



بهینه‌سازی پارامترهای برشی برای کمینه کردن زبری سطح با تلفیق شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم رقابت استعماری

محمد مهدی ابوترابی

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
abootorabi@yazd.ac.ir، ۷۴۱-۸۹۱۹۵

چکیده

زبری سطح یکی از رایج‌ترین معیارهای نشان دهنده کیفیت سطح است که کاملاً بستگی به مقادیر پارامترهای ورودی فرآیند برشی و شرایط برش دارد. هدف از این مقاله، بهینه کردن پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش شعاعی و نوع فرزکاری برای کمینه کردن زبری سطح در عملیات فرزکاری فولاد ضد زنگ ۴۲۰ با استفاده از تلفیق روش شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم رقابت استعماری است. ترکیب این دو روش برای بهینه‌سازی یک فرآیند برش دارای سابقه نیست و برای نخستین بار، در این مقاله ارائه می‌شود. ۵۴ حالت مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و زبری سطح در آن‌ها اندازه‌گیری شده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی با نتایج آزمایش‌ها، نشان‌دهنده دقت مناسب شبکه عصبی در پیش‌بینی زبری سطح است. پارامترهای بهینه برای داشتن کمترین زبری سطح، به کمک الگوریتم رقابت استعماری به دست آمده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تلفیق روش شبکه عصبی با الگوریتم رقابت استعماری روش مناسبی برای بهینه‌سازی زبری سطح در فرآیند فرزکاری است.

کلید واژگان: زبری سطح، فرزکاری، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم رقابت استعماری

Optimization of cutting parameters to minimize surface roughness by integrating Artificial Neural Network and Imperialist Competitive Algorithm

Mohammad Mahdi Abootorabi

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
P.O.B. 89195-741 Yazd, Iran. abootorabi@yazd.ac.ir

ABSTRACT

The surface roughness is a widely used index of surface quality which depends entirely on the input parameters and cutting conditions. This paper presents an approach for determining the optimum cutting speed, feed rate, radial depth of cut and milling type leading to minimum surface roughness in milling process of AISI 420 stainless steel by integrating Artificial Neural Network (ANN) and Imperialist Competitive Algorithm (ICA). The combination of these two methods to optimize the cutting process is provided for the first time in this article. 54 different cases were tested and surface roughness was measured in each experiment. The predicted results using ANN indicated good agreement between the predicted values and the experimental values. ICA was used to determine the optimal machining parameters leading to minimum surface roughness. The obtained results proved that the ANN-ICA approach is capable of predicting the optimum machining parameters to minimum surface roughness in milling process.

Keywords: Artificial Neural Network, Imperialist Competitive Algorithm, Milling, Surface Roughness

نشان داده می‌شود. مقدار زبری سطح در یک فرآیند ماشین‌کاری به پارامترهای برشی و ویژگی‌های قطعه‌کار و ابزار برشی بستگی دارد [۳]. تغییرات اندکی در مقادیر پیشروی، سرعت برشی، عمق برش، سایش ابزار و سیالات برشی می‌تواند اثر زیادی بر زبری سطح قطعه‌کار داشته باشد [۴]؛ بنابراین، تعیین ارتباط بین این‌گونه پارامترها با زبری سطح و کمی کردن این ارتباط از اهمیت بالایی برخوردار است.

عمر و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۷ به صورت تجربی نشان دادند که افزایش نرخ پیشروی در شیار تراشی با ابزار فرز انگشتی باعث افزایش زبری سطح می‌شود. پتواری و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۱ بیان کردند که در فرزکاری فولاد S45C با اینسرت‌های دارای پوشش TiN، پارامترهای برشی مؤثر بر زبری سطح به ترتیب عبارتند از: نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت برشی به گونه‌ای که افزایش نرخ پیشروی و عمق برش باعث افزایش زبری سطح

۱- مقدمه

فولادهای ضد زنگ مارتنزیتی مانند فولاد ۴۲۰ در کاربردهایی که ترکیبی از مقاومت به خوردگی مناسب و استحکام بالا مورد نیاز است مانند پره‌های توربین، شافت‌ها و تجهیزات پزشکی، کاربرد گسترده‌ای دارند. این فولاد در شرایط آنبیل شده به راحتی ماشین‌کاری می‌شود اما اگر تا بالای HRC ۳۰ سخت‌کاری گردد، ماشین‌کاری آن بسیار سخت می‌شود. فرزکاری چنین فولادهایی به یک ماشین ابزار مستحکم و پایدار، ابزار با لبه برشی تیز و روان-کار مناسبی که هم روی ابزار و هم روی قطعه‌کار جریان دائم داشته باشد، نیاز دارد [۱]. فقدان هر کدام از این شرایط باعث کاهش کیفیت سطح قطعه‌کار می‌شود. یکی از مهمترین معیارها برای تعیین میزان کیفیت سطح، استفاده از مقدار زبری سطح است [۲]. روش‌های مختلفی برای بیان مقدار زبری سطح وجود دارد که یکی از آن‌ها زبری متوسط است و معمولاً با Ra

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Mahdi Abootorabi, Optimization of cutting parameters to minimum surface roughness by integrating Artificial Neural Network and Imperialist Competitive Algorithm, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 73-77, 2015 (in Persian/Farsi)

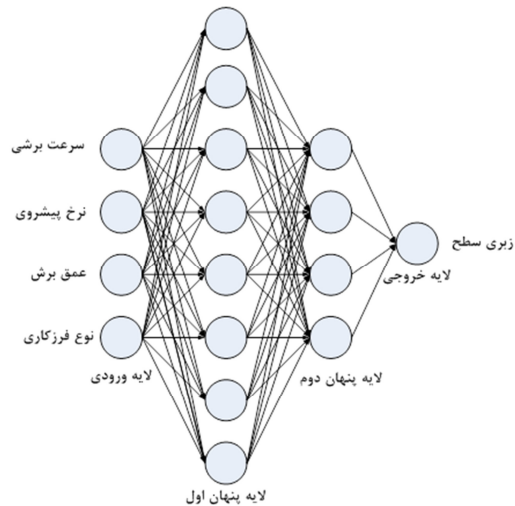
جدول ۲ پارامترهای برشی، سطوح و مقادیر آن‌ها در آزمایش‌ها

| سطح | سرعت اسپیندل (rpm) | پیشروی به ازای هر دندانه (mm/tooth) | عمق برش شعاعی (mm) | نوع فرزکاری |
|-----|--------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------|
| ۱ | ۵۰۰ | ۰/۰۵ | ۰/۳ | موافق |
| ۲ | ۸۰۰ | ۰/۱ | ۰/۶ | مخالف |
| ۳ | ۱۲۵۰ | ۰/۲ | ۰/۹ | - |

مصنوعی است که در مدل‌سازی فرآیندهای برشی، بارها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳، ۱۲]. در این تحقیق، از جعبه‌ابزار شبکه‌های عصبی نرم‌افزار متلب استفاده شده است. ۷۵٪ از نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها برای آموزش شبکه عصبی، ۱۵٪ برای اعتبارسنجی و ۱۰٪ از داده‌ها برای تست نهایی مدل ارائه شده استفاده شده‌اند. از الگوریتم لونیگ-مارکارد به‌عنوان الگوریتم یادگیری شبکه استفاده شده است که روشی سریع برای یافتن کمینه یک تابع غیرخطی چند متغیره است [۱۴]. شبکه عصبی دارای یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهانی و یک لایه خروجی است که در هر کدام از آن‌ها، چندین واحد پردازش داده‌ها که اصطلاحاً نرون نامیده می‌شود، وجود دارد. داده‌ها از طریق لایه ورودی به شبکه عصبی تحویل می‌شود تا در لایه‌های پنهان مورد پردازش قرار گیرد و به لایه خروجی منتقل گردد و نمایش داده شود. در این پژوهش، از روش پس انتشار به‌عنوان الگوریتم آموزش شبکه عصبی استفاده شده که در تحقیقات مربوط به مدل‌سازی زبری سطح، دارای سابقه است [۱۵].

با سعی و خطا و انجام مدل‌سازی‌های مختلف برای داشتن بهترین پیش‌بینی زبری سطح، شبکه عصبی رو به جلو با دو لایه پنهان که به ترتیب دارای ۸ و ۴ نرون است، به‌عنوان ساختار نهایی شبکه عصبی انتخاب شد. این مدل با ساختار ۱-۴-۸-۴ در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

برای اطمینان از این‌که آموزش شبکه عصبی به اندازه کافی و مناسب انجام شده است، از مقایسه نتایج مدل‌سازی شده با نتایج واقعی استفاده می‌شود. در شکل ۲ نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی با نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. این شکل صحت مدل‌سازی انجام‌شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، روش کار به این صورت است که تعدادی از داده‌های تجربی برای آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شود و



شکل ۱ ساختار شبکه عصبی پیشنهاد شده برای پیش‌بینی زبری سطح

می‌شود ولی افزایش سرعت برشی، آن را کاهش می‌دهد. کادیرگاما و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۸ مهمترین پارامتر مؤثر بر زبری سطح در کنارتراشی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ را نرخ پیشروی دانستند. توضیح ارتباط بین پارامترهای ماشین‌کاری و زبری سطح با مدل‌های سنتی نمی‌تواند ارتباط غیرخطی و پیچیده‌ای که در این میان وجود دارد را به‌خوبی بیان کند [۸]. به این دلیل، در سال‌های اخیر مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و بهینه‌کننده زیادی توسعه یافته‌اند که از تکنیک‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای یافتن ارتباط میان پارامترهای برشی و زبری سطح استفاده می‌کنند [۹].

در این مقاله، تأثیر پارامترهای سرعت اسپیندل (N)، پیشروی به‌ازای هر دندانه (f_z)، عمق برش شعاعی (a_r) و نوع فرزکاری (موافق یا مخالف) بر زبری سطح در فرآیند فرزکاری فولاد ۴۲۰ بررسی شده است. به‌دلیل رابطه خطی سرعت برشی با سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی با پیشروی به‌ازای هر دندانه در فرزکاری، گاهی این پارامترها بجای یکدیگر استفاده می‌شوند. برای پیش‌بینی زبری سطح از روش شبکه عصبی استفاده شده و سپس به‌کمک الگوریتم رقابت استعماری، پارامترهای بهینه برشی برای کمینه کردن مقدار زبری سطح به‌دست آمده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده آن است که تلفیق روش شبکه عصبی با الگوریتم رقابت استعماری می‌تواند با دقت مناسبی برای بینه‌سازی زبری سطح در فرآیند فرزکاری استفاده شود.

۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

آزمایش‌های کنارتراشی روی یک ماشین فرز با کنترل عددی ۲/۵ محوره انجام شده است. قطعه‌کار از جنس فولاد ضدزنگ ۴۲۰ است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده‌است. در همه آزمایش‌ها، یک ابزار فرز انگشتی روکش‌دار ۴ دندانه از جنس فولاد تندبر با قطر ۱۰ mm، فرآیند کنارتراشی را بر روی سطح جانبی یک بلوک مکعبی با ابعاد ۴۳×۵۷×۱۰۰ میلی‌متر انجام می‌دهد. همه آزمایش‌ها بدون روان‌کار انجام شده‌اند و عمق‌برش محوری در همه آن‌ها ۵mm بوده است. پارامترهای برشی بررسی شده در این تحقیق، تعداد سطوح و مقادیر آن‌ها در جدول ۲ آمده است. طراحی آزمایش‌ها به‌صورت کامل است و در مجموع ۵۴ آزمایش انجام شده است.

پس از انجام براده‌برداری، زبری سطح در سه ناحیه از سطح ماشین‌کاری شده به‌کمک دستگاه زبری‌سنج القایی اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها به‌عنوان زبری سطح آن آزمایش ثبت گردید. تحلیل‌های آماری انجام شده در این مقاله، توسط نرم‌افزار آماری مینی‌تب ۱۴ انجام شده است.

۳- نتایج و بحث

جدول ۳ سطوح پارامترهای برشی ورودی و مقادیر زبری سطح اندازه‌گیری شده در هر آزمایش را نشان می‌دهد. برای مشاهده مقدار هر پارامتر باید به جدول ۲ مراجعه شود.

۳-۱- شبکه عصبی مصنوعی

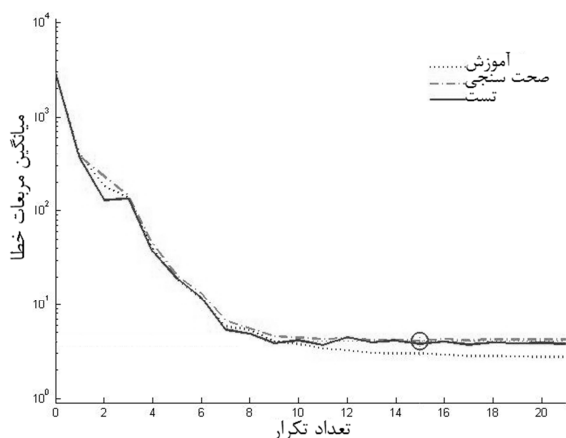
برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی یک فرآیند ماشین‌کاری مانند نیروی برشی یا زبری سطح، مدل‌های پیش‌بینی‌کننده ابزارهای مناسبی هستند [۱۱]. یکی از مشهورترین این مدل‌ها، مدل شبکه عصبی

جدول ۱ درصد ترکیبات آلیاژی استفاده شده در فولاد ضدزنگ ۴۲۰ [۱۰]

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni |
|------|------|------|--------|--------|-----------|----|----|
| ≤۱/۵ | ≤۱/۰ | ≤۱/۰ | ≤۰/۰۴۰ | ≤۰/۰۳۰ | ۱۲/۰-۱۴/۰ | - | - |

جدول ۳ مقادیر زبری سطح در آزمایش‌های تجربی

| شماره آزمایش | پارامترهای ورودی | | | | شماره آزمایش | پارامترهای ورودی | | | | شماره آزمایش | پارامترهای ورودی | | | | شماره آزمایش | | |
|--------------|---------------------------|-----|-------|-------|--------------|------------------|---------------------------|-----|-------|--------------|------------------|-----|---------------------------|-----|--------------|-------|-------|
| | زبری سطح Ra (μm) | نوع | a_r | f_z | | N | زبری سطح Ra (μm) | نوع | a_r | | f_z | N | زبری سطح Ra (μm) | نوع | | a_r | f_z |
| ۱ | ۱/۵۴ | ۱ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳۷ | ۱/۳۳ | ۱ | ۱ | ۱ | ۲ | ۱۹ | ۱/۳۹ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۲ | ۱/۶۲ | ۲ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳۸ | ۲/۵۳ | ۲ | ۱ | ۱ | ۲ | ۲۰ | ۲/۰۰ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۳ | ۱/۱۸ | ۱ | ۲ | ۱ | ۳ | ۳۹ | ۰/۸۹ | ۱ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲۱ | ۱/۶۸ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ |
| ۴ | ۳/۳۷ | ۲ | ۲ | ۱ | ۳ | ۴۰ | ۲/۵۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲۲ | ۲/۱۰ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ |
| ۵ | ۱/۰۹ | ۱ | ۳ | ۱ | ۳ | ۴۱ | ۱/۰۶ | ۱ | ۳ | ۱ | ۲ | ۲۳ | ۱/۷۸ | ۱ | ۳ | ۱ | ۱ |
| ۶ | ۳/۲۳ | ۲ | ۳ | ۱ | ۳ | ۴۲ | ۳/۶۳ | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۲۴ | ۲/۰۷ | ۲ | ۳ | ۱ | ۱ |
| ۷ | ۱/۸۴ | ۱ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴۳ | ۲/۱۳ | ۱ | ۱ | ۲ | ۲ | ۲۵ | ۲/۳۸ | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ |
| ۸ | ۲/۸۵ | ۲ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴۴ | ۲/۲۱ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲ | ۲۶ | ۲/۱۱ | ۲ | ۱ | ۲ | ۱ |
| ۹ | ۰/۶۷ | ۱ | ۲ | ۲ | ۳ | ۴۵ | ۱/۵۰ | ۱ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲۷ | ۱/۹۸ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ |
| ۱۰ | ۱/۷۵ | ۲ | ۲ | ۲ | ۳ | ۴۶ | ۲/۵۷ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲۸ | ۱/۸۱ | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ |
| ۱۱ | ۰/۷۳ | ۱ | ۳ | ۲ | ۳ | ۴۷ | ۱/۳۶ | ۱ | ۳ | ۲ | ۲ | ۲۹ | ۲/۳۸ | ۱ | ۳ | ۲ | ۱ |
| ۱۲ | ۲/۴۸ | ۲ | ۳ | ۲ | ۳ | ۴۸ | ۲/۸۴ | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳۰ | ۲/۸۷ | ۲ | ۳ | ۲ | ۱ |
| ۱۳ | ۲/۷۱ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ۴۹ | ۲/۱۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۲ | ۳۱ | ۲/۷۵ | ۱ | ۱ | ۳ | ۱ |
| ۱۴ | ۳/۰۵ | ۲ | ۱ | ۳ | ۳ | ۵۰ | ۱/۹۰ | ۲ | ۱ | ۳ | ۲ | ۳۲ | ۱/۹۴ | ۲ | ۱ | ۳ | ۱ |
| ۱۵ | ۲/۶۵ | ۱ | ۲ | ۳ | ۳ | ۵۱ | ۱/۶۲ | ۱ | ۲ | ۳ | ۲ | ۳۳ | ۲/۷۴ | ۱ | ۲ | ۳ | ۱ |
| ۱۶ | ۳/۶۸ | ۲ | ۲ | ۳ | ۳ | ۵۲ | ۲/۶۲ | ۲ | ۲ | ۳ | ۲ | ۳۴ | ۲/۳۴ | ۲ | ۲ | ۳ | ۱ |
| ۱۷ | ۲/۹۴ | ۱ | ۳ | ۲ | ۳ | ۵۳ | ۱/۲۶ | ۱ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳۵ | ۲/۰۱ | ۱ | ۳ | ۲ | ۱ |
| ۱۸ | ۳/۳۸ | ۲ | ۳ | ۳ | ۳ | ۵۴ | ۳/۶۹ | ۲ | ۳ | ۳ | ۲ | ۳۶ | ۲/۸۰ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ |



شکل ۲ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی در شبکه عصبی با مقادیر زبری سطح حاصل از آزمایش‌های تجربی

مسئله عبارتند از: سرعت اسپیندل از ۵۰۰ تا ۱۲۵۰ rpm، پیشروی به‌ازای هر دندانه از ۰/۰۵ تا ۰/۲ mm/tooth، عمق برش شعاعی از ۰/۳ تا ۰/۹ mm و نوع فرزکاری موافق یا مخالف. با توجه به اینکه آزمایش‌ها روی یک ماشین فرز با کنترل عددی انجام شده‌است، پارامترهای برشی در حل مسئله بهینه‌سازی به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای بهینه حاصل از الگوریتم رقابت استعماری عبارتند از: سرعت اسپیندل ۸۵۴ rpm، پیشروی به‌ازای هر دندانه ۰/۰۵ mm/tooth، عمق برش شعاعی ۰/۴۹ mm و نوع فرزکاری موافق. در این حالت، مقدار بهینه زبری سطح پیش‌بینی شده توسط الگوریتم، ۰/۹۵ μm است.

شکل ۴ تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش شعاعی و نوع فرزکاری بر زبری سطح را نشان می‌دهد. از میان پارامترهای ورودی، آنالیز آماری اطلاعات موجود در جدول ۳ نشان دهنده تأثیر بیشتر نوع فرزکاری و

تعدادی از آن‌ها برای صحت‌سنجی مدل ساخته شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نهایت، ۱۰٪ از نتایج تجربی برای آزمایش مدل ساخته‌شده توسط شبکه عصبی بکار می‌روند. در شکل ۲ این ۱۰٪ از آزمایش‌ها با نام "تست" معرفی شده‌است و تطابق خوبی با مدل ارائه شده دارد.

۲-۳- بهینه‌سازی با الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری یکی از روش‌های نسبتاً جدید فرا ابتکاری در حوزه محاسبات تکاملی است که با مدل‌سازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی-سیاسی، به یافتن پاسخ مسائل مختلف بهینه‌سازی می‌پردازد [۱۶]. از لحاظ کاربرد، این الگوریتم در دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و غیره قرار می‌گیرد. همانند همه الگوریتم‌های قرار گرفته در این دسته، الگوریتم رقابت استعماری نیز مجموعه اولیه‌ای از جواب‌های احتمالی را تشکیل می‌دهد که با عنوان "کشور" شناخته می‌شوند. الگوریتم رقابت استعماری، این جواب‌های اولیه (کشورها) را به تدریج بهبود داده و در نهایت، جواب مناسب مسئله بهینه‌سازی (کشور مطلوب) را به‌دست می‌آورد. شکل ۳ مراحل انجام الگوریتم رقابت استعماری را نشان می‌دهد. توضیح کامل این الگوریتم در مرجع [۱۶] ذکر شده است. بطورکلی، الگوریتم رقابت استعماری به هر نوع مسئله بهینه‌سازی بدون هیچ محدودیتی قابل اعمال است. همین موضوع باعث شده است تا از این الگوریتم در حل بسیاری از مسائل در حوزه مهندسی برق، مکانیک، صنایع، مدیریت، عمران، هوش مصنوعی و غیره استفاده شود. جستجوها نشان می‌دهد که استفاده از این الگوریتم در بهینه‌سازی فرآیندهای برشی ازجمله در بهینه کردن زبری سطح تاکنون انجام نشده است.

مسئله بهینه‌سازی در این مقاله، کمینه کردن زبری سطح است و قیدهای

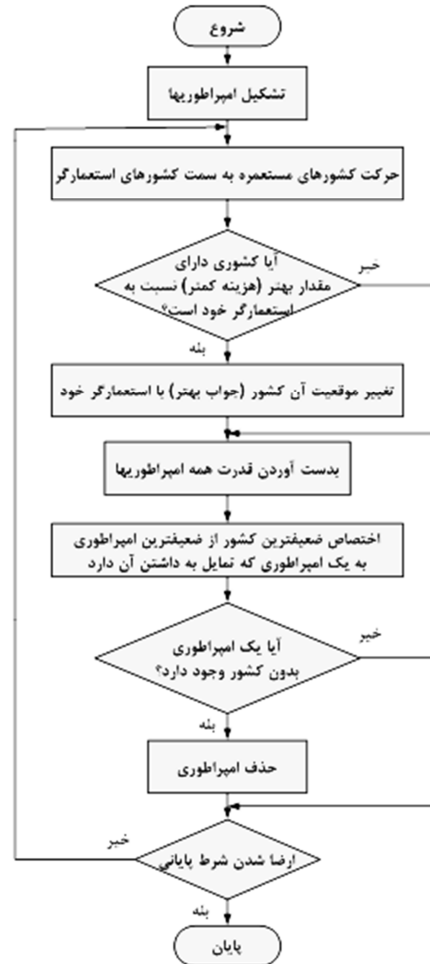
1. Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

۴- نتیجه‌گیری

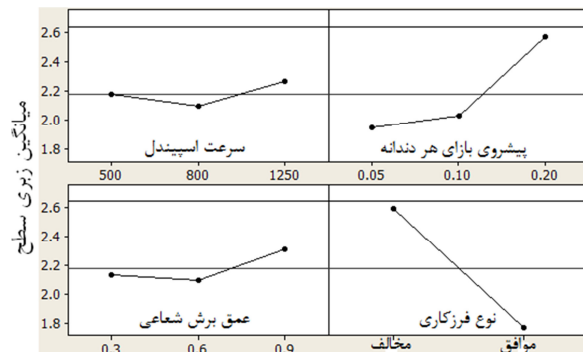
در این مقاله، تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش شعاعی و نوع فرزکاری بر زبری سطح در عملیات فرزکاری فولاد ضد زنگ ۴۲۰ بررسی شده است. طراحی آزمایش‌ها به صورت کامل بوده و در مجموع، ۵۴ آزمایش انجام شده است. از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی داده‌ها و پیش‌بینی زبری سطح استفاده شده و سپس این مدل، در الگوریتم رقابت استعماری به منظور یافتن پارامترهای برشی بهینه برای داشتن مقدار کمینه زبری سطح به کار رفته است. ترکیب این دو روش برای بهینه‌سازی فرآیندهای برشی تاکنون انجام نشده است. مدل حاصل از شبکه عصبی مصنوعی با دقت بالایی مقادیر زبری سطح را پیش‌بینی کرده است. آنالیز آماری نتایج تجربی نشان می‌دهد که نوع فرزکاری و نرخ پیشروی به ترتیب بیشترین اثر را بر کیفیت سطح دارند به گونه‌ای که فرزکاری موافق سطح بهتری نسبت به فرزکاری مخالف دارد و با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح افزایش می‌یابد. مقادیر بهینه حاصل از الگوریتم رقابت استعماری برای داشتن کمترین زبری سطح عبارتند از: سرعت اسپیندل ۸۵۴ rpm، پیشروی به‌ازای هر دندانه ۰/۰۵ mm/tooth، عمق برش شعاعی ۰/۴۹ mm و نوع فرزکاری موافق. انتخاب نوع فرزکاری موافق و کمترین حد مجاز برای پیشروی توسط الگوریتم رقابت استعماری برای داشتن کمترین زبری سطح در تطابق کامل با یافته‌های سایر محققان است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که ترکیب روش شبکه عصبی با الگوریتم رقابت استعماری می‌تواند با دقت مناسبی برای بهینه‌سازی فرآیندهای برشی مورد استفاده قرار گیرد.

۵- مراجع

- [1] *The Atlas Specialty Metals-Technical Handbook of Stainless Steels*, 2010; <http://www.atlasmetals.com.au>
- [2] H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, M. H. Saadatbakhsh, A. R. Omiddodman, Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 50-60, 2015. (In Persian)
- [3] P. G. Benardos, G. Vosniakos, Predicting Surface Roughness in Machining: A Review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 833-844, 2003.
- [4] G. Kant, K. S. Sangwan, Predictive Modelling and Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using Artificial Neural Network Coupled with Genetic Algorithm, *Procedia CIRP*, Vol. 31, pp. 453 - 458, 2015.
- [5] O. E. E. K. Omar, T. El-Wardany, E. Ng, M. A. Elbestawi, An improved cutting force and surface topography prediction model in end milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1263-1275, 2007.
- [6] M. A. U. Patwari, A. K. M. Nurul Amin, M. D. Arif, Optimization of surface roughness in end milling of medium carbon steel by coupled statistical approach with genetic algorithm, in *The first international conference on interdisciplinary research and development*, Thailand, 2011.
- [7] K. Kadirgama, M. M. Noor, N. M. Zuki, M. M. Rahman, M. R. M. Rejab, R. Daud, K. A. Abou-El-Hossein, Optimization of surface roughness in end milling on mould aluminium alloys (Al6060-T6) using response surface model and radian basis function network, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 209-214, 2008.
- [8] G. Kant, V. V. Rao, K. S. Sangwan, Predictive Modeling of Turning Operations using Response Surface Methodology, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 307, pp. 170-173, 2013.
- [9] V. Mugendiran, A. Gnanavelbabu, R. Ramadoss, Parameter optimization for surface roughness and wall thickness on AA5052 Aluminium alloy by incremental forming using response surface methodology, *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 1991 - 2000, 2014.
- [10] M. Zhou, X. J. Wang, B. Ngoi, J. Gan, Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, pp. 243-251, 2002.
- [11] F. Djavaanroodi, B. Omranpour, M. Sedighi, Artificial neural network modeling of ECAP process, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, pp. 276-281, 2013.
- [12] M. Nouri Khajavi, E. Nasernia, Online diagnosis of tool wear in milling operation using vibration analysis and intelligent methods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 261-269, 2015. (In Persian)
- [13] S. Ranganathan, T. Senthilvelan, G. Sriram, Evaluation of Machining



شکل ۳ مراحل انجام الگوریتم رقابت استعماری [۱۶]



شکل ۴ تأثیر سرعت اسپیندل، پیشروی به‌ازای هر دندانه، عمق برش شعاعی و نوع فرزکاری بر زبری سطح

نرخ پیشروی بر زبری سطح نسبت به دو پارامتر دیگر یعنی سرعت برشی و عمق برش شعاعی است. به‌دست آمدن کمترین حد پیشروی مجاز از الگوریتم رقابت استعماری برای داشتن کمترین زبری سطح در تطابق کامل با یافته‌های سایر محققان است [۵-۷]. کیفیت بهتر سطح در فرزکاری موافق نسبت به مخالف نیز به دلیل صلبیت بیشتر حالت موافق نسبت به مخالف است و با سایر منابع هم‌خوانی دارد [۱۷].

- Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, pp. 583-605, 1999.
- [16] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, in *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, pp.4661-4667, 2007.
- [17] <http://www.harveytool.com>
- Parameters of Hot Turning of Stainless Steel (Type 316) by Applying ANN and RSM, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 10, pp. 1131-1141, 2010.
- [14] L. V. Fausett, *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms and Application*, Prentice -Hall, New York, 1994.
- [15] H. Y. Tsai, C. Chen, S. J. Lou, In-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations. *International*