cold rolling mill based on IGA*, Mechanic Automation And Control Engineering Conference (MACE), 2010.
- [12] Hitchcock J.H., Elastic Deformation of Rolls during Cold Rolling, *ASME Research Publication*, p. 33, 1935, New York.
- [۱۲] فتاحی ا.، پورسینا م.، فرهت نیا ف.، بهینه سازی توان مصرفی در خط نورد سرد پیوسته با الگوریتم ژنتیک، کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، بیرجند، ۱۳۹۰.
- [۱۳] اشرفی م.، خادمی زاده ح.، موسوی ح.، بهینه سازی نورد نامتقارن به منظور بهینه کردن نیروی نورد و حذف انحنای ورق خروجی، چهاردهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.
- [۱۴] مشکسار، م ح، اصول مهندسی نورد، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۳۸۱.
- [۱۵] فتاحی ا.، بهینه سازی توان مصرفی در خط نورد سرد پیوسته با الگوریتم ژنتیک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ۱۳۹۰.
- [16] Venkata Reddy, N., Suryanarayana, G., A set-up model for tandem cold rolling mills, *J. Mater. of Proce. Technology*, 116, 2001, pp. 269-277.
- [17] Witton P. W., Ford H., *Surface friction and lubrication in cold strip rolling*, Proc. of Imperial college of London, 1954.

