



## مدل سازی و بهینه سازی فرآیند لپن کاری فولاد 440c توسط شبکه عصبی و الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات

محمد شفیعی علویجه<sup>1</sup>، حسین امیرآبادی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، hamirabadi@birjand.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 27 خرداد 1396  
پذیرش: 21 تیر 1396  
ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:

لپن کاری

بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات

زبری سطح

نرخ برداشت ماده

تختی

### چکیده

مهم ترین مشکل در فرآیند لپن کاری پایین بودن نرخ برداشت ماده است که سبب افزایش هزینه و زمان تولید می شود. بنابراین در فرآیند لپن کاری انتخاب شرایطی که بتواند علاوه بر تولید قطعاتی با عدم تختی و زبری سطح مورد نیاز نرخ برداشت ماده بالایی نیز داشته باشد بسیار مهم و ضروری است. در این تحقیق در فرآیند لپن کاری تخت یک طرفه اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری و فشار لپن کاری بر نرخ برداشت ماده، عدم تختی و زبری سطح قطعاتی از جنس فولاد 440c به روش تجربی (آزمایشگاهی) مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه اثر پارامترهای بیان شده بر نرخ برداشت ماده، عدم تختی و زبری سطح قطعات لپن کاری شده توسط شبکه عصبی مصنوعی مدل سازی شده و در نهایت با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات به بهینه سازی هم زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده پرداخته و جبهه پارتو مربوطه به دست آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات می توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را با نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این روش علاوه بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می یابد.

## Modeling and optimizing lapping process of 440C steel by Neural Network and Multi-objective particle swarm optimization algorithm

Mohammad Shafiei Alavijeh<sup>1</sup>, Hossein Amirabadi<sup>1\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

\* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 17 June 2017  
Accepted 12 July 2017  
Available Online 09 August 2017

#### Keywords:

Lapping  
Multi-Objective Particle Swarm Optimization  
Surface Roughness  
Material Removal Rate  
Flatness

### ABSTRACT

The most essential problem in lapping process is low material removal rate which leads to increase in production costs and time. Thus, in this process it is essential to select a condition that, besides producing pieces with required flatness and roughness has a high material removal rate. In this research effects of parameters such as abrasive particle size, abrasive particles concentration in slurry, and lapping pressure on material removal rate, flatness and surface roughness were studied by experimental method in single sided lapping of flat workpieces made of 440c steel. In the following, effect of the aforementioned parameters on material removal rate, flatness and surface roughness of lapped surface has been modeled using artificial neural network. Finally, by exerting multi-objective particle swarm optimization, simultaneous optimization of material removal rate, surface roughness and flatness of lapping pieces has been conducted and related Pareto front has been obtained. Obtained results show that by using Multi-objective particle swarm optimization algorithm we can produce workpieces with required surface roughness and flatness with high material removal rate. Consequently, by using this method, moreover, producing workpieces with desired quality, production cost and time would decrease.

### 1- مقدمه

امروزه با توسعه روزافزون صنعت نیاز به ساخت قطعاتی با دقت و کیفیت سطح بسیار بالا پیش از پیش احساس می شود که این دقت و کیفیت سطح بسیار بالا با روش های تولید مرسوم مانند سنگ زنی قابل حصول نیست؛ بنابراین در صنعت استفاده از روش هایی که توان ساخت قطعاتی با دقت و کیفیت سطح بسیار بالا را داشته باشند بیش از پیش گسترش یافته است.

فرآیند لپن کاری یکی از این روش های تولیدی است. فرآیند لپن کاری<sup>1</sup> فرآیندی سایشی است که معمولاً جهت پرداخت کاری نهایی مورد استفاده قرار می گیرد. برداشت ماده در این فرآیند به وسیله ذرات ساینده ای که با سیالی مخلوط شده و بین ابزار لپن کاری و قطعه کار ریخته یا مالیده می شوند، انجام می شود [1,2].

<sup>1</sup> Lapping

### Please cite this article using:

M. Shafiei Alavijeh, H. Amirabadi, Modeling and optimizing lapping process of 440C steel by Neural Network and Multi-objective particle swarm optimization algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 201-212, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

یک طرفه قطعاتی از جنس فولاد بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعه کار بررسی کرده اند. آن ها برای انجام آزمایش ها از ذرات ساییده اکسید آلومینیومی<sup>5</sup> و دستگاه لپن کاری لپ مستر<sup>6</sup> مدل 12C استفاده کرده اند. آن ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه گرفته اند که پارامترهای اندازه ذرات ساییده، زمان لپن کاری، فشار لپن کاری و سرعت چرخشی صفحه لپ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح قطعات تولیدی و پارامترهای اندازه ذرات ساییده، سرعت چرخشی صفحه لپ و فشار لپن کاری به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت ماده دارد. آن ها مشاهده کرده اند که افزایش زمان لپن کاری و سرعت چرخشی صفحه لپ و کاهش اندازه ذرات ساییده و فشار لپن کاری سبب کاهش زبری سطح قطعات تولیدی، همچنین افزایش اندازه ذرات ساییده، فشار لپن کاری و سرعت صفحه لپ سبب افزایش نرخ برداشت ماده می شود.

جیان و همکاران [8] به بهینه سازی فرآیند لپن کاری تخت یک طرفه پرداخته اند. آن ها اثر پارامترهای فشار لپن کاری، اندازه ذرات ساییده، سرعت چرخشی صفحه لپ، درصد وزنی ذرات ساییده در دوغاب ساییده<sup>7</sup> و نرخ تغذیه دوغاب ساییده را بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده بررسی کرده اند. آن ها نتیجه گرفته اند که فشار 11 مگاپاسکال، سرعت صفحه لپ 35 دور بر دقیقه، میزان جریان دوغاب ساییده 228.75 میلی لیتر بر دقیقه، اندازه ذرات ساییده 7.95 و درصد وزنی ذرات ساییده در دوغاب 25% شرایط بهینه برای انجام این فرآیند لپن کاری است.

وانگ و همکاران [9] از تئوری ابتکاری حل مسأله (TRIZ)<sup>8</sup> برای بهینه سازی لپن کاری تخت یک طرفه یا قوت کبود استفاده کرده اند. آن ها اثر پارامترهای نیروی لپن کاری، اندازه ذرات ساییده، سرعت چرخشی صفحه لپ، تختی صفحه لپ و جریان دوغاب ساییده را بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده بررسی کرده اند. آن ها با تنظیم مقادیر نیروی لپن کاری، سرعت دورانی، اندازه ذرات و غیره به بهینه سازی فرآیند لپن کاری پرداخته اند.

یوان و همکاران [10] اثر پارامترهای فشار لپن کاری، سرعت چرخشی صفحه لپ و درصد وزنی ذرات ساییده در دوغاب لپن کاری را بر زبری سطح قطعات تولیدی در فرآیند لپن کاری تخت یک طرفه قطعاتی از جنس سرامیک را با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی بررسی کرده اند. آن ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه گرفته اند که درصد وزنی ذرات ساییده در دوغاب در حدود 46%، سرعت چرخشی صفحه لپ در حدود 44% و فشار لپن کاری در حدود 8% بر تغییرات زبری سطح قطعات تولیدی مؤثر است. آن ها نتیجه گرفته اند که سرعت 10 دور بر دقیقه، فشار 30 کیلو پاسکال و درصد وزنی ذرات ساییده در دوغاب به میزان 10% شرایط بهینه بوده و کمترین میزان زبری سطح (Ra) که برابر با 10 نانومتر در این شرایط مشاهده شده است.

پارات و یاراسو [11,12] اثر پارامترهایی چون نیروی لپن کاری، زمان لپن کاری، جنس ذرات ساییده، غلظت ذرات ساییده در دوغاب و نوع سیال لپن کاری بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات تولیدی در فرآیند لپن کاری تخت یک طرفه قطعاتی استوانه ای شکل از جنس چدن با قطر خارجی 50 میلی متر و قطر داخلی 45 میلی متر را با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی بررسی کرده اند. آن ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه

لپن کاری یک طرفه سطوح تخت<sup>1</sup> پرکاربردترین فرآیند لپن کاری در صنعت است؛ بنابراین در این تحقیق نیز این نوع فرآیند لپن کاری مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از مهم ترین اهداف استفاده از فرآیند لپن کاری تخت یک طرفه کاهش خطای تختی<sup>2</sup> و زبری سطح<sup>3</sup> قطعات است. کاهش خطای تختی و زبری سطح تأثیر بسیار زیادی بر افزایش عمر، کارایی و عملکرد صحیح قطعات تولیدی دارد و سبب کاهش اصطکاک و افزایش آب بندی می شود. هر چند فرآیند لپن کاری مزایای بسیار زیادی از جمله رسیدن به دقت های ابعادی و هندسی بسیار بالا، کاهش تنش های سطحی، کاهش زبری سطح، کاهش عیوب سطحی و غیره را داراست، ولی نرخ برداشت ماده در این فرآیند بسیار پایین است که این امر سبب افزایش قابل ملاحظه هزینه و زمان تولید می گردد؛ بنابراین در این فرآیند انتخاب شرایطی که بتواند علاوه بر تولید قطعاتی با زبری سطح و خطای تختی پایین، نرخ برداشت ماده بالایی نیز داشته باشد بسیار مهم و ضروری است [3,1].

در ادامه برخی از مرتبط ترین تحقیقات انجام شده به این تحقیق آورده شده است. چونگ و همکاران [4] اثر فشار لپن کاری و استفاده هم زمان از ذرات ساییده بزرگ و کوچک را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده با استفاده از ماشین لپن کاری تخت یک طرفه لجیتک پی م 5<sup>4</sup> با انجام یک سری آزمایش بررسی کرده اند. آن ها نتیجه گرفته اند که افزایش فشار لپن کاری تأثیر قابل ملاحظه ای بر زبری سطح ندارد، ولی سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین استفاده هم زمان از ذرات ساییده بزرگ و کوچک با نسبت برابر بدون افزایش قابل ملاحظه زبری سطح قطعات لپن کاری شده سبب افزایش نرخ برداشت ماده می شود.

سو و همکاران [5] در فرآیند لپن کاری تخت با ذرات ساییده الماسه اثر پارامترهای سرعت چرخشی صفحه لپ، سرعت حمل کننده یا قفسه لپن کاری، فشار لپن کاری و اندازه ذرات ساییده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده بررسی کرده اند. آن ها نتیجه گرفته اند که اندازه ذرات ساییده مهم ترین عامل مؤثر بر زبری سطح قطعه کار و نرخ برداشت ماده بوده و سرعت چرخشی صفحه لپ، فشار لپن کاری و سرعت قفسه لپن کاری تأثیر قابل ملاحظه ای بر زبری سطح قطعات لپن کاری شده ندارند. آن ها مشاهده کرده اند که بزرگ تر شدن ذرات ساییده سبب افزایش زبری سطح قطعات لپن کاری شده و نرخ برداشت ماده می شود، همچنین افزایش سرعت قفسه لپن کاری و افزایش فشار سبب افزایش در نرخ برداشت ماده شده و افزایش سرعت چرخشی صفحه لپ در ابتدا نرخ برداشت ماده را افزایش داده، ولی پس از رسیدن به یک مقدار مشخص سبب کاهش نرخ برداشت ماده می شود.

گولو و کلیملی [6] اثر پارامترهای زمان و فشار لپن کاری را بر زبری سطح قطعات لپن کاری شده بررسی کرده اند. در این تحقیق قطعه کار از جنس فولاد ریخته گری شده GG6 و با ضخامت 15 میلی متر، قطر خارجی 70 میلی متر و قطر داخلی 50 میلی متر انتخاب شده است. آن ها نتیجه گرفته اند که زمان لپن کاری 25 دقیقه و فشار لپن کاری 689.5 کیلو پاسکال شرایط بهینه بوده و کمترین میزان زبری سطح قطعات تولید شده که برابر با 0.2 میکرومتر است در این شرایط مشاهده می شود.

ژانگ و همکاران [7] اثر پارامترهای زمان لپن کاری، سرعت چرخشی صفحه لپ، فشار لپن کاری و اندازه ذرات ساییده را در فرآیند لپن کاری تخت

<sup>5</sup> Aluminium Oxide

<sup>6</sup> Lapmaster

<sup>7</sup> slurry

<sup>8</sup> Theory of Inventive Problem Solving

<sup>1</sup> Single Sided Lapping of Flat Workpieces

<sup>2</sup> Flatness

<sup>3</sup> Surface Roughness

<sup>4</sup> Logitech PM5

می‌شود.

ایاما و همکاران [19] با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس کاربید سماتنه<sup>8</sup> اثر پارامترهای اندازه ذرات ساییده و زمان لپن‌کاری را بر زبری سطح و نرخ بهبود زبری سطح قطعه‌کار بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که کوچک‌تر شدن ذرات ساییده و افزایش زمان لپن‌کاری سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود، ولی پس از رسیدن به زبری سطح مشخصی برای هر اندازه از ذرات ساییده، افزایش زمان دیگر سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده نمی‌شود.

ملندا و بارلیسکی [20] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس اکسید آلومینیوم با استفاده از دستگاه لپن‌کاری ابرالپ<sup>9</sup> 380 اثر پارامترهای اندازه ذرات ساییده، زمان و فشار لپن‌کاری را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده و دریافتند کوچک‌تر شدن ذرات ساییده و افزایش زمان لپن‌کاری سبب کاهش نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود. افزایش فشار لپن‌کاری تأثیر مشخصی بر نرخ برداشت ماده ندارد، یعنی گاهی سبب افزایش و گاهی سبب کاهش نرخ برداشت ماده می‌شود.

ژو و همکاران [21] اثر استفاده هم‌زمان از ذرات ساییده بزرگ و کوچک را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعه‌کار در فرآیند لپن‌کاری با استفاده از ماشین لپن‌کاری تخت یک‌طرفه لجیتک پی‌ام 5 بررسی و مشاهده کرده‌اند که بیشترین نرخ برداشت ماده و زبری سطح هنگامی به دست می‌آید که از ذرات ساییده کوچک و بزرگ با نسبت برابر استفاده شود. کمترین نرخ برداشت ماده و زبری سطح نیز هنگامی به دست می‌آید که از ذرات ساییده کوچک به‌طور خالص استفاده گردد.

یوان و همکاران [22] اثر پارامترهای اندازه ذرات ساییده، سرعت و فشار لپن‌کاری را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده را در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس بلور کوارتز<sup>10</sup> بررسی و مشاهده کرده‌اند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساییده، افزایش سرعت و فشار لپن‌کاری سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین افزایش سرعت و کوچک‌تر شدن ذرات ساییده سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

در این تحقیق برای نخستین بار از شبکه عصبی مصنوعی<sup>11</sup> برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده استفاده شده است. برخلاف سایر تحقیقات انجام‌شده در زمینه فرآیندهای لپن‌کاری که بیشتر به بهینه‌سازی تک‌هدفه پارامترهای مؤثر بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطاهای هندسی قطعات تولیدی پرداخته‌اند، برای نخستین بار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات<sup>12</sup> به بهینه‌سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه‌کار پرداخته و بهینه پارتو<sup>13</sup> و جبهه پارتو<sup>14</sup> مربوطه ارائه شده است.

در ادامه این مقاله نخست نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها شرح داده شده، سپس با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مدل‌هایی برای پیش‌بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، عدم تختی و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده با استفاده از مقادیر اندازه ذرات ساییده، درصد وزنی

گرفته‌اند که جنس ذرات ساییده بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات تولیدی دارد، همچنین افزایش نیروی لپن‌کاری، کاهش زمان لپن‌کاری، استفاده از ذرات ساییده از جنس اکسید آلومینیوم به جای کاربید سیلیسیم<sup>1</sup> و استفاده از سیال روغنی به جای سیال از جنس نفت سفید سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین افزایش نیرو و زمان لپن‌کاری، استفاده از ذرات ساییده از جنس اکسید آلومینیوم به جای ذرات ساییده کاربید سیلیسیم<sup>2</sup> و استفاده از سیال روغنی به جای سیال از جنس نفت سفید سبب کاهش زبری سطح قطعات تولیدی می‌شود.

دشپاند و همکاران [13] در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس برنز و فولاد ضدزنگ اثر جنس ذرات ساییده را بر نرخ برداشت ماده، تختی، زبری و توپوگرافی<sup>3</sup> سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده و دریافتند نوع ذرات ساییده تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نرخ برداشت ماده ندارد، ولی بر زبری و توپوگرافی سطح قطعات لپن‌کاری شده تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارد.

آن و پارک [14] اثر پارامترهای اندازه ذرات ساییده، فشار لپن‌کاری و غلظت ذرات ساییده در دوغاب را در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعات لپن‌کاری از جنس آلومینا<sup>4</sup>، فریت Ni-Zn<sup>4</sup> و شیشه سیلیکات سدیم<sup>5</sup> بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده و با استفاده از روش آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند.

دملو و گوتزو [15] در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس کوارتز<sup>6</sup> با استفاده از دستگاه لپن‌کاری لجیتک پی‌ام 4<sup>7</sup> اثر پارامترهای زمان لپن‌کاری و اندازه ذرات ساییده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند.

سورس [16] اثر پارامترهای فشار لپن‌کاری، موقعیت قرار گرفتن قطعه در قفسه لپن‌کاری، سرعت صفحه لپ، غلظت ذرات ساییده در دوغاب، نوع سیال لپن‌کاری، نرخ تغذیه دوغاب ساییده، اندازه ذرات ساییده، تعداد شیارهای روی صفحه لپ، تعداد قطعات و نحوه قرارگیری آن‌ها روی صفحه لپ را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده را در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه بررسی کرده و دریافتند که افزایش فشار لپن‌کاری، افزایش سرعت صفحه لپ، افزایش نرخ تغذیه دوغاب ساییده و بزرگ‌تر شدن ذرات ساییده سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود. وجود یا نبود و همچنین تعداد شیارهای شعاعی صفحه لپ تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نرخ برداشت ماده نمی‌گذارد.

لامبروپولوس و همکاران [17] در فرآیند لپن‌کاری تخت اثر اندازه ذرات ساییده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده و نتیجه بر آن شده است که بزرگ‌تر شدن ذرات ساییده سبب افزایش زبری سطح و نرخ برداشت ماده می‌شود.

آسکانیو و همکاران [18] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس فولاد AISI 1045، اثر اندازه ذرات ساییده، زمان و فشار لپن‌کاری را بر میزان ماده برداشته‌شده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساییده، افزایش فشار و افزایش زمان لپن‌کاری سبب افزایش برداشت ماده، همچنین کوچک‌تر شدن ذرات ساییده، کاهش فشار و افزایش زمان لپن‌کاری سبب کاهش زبری سطح

<sup>8</sup> Cemented Carbide

<sup>9</sup> ABRALAP 380

<sup>10</sup> Quartz Crystal

<sup>11</sup> Artificial Neural Network

<sup>12</sup> Multi-Objective Particle Swarm Optimization

<sup>13</sup> Pareto Optimal Solutions

<sup>14</sup> Pareto Front

<sup>1</sup> Silicon Carbide

<sup>2</sup> Topography

<sup>3</sup> Alumina

<sup>4</sup> Ni-Zn Ferrite

<sup>5</sup> Sodium Silicate Glass

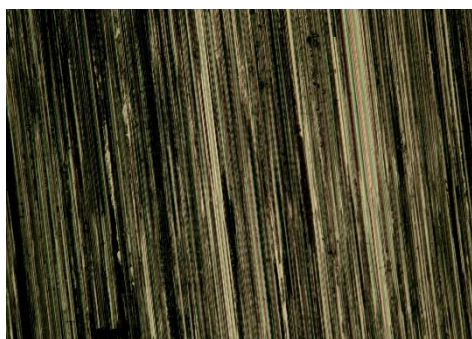
<sup>6</sup> Quartz

<sup>7</sup> Logithec PM4

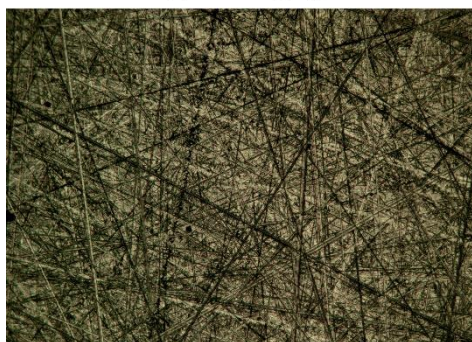
در شکل 2-a تصویر بزرگ‌نمایی سطح قطعه کار سنگ‌زنی و آماده شده برای انجام فرآیند لپن کاری نشان داده شده است. در شکل 2-b سطح قطعه کار پس از انجام فرآیند لپن کاری نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برخلاف سطح قطعه سنگ‌زنی شده که دارای شیارهایی در یک جهت مشخص، سطح قطعه لپن کاری شده دارای شیارهایی در جهت مختلف است که هر کدام از این شیارها به صورت تصادفی در یک جهت قرار گرفته‌اند. وجود شیارهای بی‌جهت<sup>2</sup> در سطح قطعات لپن کاری شده سبب افزایش قابلیت نگهداری روانکار<sup>3</sup> در قطعاتی می‌شود که روی یکدیگر می‌لغزند [23,20].

در این تحقیق سه پارامتر فشار لپن کاری، اندازه ذرات ساینده و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری به عنوان عوامل کنترلی<sup>4</sup> در نظر گرفته شده و تأثیر این پارامترها بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات تولیدی بررسی شده است. سایر عوامل تأثیرگذار بر فرآیند لپن کاری برای افزایش دقت نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها تا حد امکان ثابت نگهداشته شده‌اند.

تمام آزمایش‌ها در دمای محیط کارگاه انجام شده و مدت زمان انجام فرآیند لپن کاری در هر آزمایش 60 دقیقه است. دوغاب ساینده مورد استفاده در آزمایش‌ها از ذرات ساینده‌ای از جنس اکسید آلومینیوم که با سیال لپن کاری مخلوط و تشکیل شده است. هنگام انجام آزمایش‌ها دوغاب ساینده با نرخ ثابت 2 میلی‌لیتر بر دقیقه بر صفحه لپ ریخته می‌شود. قطعات مورد استفاده در آزمایش‌ها دارای زبری سطح اولیه  $R_a \pm 950$  نانومتر و عدم تختی اولیه  $5.598 \pm 0.311$  میکرومتر است. برای اندازه‌گیری زبری سطح قطعات پیش و پس از فرآیند لپن کاری از دستگاه زبری‌سنج سورف‌تست



(a) before lapping



(b) after lapping

Fig. 2 Workpiece surface before and after lapping

شکل 2 سطح قطعه کار قبل و بعد از لپن کاری

ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری و فشار لپن کاری به دست آورده شده و در نهایت با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه ازدحام ذرات به بهینه‌سازی نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده پرداخته شده است.

## 2- مواد و تجهیزات مورد نیاز و روش انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق از دستگاه لپن کاری لپ‌مستر 15<sup>1</sup> که در شکل 1 نشان داده شده برای انجام آزمایش‌های فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه استفاده شده است. قطعات مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد 440c با سختی HV 620 است. قطعات به صورت استوانه‌هایی با قطر 38.1 میلی‌متر و ارتفاع 10 میلی‌متر است. آنالیز شیمیایی قطعات مورد استفاده در این تحقیق به وسیله دستگاه کوانتومتر ARL 3560 OES انجام شده و نتایج آن در جدول 1 نشان داده شده است.

به دلیل پایین بودن نرخ برداشت ماده در فرآیند لپن کاری و هزینه بالای این فرآیند، معمولاً پیش از انجام فرآیند لپن کاری با استفاده از فرآیندهای پرداخت کاری دیگر، سطح قطعه کار پرداخت کاری شده و در نتیجه کیفیت قطعه کار افزایش و خطاهای ابعادی و هندسی قطعه کاهش داده می‌شود؛ بنابراین مقدار اضافه بار کمتری برای فرآیند لپن کاری باقی خواهد ماند و در نتیجه هزینه و زمان تولید کاهش می‌یابد. در صنعت معمولاً پیش از فرآیند لپن کاری عملیات سنگ‌زنی روی قطعه کار صورت می‌گیرد [24,23]. در این تحقیق نیز پیش از انجام فرآیند لپن کاری سطح قطعات سنگ‌زنی شده است.



Fig. 1 LAPMASTER 15 lapping machine

شکل 1 دستگاه لپن کاری LAPMASTER 15

جدول 1 ترکیب شیمیایی قطعات کار از جنس فولاد 440c

Table 1 Chemical composition of 440c steel workpieces

عناصر شیمیایی	آهن	کربن	منگنز	سیلیسیم	مولیبدن	کروم
درصد	فلز	1.09	0.43	0.40	0.49	17.26
وزنی	پایه					

<sup>1</sup> LAPMASTER 15

<sup>2</sup> Undirected Processing Traces

<sup>3</sup> Lubricant Retention

<sup>4</sup> Signal Factor

نیاز برای انجام هر آزمایش را تنظیم کرد.

پس از قرار دادن قطعه کار در قفسه لپن کاری، دستگاه لپن کاری دوباره به مدت 60 دقیقه با سرعت صفحه لپ 50 دور بر دقیقه روشن می شود. پس از اتمام هر آزمایش ابتدا قطعه کار تمیز شده سپس وزن، زبری سطح و عدم تختی آن اندازه گیری می شود. نتایج به دست آمده از آزمایش ها در جدول 3 نشان داده شده است.

### 3- نتایج

#### 3-1- اثر فشار لپن کاری بر نتایج فرآیند لپن کاری

اثر تغییرات فشار لپن کاری بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه لپن کاری شده به ترتیب در شکل های 3-5 نشان داده شده است. همان طور که در شکل های 3 و 4 مشاهده می شود در مقادیر کوچک فشار لپن کاری با افزایش فشار لپن کاری به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده افزایش می یابد، ولی با عبور فشار لپن کاری از مقدار معینی (20 کیلوپاسکال) مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده شروع به کاهش می کند؛ دلیل این پدیده این است که در ابتدا افزایش فشار لپن کاری سبب افزایش عمق خراش های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه کار و در نتیجه افزایش نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده می شود. پس از رسیدن به فشار مشخصی افزایش فشار لپن کاری سبب خرد شدن ذرات ساینده و یا فرو رفتن بیش از حد ذرات ساینده در صفحه لپ می شود در نتیجه نرخ برداشت ماده و زبری سطح شروع به کاهش می کند.

بر اساس شکل 5 افزایش فشار لپن کاری سبب کاهش خطای تختی قطعات لپن کاری شده می شود. افزایش فشار لپن کاری سبب افزایش فشار بر سطح قطعه کار شده و در نتیجه برجستگی های روی سطح قطعه کار هموارتر شده و عدم تختی قطعات لپن کاری شده کاهش می یابد.

#### 3-2- اثر درصد وزنی ذرات ساینده بر نتایج فرآیند لپن کاری

اثر تغییرات درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده به ترتیب در شکل های 6-8 نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود در مقادیر کوچک درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری با افزایش درصد وزنی ذرات ساینده به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده افزایش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده کاهش می یابد، ولی با عبور درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری از مقدار معینی (20%)،

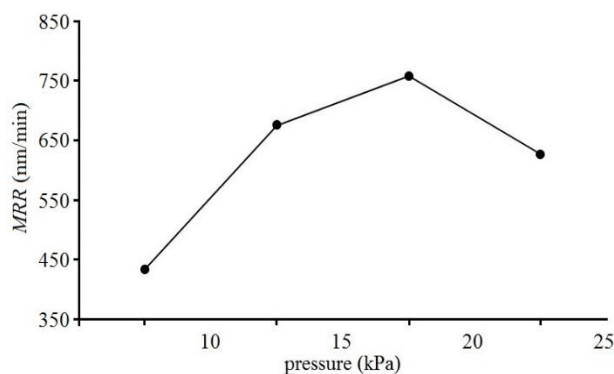


Fig. 3 Effect of lapping pressure on average values for material removal rate

شکل 3 اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده

اندازه گیری 410 ساخت شرکت میتوتویو<sup>۲</sup> استفاده شده است. این دستگاه زبری سنج قادر است  $R_a$  را با دقت (قدرت تشخیص) یک نانومتر اندازه گیری کند. ، زبری سطح در 5 نقطه از سطح هر قطعه برای افزایش صحت نتایج اندازه گیری و میانگین این 5 اندازه به عنوان زبری سطح آن قطعه در نظر گرفته شده است. میزان عدم تختی قطعات پیش و پس از فرآیند لپن کاری با استفاده از تختی سنج نوری<sup>۳</sup> اندازه گیری شده است. نور قرمز با طول موج 0.622 میکرومتر نور مورد استفاده در این تختی سنج است. از آن جا که عدم تختی برابر با تعداد خطوط مشاهده شده ضرب در نصف طول موج است، این دستگاه قادر است عدم تختی را با دقت (قدرت تشخیص) 0.311 میکرومتر اندازه گیری کند.

در این تحقیق برای اندازه گیری نرخ برداشت ماده از یک ساعت برای اندازه گیری زمان فرآیند لپن کاری و از ترازوی الکترونیکی HR-200 که قادر است تا وزن قطعات را با دقت (قدرت تشخیص) 0.1 میلی گرم اندازه گیری کند برای اندازه گیری کاهش جرم قطعه در طول فرآیند لپن کاری استفاده شده است. برای محاسبه نرخ برداشت ماده از رابطه (1) استفاده شده است [7].

$$MRR = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{\Delta m \times 4 \times 10^4}{\pi \times d^2 \times \rho \times \Delta t} \quad (1)$$

در این تحقیق برای طراحی آزمایش ها از روش طراحی آزمایش عاملی کامل<sup>۴</sup> استفاده شده و برای هر کدام از عوامل کنترلی مطابق جدول 2 چهار سطح در نظر گرفته شده است. هر آزمایش برای افزایش صحت نتایج با شرایط یکسان دو بار تکرار شده و در صورت عدم وجود اختلاف زیاد بین نتایج این دو آزمایش میانگین نتایج به دست آمده به عنوان مقدار آن آزمایش در نظر گرفته شده، در غیر این صورت این دو قطعه کنار گذاشته شده و آزمایش ها تکرار شده است.

پیش از انجام آزمایش ها ابتدا قطعات از میله ای از جنس فولاد 440c بریده، سپس قطعات سنگ زده شده و زبری سطح، عدم تختی و وزن آن ها اندازه گیری می شوند. قطعاتی که اندازه های آن ها در محدوده های قابل قبول (زبری سطح اولیه  $R_a$ )  $950 \pm 50$  نانومتر و عدم تختی اولیه  $5.598 \pm 0.311$  میکرومتر) قرار داشته باشند، برای انجام آزمایش ها انتخاب می شوند. پیش از انجام هر آزمایش ذرات ساینده با اندازه قطر مشخص شده برای آن آزمایش و با نسبت وزنی مشخص شده برای آن آزمایش با سیال لپن کاری مخلوط می شوند. دوغاب ساینده در پمپ تغذیه دوغاب ساینده ریخته شده و دستگاه لپن کاری برای یک دقیقه روشن می شود تا دوغاب ساینده بر صفحه لپ ریخته شده و ذرات ساینده در سطح صفحه لپ فرو روند. قطعه کار درون قفسه لپن کاری قرار داده شده و وزنه ای برای اعمال فشار لپن کاری روی قطعه کار قرار داده می شود. با تغییر جرم وزنه می توان فشار لپن کاری مورد

جدول 2 عوامل کنترلی و سطوح آن ها

Table 2 Control factors and their levels

عامل کنترلی	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
درصد وزنی ذرات ساینده (% wt)	10	15	20	25
اندازه ذرات ساینده ( $\mu\text{m}$ )	16	32	63	122
فشار لپن کاری (kPa)	10	15	20	25

<sup>1</sup> SURFTEST SJ-410

<sup>2</sup> Mitutoyo

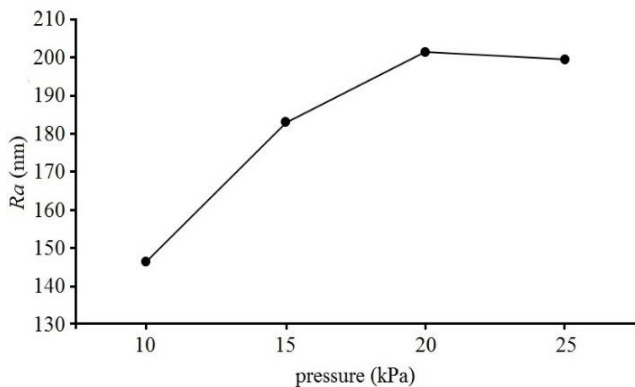
<sup>3</sup> Optical Flat

<sup>4</sup> Full Factorial

جدول 3 نتایج آزمایشگاهی

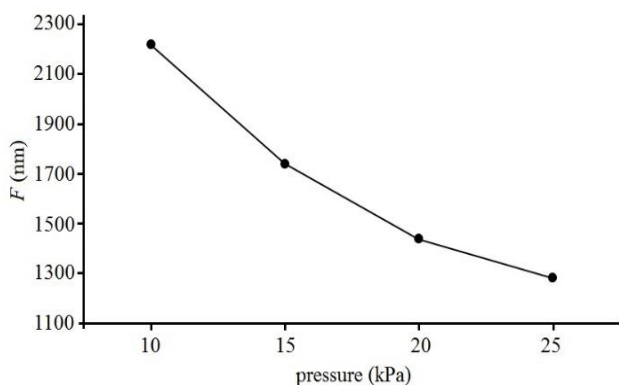
**Table 3** Experimental results

شماره آزمایش	فشار لپن کاری (kPa)	اندازه ذرات ساینده (µm)	درصد وزنی ذرات ساینده (%wt)	نرخ برداشت ماده (nm/min)	زبری سطح (nm)	عدم تختی (nm)
1	10	16	10	136	79	2021
2	15	16	10	350	119	1555
3	20	16	10	441	138	1399
4	25	16	10	319	141	1088
5	10	32	10	246	134	2177
6	15	32	10	542	174	1710
7	20	32	10	609	193	1555
8	25	32	10	493	193	1244
9	10	63	10	411	197	2332
10	15	63	10	659	232	1866
11	20	63	10	729	253	1555
12	25	63	10	595	247	1399
13	10	122	10	503	226	2488
14	15	122	10	675	249	2021
15	20	122	10	670	266	1555
16	25	122	10	496	259	1399
17	10	16	15	264	59	1866
18	15	16	15	514	94	1399
19	20	16	15	616	112	1088
20	25	16	15	474	111	933
21	10	32	15	447	122	2021
22	15	32	15	701	159	1555
23	20	32	15	782	179	1244
24	25	32	15	646	177	1244
25	10	63	15	569	182	2332
26	15	63	15	813	223	1866
27	20	63	15	909	242	1555
28	25	63	15	763	239	1399
29	10	122	15	564	205	2643
30	15	122	15	807	244	2021
31	20	122	15	891	259	1710
32	25	122	15	755	252	1555
33	10	16	20	306	53	1710
34	15	16	20	544	89	1244
35	20	16	20	635	106	1088
36	25	16	20	494	108	933
37	10	32	20	489	119	2021
38	15	32	20	740	157	1399
39	20	32	20	817	174	1088
40	25	32	20	691	171	1088
41	10	63	20	591	173	2177
42	15	63	20	857	212	1710
43	20	63	20	932	230	1399
44	25	63	20	796	226	1244
45	10	122	20	593	194	2488
46	15	122	20	831	229	2021
47	20	122	20	917	249	1710
48	25	122	20	780	244	1399
49	10	16	25	252	73	2021
50	15	16	25	493	104	1555
51	20	16	25	594	127	1244
52	25	16	25	441	131	1088
53	10	32	25	440	128	2021
54	15	32	25	699	165	1710
55	20	32	25	778	185	1399
56	25	32	25	654	189	1244
57	10	63	25	571	183	2332
58	15	63	25	789	224	1866
59	20	63	25	892	242	1555
60	25	63	25	792	241	1555
61	10	122	25	553	213	2799
62	15	122	25	774	250	2332
63	20	122	25	895	266	1866
64	25	122	25	822	262	1710



**Fig. 4** Effect of lapping pressure on average values for surface roughness of lapped workpieces

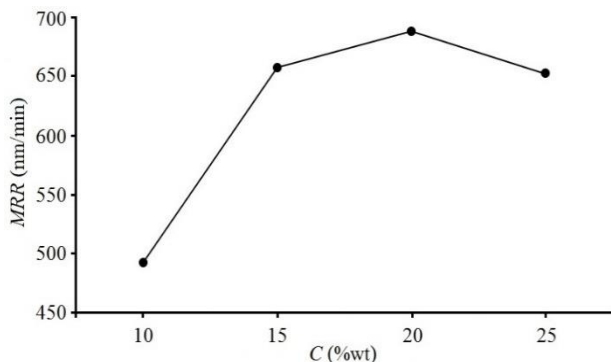
شکل 4 اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن کاری شده



**Fig. 5** Effect of lapping pressure on average values for out of flatness in lapped workpieces

شکل 5 اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن کاری شده

رسیدن به درصد وزنی مشخصی ذرات ساینده به میزان کافی در سیال لپن کاری برای انجام فرآیند لپن کاری وجود دارند و افزایش بیشتر نه تنها سبب بهبود نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن کاری شده نمی شود، بلکه وجود ذرات ساینده بیش از اندازه در سیال لپن کاری به دلیل کاهش سیالیت و در نتیجه حرکت نامناسب ذرات ساینده و مواد جدا شده از سطح قطعه لپن کاری شده، درگیری و سایش ذرات ساینده با یکدیگر، کاهش فشار وارد بر هر ذره ساینده و غیره سبب کاهش نرخ برداشت ماده و افزایش زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده می شود.



**Fig. 6** Effect of concentration of abrasive particles on average values for material removal rate

شکل 6 اثر درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده

مقادیر نرخ برداشت ماده آغاز به کاهش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده شروع به افزایش می کنند.

دلیل این پدیده این است که در ابتدا برای انجام فرآیند لپن کاری به میزان کافی ذرات ساینده در سیال لپن کاری وجود ندارند، در نتیجه افزایش درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری سبب افزایش نرخ برداشت ماده و کاهش زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن کاری شده می شود، پس از

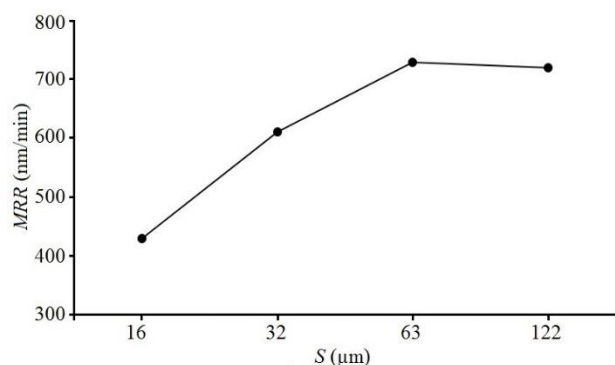


Fig. 9 Effect of abrasive particles size on average values for material removal rate

شکل 9 اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده

براساس شکل 11 بزرگتر شدن ذرات ساینده سبب افزایش خطای تختی قطعات لپن کاری شده می شود. ذرات ساینده بزرگتر سبب ایجاد خراش ها و حفره های بزرگتری در سطح قطعات لپن کاری شده می گردند، در نتیجه پستی و بلندی های سطح قطعات لپن کاری شده بزرگتر شده که این امر سبب افزایش خطای تختی قطعات لپن کاری شده می شود.

#### 4-3- مدل سازی فرآیند لپن کاری به وسیله شبکه عصبی مصنوعی

پیش از انجام بهینه سازی فرآیند لپن کاری باید مدلی برای پیش بینی نتایج حاصل از این فرآیند به دست آورد. این مدل باید بتواند مقادیر خروجی های آزمایش ها (متغیرهای پاسخ) را با استفاده از مقادیر متغیرهای کنترلی پیش بینی کند. در این تحقیق متغیرهای کنترلی عبارت از فشار لپن کاری، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری و اندازه ذرات ساینده و متغیرهای پاسخ عبارت از نرخ برداشت ماده، عدم تختی و زبری سطح قطعات لپن کاری شده است.

در این تحقیق برای مدل سازی فرآیند لپن کاری از شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطا<sup>1</sup> استفاده شده است. براساس پژوهش های انجام شده شبکه های عصبی قادر است تا خروجی فرایندهای مختلف ماشین کاری و پرداخت کاری را با دقت بالایی پیش بینی کند، همچنین براساس پژوهش های انجام شده استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا برای آموزش شبکه های عصبی نتایج مطلوبی را در پیش بینی نتایج خروجی این فرآیندها داشته است [25-29].

در الگوریتم پس انتشار خطا به منظور به حداقل رساندن اختلاف بین نتایج پیش بینی شده و داده های خروجی واقعی (خطای آموزش)، وزن ارتباط داخلی شبکه عصبی در طی فرآیند آموزش تنظیم می شود. برای تنظیم وزن شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطا، داده ها از لایه خروجی به لایه پنهان باز می گردند و دوباره پردازش می شوند. وزن در این الگوریتم با استفاده روابط (2-4) تعیین می شود [30,31].

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + \Delta w_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta w_{ij} = -\mu \frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}} \text{out}_j \quad (3)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K (d_{pk} - o_{pk}) \quad (4)$$

برای پیش بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات

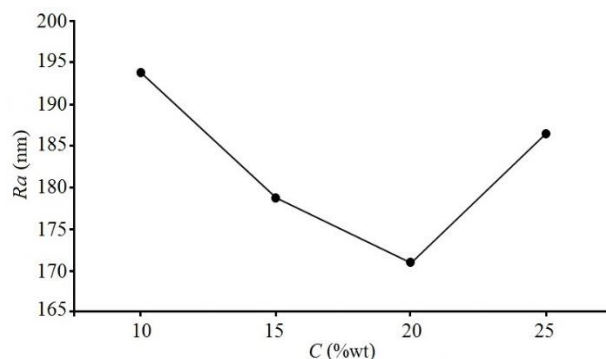


Fig. 7 Effect of concentration of abrasive particles on average values for surface roughness of lapped workpieces

شکل 7 اثر درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن کاری شده

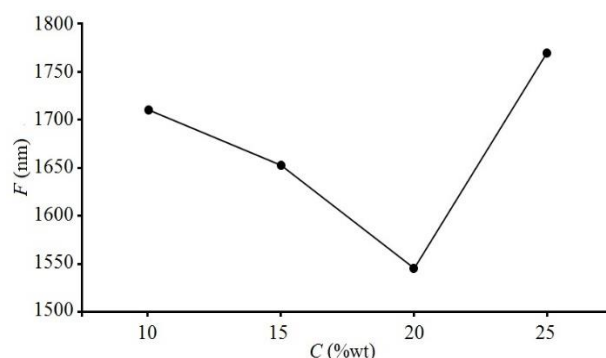


Fig. 8 Effect of concentration of abrasive particles on average values for out of flatness in lapped workpieces

شکل 8 اثر درصد وزنی ذرات ساینده بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن کاری شده

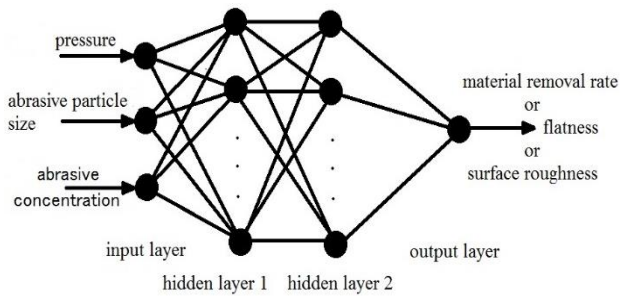
#### 3-3- اثر اندازه ذرات ساینده بر نتایج فرآیند لپن کاری

اثر تغییرات اندازه ذرات ساینده بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعه لپن کاری شده به ترتیب در شکل های 9-11 نشان داده شده است. در شکل 9 مشاهده می شود که در مقادیر کوچک اندازه ذرات ساینده با بزرگتر شدن ذرات ساینده به تدریج نرخ برداشت ماده افزایش می یابد، ولی با عبور اندازه ذرات ساینده از مقدار معینی (63 میکرومتر)، نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می کند. دلیل این پدیده این است که در ابتدا بزرگتر شدن ذرات ساینده سبب افزایش عمق و پهنای خراش های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه کار و در نتیجه افزایش نرخ برداشت ماده می شود، اما پس از رسیدن به اندازه مشخصی، بزرگتر شدن ذرات ساینده سبب خرد شدن و یا فرو رفتن بیش از حد این ذرات ساینده بزرگ در صفحه لپ در اثر فشار بالای وارد بر هریک از آنها می شود. در نتیجه نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می کند.

همان طور که در شکل 10 نشان داده شده است با بزرگتر شدن ذرات ساینده، زبری سطح قطعات لپن کاری شده افزایش می یابد. بزرگتر شدن ذرات ساینده سبب افزایش عمق و پهنای خراش های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه کار شده و در نتیجه سبب افزایش زبری سطح قطعات لپن کاری شده می شود. هر چند به مرور با بزرگتر شدن اندازه ذرات ساینده به دلیل خرد شدن این ذرات ساینده بزرگ در اثر فشار بالای وارد بر هر یک از آنها آهنگ افزایش زبری سطح کاهش یافته و حتی در مواردی سبب کاهش زبری سطح قطعه لپن کاری شده می شود.

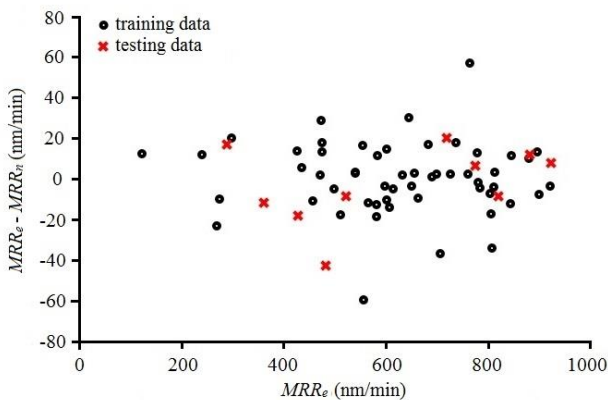
<sup>1</sup> Back Propagation

حاصل از آزمایش‌های انجام داده شده دارند. میانگین درصد خطای آموزش برای نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده به ترتیب 2.5%، 1.7% و 3.3% و میانگین درصد خطای آزمایش برای نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده به ترتیب 3.1%، 3% و 3.2% است. کوچک بودن میزان این خطاها و نزدیک بودن مقادیر خطاهای آموزش و آزمایش نشان‌دهنده آموزش صحیح و به اندازه شبکه‌های عصبی است.



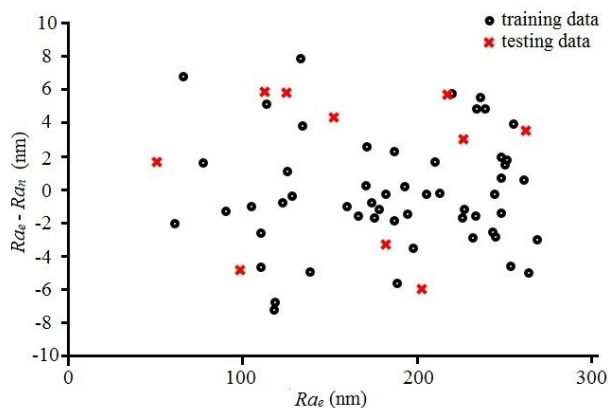
**Fig. 12** the construction used in artificial neural network models for lapping process

شکل 12 معماری به کار رفته در مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی فرآیند لپن کاری



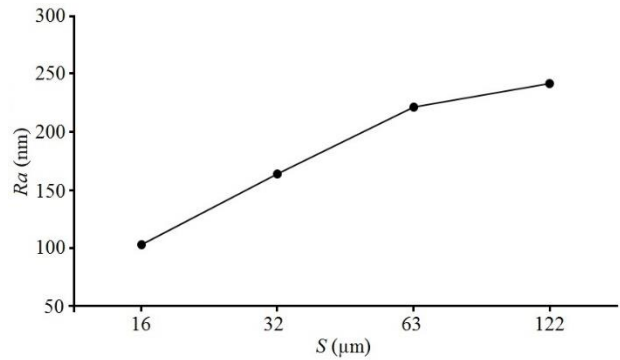
**Fig. 13** Difference between material removal rate obtained from experiments and predicted by artificial neural network

شکل 13 اختلاف نرخ برداشت ماده به دست آمده از آزمایش‌ها و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی



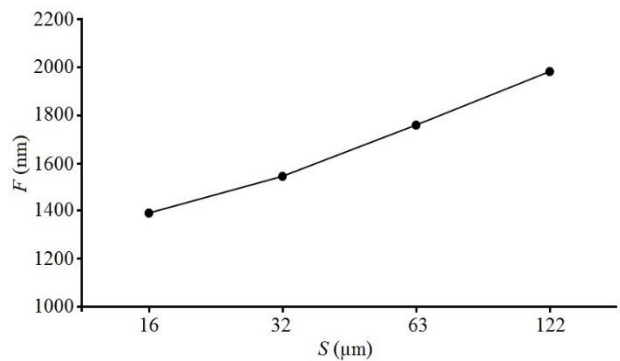
**Fig. 14** Difference between surface roughness obtained from experiments and predicted by artificial neural network

شکل 14 اختلاف زبری سطح به دست آمده از آزمایش‌ها و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی



**Fig. 10** Effect of abrasive particles size on average values for surface roughness of lapped workpieces

شکل 10 اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن کاری شده



**Fig. 11** Effect of abrasive particles size on average values for out of flatness in lapped workpieces

شکل 11 اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن کاری شده

لپن کاری شده، سه شبکه عصبی مصنوعی ایجاد و آموزش داده شده است. هر سه شبکه عصبی ایجاد شده دارای یک لایه ورودی، دو لایه مخفی یا میانی و یک لایه خروجی است. براساس شکل 12 هر کدام از این سه شبکه عصبی دارای 3 ورودی و یک خروجی است. سه پارامتر ورودی عبارت از فشار لپن کاری، اندازه قطر ذرات ساینده و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری است. نرخ برداشت ماده، پارامتر خروجی شبکه عصبی اول، زبری سطح قطعه لپن کاری شده، پارامتر خروجی شبکه عصبی دوم و خطای تختی قطعه لپن کاری شده، پارامتر خروجی شبکه عصبی سوم است.

از آن‌جا که محدوده و واحدهای داده‌های ورودی فرآیند با یکدیگر تفاوت دارند، برای افزایش سرعت آموزش و کاهش خطای شبکه عصبی، داده‌های ورودی در بازه صفر تا یک نرمال شده‌اند.

از میان داده‌های نشان داده شده در جدول 3 داده‌های 54 آزمایش برای آموزش شبکه‌های عصبی ایجاد شده و داده‌های 10 آزمایش برای آزمون شبکه‌های عصبی ایجاد شده، به کار برده شده‌اند. انتخاب داده‌های مورد استفاده برای آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی ایجاد شده به صورت تصادفی انجام شده است.

در شکل‌های 13-15 به ترتیب اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش داده شده و مقادیر متناظر به دست آمده از آزمایش‌های انجام داده شده، نشان داده شده است. در این شکل‌ها دیده می‌شود که شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش داده شده به داده‌های امتحانی مانند داده‌های آموزشی به خوبی پاسخ داده و تطابق مناسبی با داده‌های



در این تحقیق از نرم افزار متلب<sup>1</sup> برای بهینه سازی فرآیند به روش ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده و حالت های بهینه برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت ماده، کمترین زبری سطح و کمترین خطای تختی قطعه لپن کاری شده به وسیله این نرم افزار به دست آورده شده است. حالت بهینه برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت ماده در فشار لپن کاری 19.7 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری 19.3% و اندازه ذرات ساینده 66 میکرومتر به دست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط نرخ برداشت ماده 948 میکرومتر بر دقیقه به دست آمده که از بیشترین نرخ برداشت ماده به دست آمده از آزمایش های انجام شده (932 میکرومتر بر دقیقه) بیشتر است. حالت بهینه برای رسیدن به کمترین زبری سطح قطعه لپن کاری شده در فشار لپن کاری 10 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری 19.1% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط زبری سطح قطعه لپن کاری شده برابر با 51 نانومتر به دست آمده است که از کمترین زبری سطح به دست آمده از آزمایش های انجام شده (53 نانومتر) کمتر است. حالت بهینه برای رسیدن به کمترین خطای تختی در فشار لپن کاری 25 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری 20.7% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط خطای تختی قطعه لپن کاری شده برابر با 933 نانومتر به دست آمده است. همان طور که در جدول 3 مشاهده می شود این مقدار برابر با کمترین خطای تختی به دست آمده از آزمایش های انجام شده است.

بزرگ ترین مشکل فرآیند لپن کاری، پایین بودن نرخ برداشت ماده در این فرآیند است که این امر سبب افزایش قابل ملاحظه هزینه و زمان تولید می شود؛ بنابراین در فرآیند لپن کاری انتخاب شرایطی که بتواند علاوه بر تولید قطعاتی با زبری سطح و خطای تختی پایین، نرخ برداشت ماده بالایی نیز داشته باشد، بسیار مهم و ضروری است؛ بنابراین در این تحقیق علاوه بر بهینه سازی تک هدفه فرآیند لپن کاری، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات، به بهینه سازی هم زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات پرداخته شده و بهینه پارتو و جبهه پارتو مربوطه به دست آورده شده است.

الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات (MOPSO) در سال 2004 توسط کوئلو و همکاران مطرح شد. این الگوریتم که تکامل یافته الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات ساده است، یکی از معروف ترین و پرکاربردترین الگوریتم های بهینه سازی چند هدفه است. در الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات یک مفهوم به نام مخزن به الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات ساده اضافه شده است. اعضای مخزن بیانگر جبهه پارتو و شامل ذرات نامغلوب<sup>2</sup> هستند. مراحل اجرای این الگوریتم به شرح زیر است [33]:

- 1- ایجاد جمعیت اولیه به صورت تصادفی
- 2- جدا کردن اعضای نامغلوب و ذخیره کردن آن ها در مخزن
- 3- تقسیم بندی فضای هدف
- 4- انتخاب ذره رهبر که مشابه بهترین خاطره جمعی در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات ساده است. برای این کار از بین تقسیمات ایجاد شده در مرحله قبل یکی از این خانه ها انتخاب می شود. هر قدر تعداد اعضای نامغلوب موجود در یک خانه کمتر باشد، شانس انتخاب آن خانه بیشتر است. این کار به تنوع

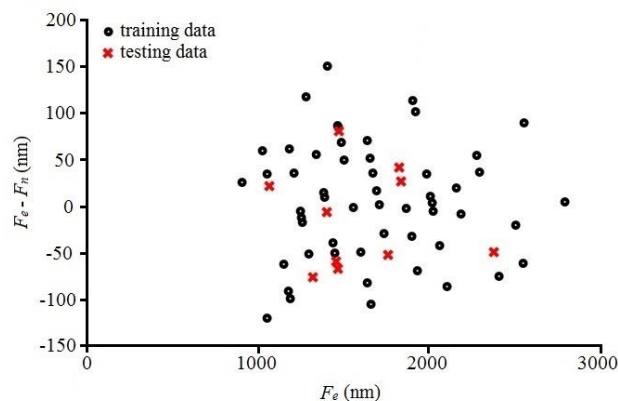


Fig. 15 Difference between out of flatness obtained from experiments and predicted by artificial neural network

شکل 15 اختلاف خطای تختی به دست آمده از آزمایش ها و پیش بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی

### 3-5- بهینه سازی فرآیند لپن کاری

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در سال 1995 توسط کندی و ابرهات [32] مطرح شد. این الگوریتم که از پرواز گروهی پرندگان الهام گرفته شده است، با ایجاد یک جمعیت تصادفی از ذرات (پاسخ های ممکن) شروع می شود. حرکت و جستجوی هر ذره در دو جهت صورت می گیرد؛ به سمت بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به آن رسیده است و به سمت بهترین موقعیتی که مجموعه ذرات به آن رسیده اند. سرعت هر ذره و به تبع آن موقعیت جدید آن ذره همان طور که در شکل 16 نشان داده شده است با استفاده از روابط (6,5) محاسبه می شود.

$$V_i^{t+1} = WV_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - X_i^t) + c_2 r_2 (G^t - X_i^t) \quad (5)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (6)$$

در این مقاله مقادیر  $c_1$ ،  $c_2$  و  $W$  به کمک روش سعی و خطا به ترتیب برابر با 1.5، 2.5 و 0.5 انتخاب شده اند.

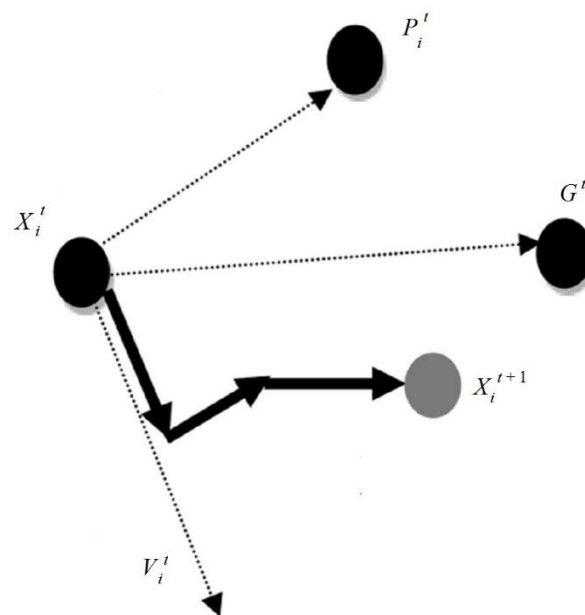


Fig. 16 The function of Particle Swarm Optimization Algorithm [32]

شکل 16 نحوه عملکرد الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات [32]

<sup>1</sup> MATLAB

<sup>2</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>3</sup> Non-dominated

تختی قطعات لپن کاری شده است. با استفاده از این الگوریتم بهینه سازی می توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را با نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این الگوریتم بهینه سازی علاوه بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می یابد.

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق در فرآیند لپن کاری تخت یک طرفه فولاد 440c، تأثیر پارامترهای فشار لپن کاری، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری و اندازه ذرات ساینده، بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن کاری شده با استفاده از روش آزمایشگاهی بررسی شده است. از نتایج آزمایش های انجام شده نتایج زیر حاصل می شود.

1- در مقادیر کوچک فشار لپن کاری، با افزایش فشار، به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده افزایش می یابد، ولی با عبور فشار لپن کاری از مقدار معینی (20 کیلوپاسکال)، مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده شروع به کاهش می کنند.

2- افزایش فشار لپن کاری سبب کاهش عدم تختی قطعات لپن کاری شده می شود.

3- در مقادیر کوچک درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری، با افزایش درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری، به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده افزایش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده کاهش می یابد، ولی با عبور درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری از مقدار معینی (20%)، مقادیر نرخ برداشت ماده شروع به کاهش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده شروع به افزایش می کنند.

4- در مقادیر کوچک اندازه ذرات ساینده، با افزایش اندازه ذرات ساینده، به تدریج نرخ برداشت ماده افزایش می یابد، ولی با عبور اندازه ذرات ساینده از مقدار معینی (63 میکرومتر)، نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می کند.

5- با بزرگتر شدن ذرات ساینده، زبری سطح قطعات لپن کاری شده افزایش می یابد.

6- بزرگتر شدن ذرات ساینده سبب افزایش خطای تختی قطعات لپن کاری شده می شود.

در ادامه این تحقیق با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات تک هدفه به بهینه سازی این فرآیند لپن کاری پرداخته شده است. نتایج بهینه سازی تک هدفه نشان می دهند که بیشترین نرخ برداشت ماده در فشار لپن کاری 19.7 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری 19.3% و اندازه ذرات ساینده 66 میکرومتر، کمترین زبری سطح قطعات لپن کاری شده در فشار لپن کاری 10 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری 19.1% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر و کمترین خطای تختی قطعات لپن کاری شده در فشار لپن کاری 25 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری 20.7% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست می آید. در نهایت با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه به بهینه سازی هم زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن کاری شده پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهند که با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات می توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را با نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این روش علاوه بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می یابد.

و پراکندگی بهتر پاسخها کمک می کند. در نهایت از میان ذرات نامغلوب خانه انتخاب شده یکی به صورت تصادفی به عنوان ذره رهبر انتخاب می شود.

5- مشخص کردن موقعیت جدید هر ذره به کمک روابط (6,5)

6- به روزرسانی بهترین تجربه شخصی هر کدام از ذرات

برای این منظور اگر موقعیت جدید بهترین تجربه را مغلوب کند، آن گاه موقعیت جدید جای بهترین تجربه را می گیرد. اگر موقعیت جدید توسط بهترین تجربه مغلوب شود، هیچ اقدامی صورت نمی گیرد. اگر هیچ کدام از این موارد رخ ندهد یکی از دو موقعیت بالا به طور تصادفی به عنوان بهترین تجربه در نظر گرفته می شود.

7- اضافه شدن اعضای نامغلوب جمعیت کنونی به مخزن

8- حذف اعضای مغلوب مخزن

9- حذف اعضای بیش از ظرفیت مخزن

برای این کار از بین تقسیمات ایجاد شده در مرحله 3 یکی از این خانه ها انتخاب می شود. هر قدر تعداد اعضای نامغلوب موجود در یک خانه بیشتر باشد، شانس انتخاب آن خانه بیشتر است. این کار به تنوع و پراکندگی بهتر پاسخها کمک می کند. در نهایت از میان ذرات نامغلوب خانه انتخاب شده یکی به صورت تصادفی انتخاب و حذف می شود.

10- در صورت تحقق شرط پایان، توقف الگوریتم و در غیر این صورت بازگشت به مرحله 4

در این تحقیق برای بهینه سازی چندهدفه به روش ازدحام ذرات از کدهای نوشته شده در نرم افزار متلب استفاده شده است. بهینه پارتو و جبهه پارتو به دست آمده از نرم افزار متلب در جدول 4 آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات، ابزاری مفید و قدرتمند برای بهینه سازی هم زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای

جدول 4 بهینه پارتو و جبهه پارتو

Table 4 Pareto optimal solutions and Pareto front

شماره	فشار لپن کاری (kPa)	اندازه ذرات ساینده (μm)	درصد وزنی ذرات ساینده (%wt)	نرخ برداشت ماده (nm/min)	زبری سطح (nm)	عدم تختی (nm)
1	10	16	19.1	289	52	1736
2	10.06	18.29	19.59	323	63	1755
3	11.45	16.31	19.27	378	66	1592
4	24.63	25.76	20.75	648	152	1005
5	15.79	16.57	20.35	574	98	1246
6	10.49	16.01	20.35	318	57	1683
7	23.01	16.07	20.78	588	114	938
8	12.59	16.09	20.51	435	74	1482
9	19.68	66.03	19.33	933	231	1439
10	12.11	16.1	20.46	411	71	1525
11	19.51	37.34	19.61	853	185	1256
12	17.62	23.1	20.64	703	134	1210
13	10	16	20.76	285	53	1732
14	17.7	28.68	19.98	766	154	1264
15	18.75	33.59	20.04	822	173	1256
16	10.99	16.58	20.47	356	64	1638
17	21.42	24.86	20.63	733	150	1069
18	17.14	44.38	19.54	863	194	1435
19	22.71	26.22	20.53	722	155	1047
20	13.78	17.08	20.76	503	88	1395
21	20	59.36	19.7	929	225	1386
22	18.85	54.96	19.77	920	217	1414
23	18.64	19.89	20.45	679	124	1125
24	14.83	20.17	19.73	594	108	1359
25	10.26	16.07	19.65	303	55	1706
26	17.89	48.97	19.29	892	205	1423
27	19.4	29.07	20.55	786	161	1184
28	11.79	16.03	19.18	394	68	1556
29	25	16	20.66	509	111	906

## 5- فهرست علائم

$C$	درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری (%wt)
$c_1$	پارامتر شناختی
$c_2$	پارامتر اجتماعی
$d$	قطر قطعه کار (cm)
$d_{pk}$	خروجی مطلوب برای نرون k-ام
$E_p$	خطای آموزش شبکه عصبی
$F$	خطای تختی (nm)
$F_e$	خطای تختی به دست آمده از آزمایش ها (nm)
$F_n$	خطای تختی پیش بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm)
$G$	بهترین موقعیتی که مجموعه ذرات به آن رسیده اند
$K$	تعداد نرون های شبکه عصبی مصنوعی
$P$	تعداد داده های آزمایشی
$MRR$	نرخ برداشت ماده (nm/min)
$MRR_e$	نرخ برداشت ماده به دست آمده از آزمایش ها (nm/min)
$MRR_n$	نرخ برداشت ماده پیش بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm/min)
$out_j$	خروجی نرون j-ام
$p$	بهترین موقعیتی که یک ذره به آن رسیده است
$o_{pk}$	خروجی محاسبه شده برای نرون k-ام
$r$	عددی تصادفی بین صفر و یک
$Ra$	میانگین زبری سطح (nm)
$Ra_e$	میانگین زبری سطح به دست آمده از آزمایش ها (nm)
$Ra_n$	میانگین زبری سطح پیش بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm)
$S$	میانگین اندازه ذرات ساینده ( $\mu m$ )
$V$	سرعت ذره
$X$	موقعیت ذره
$W$	اینرسی وزنی
$w_{ij}$	وزن اتصال بین نرون های i و j

## علائم یونانی

$\mu$	نرخ آموزش یا همگرایی در شبکه عصبی
$\Delta h$	اختلاف ارتفاع قطعات پیش و پس از فرآیند لپن کاری (nm)
$\Delta m$	اختلاف جرم قطعات پیش و پس از فرآیند لپن کاری (mg)
$\Delta t$	زمان لپن کاری (min)
$\rho$	چگالی ( $gcm^{-3}$ )
$t$	شماره تکرار
$i$	شماره ذره

## 6- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از زحمات مهندس ظهیر کریمی و

تمام کارکنان صنایع هواپیمایی ایران (صها) که در انجام این تحقیق از هیچ کوششی فروگذاری نکردند، تشکر نموده و مراتب سپاس و قدردانی خود را از ایشان اعلام دارند.

## 7- مراجع

- [1] I. D. Marinescu, E. Uhlmann, T. K. Doi, *Handbook of Lapping and Polishing*, pp. 9-81, London: Taylor & Francis, 2007.
- [2] Z. Dimkovski, F. Cabanettes, H. Löfgren, C. Anderberg, R. Ohlsson, B. G. Rosén, Optimization of cylinder liner surface finish by slide honing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 4, pp. 575-584, 2012.
- [3] X. Le, M. L. Peterson, Material removal rate in flat lapping, *Manufacturing Processes*, Vol. 1, No. 1, pp. 71-78, 1999.
- [4] C. Chung, C. S. Korach, I. Kao, Experimental study and modeling of lapping using abrasive grits with mixed sizes, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 133, No. 3, pp. 1-8, 2011.
- [5] J. X. Su, L. X. Liu, Z. Q. Zhang, Z. X. Liu, Influence of lapping parameters on 6H-SiC Crystal Substrate (0001) C surface based on diamond particle, *Advanced Materials Research*, Vol. 565, pp. 237-242, 2012.
- [6] A. Gullu, H. Calimli, The investigation of the effects of machining parameters on surface roughness in lapping, *Gazi University Journal of Science*, Vol. 18, No. 2, pp. 229-237, 2005.
- [7] Y. Zhang, I. D. Marinescu, R. VandenBoom, Optimisation of D2 steel lapping with a polymer plate, *Abrasive Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 203-214, 2010.
- [8] F. Jiang, J. H. Xiang, Z. W. Liang, C. L. Zhang, The optimization of lapping process parameters based on extension theory, *Key Engineering Materials*, Vol. 531, pp. 262-265, 2013.
- [9] X. Wang, C. D. Lu, T. Hong, Applying TRIZ for optimization formulation of sapphire precision lapping, *Advanced Materials Research*, Vol. 102, pp. 564-567, 2010.
- [10] J. L. Yuan, B. H. Lv, Z. Z. Zhou, B. C. Tao, Parameters optimization on the lapping process for advanced ceramics by applying Taguchi method, *Materials Science Forum*, Vol. 532, pp. 488-491, 2006.
- [11] P. R. Parate, R. B. Yarasu, Application of Taguchi and ANOVA in optimization of process parameters of lapping operation for cast iron, *Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 4, pp. 479-487, 2013.
- [12] P. R. Parate, R. B. Yarasu, Optimization of process parameters of lapping operation by Taguchi approach for surface roughness of SS 321, *Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 15-21, 2013.
- [13] L. S. Deshpande, S. Raman, O. Sunanta, C. Agbaraji, Observations in the flat lapping of stainless steel and bronze, *Wear*, Vol. 265, No. 1, pp. 105-116, 2008.
- [14] Y. Ahn, S. S. Park, Surface roughness and material removal rate of lapping process on ceramics, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 11, No. 5, pp. 494-504, 1997.
- [15] J. D. B. De Mello, P. L. Guzzo, Lapping, polishing and ultrasonic machining of quartz mono crystals, *International Journal of Surface Science and Engineering*, Vol. 2, No. 6, pp. 457-479, 2008.
- [16] J. M. Sowers, *Examination of the Material Removal Rate in Lapping Polycrystalline Diamond Compacts*, PhD Thesis, A&M University, Texas, 2011.
- [17] J. C. Lambropoulos, S. D. Jacobs, B. E. Gillman, H. J. Stevens, Deterministic microgrinding, lapping, and polishing of glass-ceramics, *the American Ceramic Society*, Vol. 88, No. 5, pp. 1127-1132, 2005.
- [18] G. Ascanio, C. Cava, R. Chicurel, R. Reséndiz, Improved single-face lapping by using an air bearing supported lap, *Applied Research and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 187-195, 2007.
- [19] T. Iyama, I. Tanabe, A. L. Moe, K. Yoshi, F. Nasu, Development of intelligent lapping system estimation of finished surface roughness and its improvement speed, *Machine Engineering*, Vol. 10, pp. 5-12, 2010.
- [20] J. Molenda, A. Barylski, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sealing elements lapping, *Powertrain and Transport*, Vol. 19, pp. 311-318, 2012.
- [21] X. Zhu, C. Chung, C. S. Korach, I. Kao, Experimental study and modeling of the effect of mixed size abrasive grits on surface topology and removal rate in wafer lapping, *Wear*, Vol. 305, No. 1, pp. 14-22, 2013.
- [22] J. L. Yuan, P. Zhao, J. Ruan, Z. X. Cao, W. H. Zhao, T. Xing, Lapping and polishing process for obtaining super-smooth surfaces of quartz crystal, *Materials Processing Technology*, Vol. 138, No. 1, pp. 116-119, 2003.
- [23] S. M. Fulmali, R. B. Chadge, Need of lapping machine for valve component: a case study, *Modern Engineering Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 4609-4612, 2012.
- [24] Z. Qiu, F. Z. Fang, L. Ding, Q. Zhao, Investigation of diamond cutting tool lapping system based on on-machine image measurement, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 79-86, 2011.
- [25] R. Sreenivasulu, Optimization of burr size, surface roughness and circularity deviation during drilling of Al 6061 using Taguchi design method and artificial neural network, *Management & Production*, Vol. 6, No. 1 pp. 93-108, 2015.
- [26] F. Djavanroodi, Artificial neural network modeling of surface roughness in magnetic abrasive finishing process, *Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 11, pp. 1976-1983, 2013.

- method, *Materials Processing Technology*, Vol. 202, No. 1, pp. 574-582, 2008.
- [31] N. Tosun, L. Ozler, A study of tool life in hot machining using artificial neural networks and regression analysis method, *Materials Processing Technology*, Vol. 124, No. 1, pp. 99-104, 2002.
- [32] J. Kennedy, R. C. Eberhart, Particle swarm optimization, *Proceedings of International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia: IEEE Press, pp. 1942-1948, 1995.
- [33] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, Multi-objective optimal power management and sizing of a reliable wind/PV microgrid with hydrogen energy storage using MOPSO, *Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 32, No. 3, pp. 1753-1773, 2017.
- [27] N. Mohanasundararaju, R. Sivasubramanian, R. Gnanaguru, N. Alagumurthy, A neural network and fuzzy-based methodology for the prediction of work roll surface roughness in a grinding process, *Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, Vol. 9, No. 2, pp. 103-110, 2008.
- [28] A. Yahya, T. Andromeda, A. Baharom, A. A. Rahim, N. Mahmud, Material removal rate prediction of electrical discharge machining process using artificial neural network, *Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 1, No. 4, pp. 298-302, 2012.
- [29] R. Azouzi, M. Guillot, On-line prediction of surface finish and dimensional deviations in turning using neural network based sensor fusion, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 9, pp. 1201-1217, 1997.
- [30] U. Caydas, A. Hascalik, A study on surface roughness in abrasive water jet machining process using artificial neural networks and regression analysis