



## مدل سازی و بهینه سازی فرآیند لپن کاری فولاد 440c توسط شبکه عصبی و الگوریتم بهینه سازی چند هدفه از دحام ذرات

محمد شفیعی علویجه<sup>۱</sup>, حسین امیرآبادی<sup>۲\*</sup>

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

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* hamirabadi@birjand.ac.ir .97175/615

### چکیده

مهم‌ترین مشکل در فرآیند لپن کاری پایین بودن نرخ برداشت ماده است که سبب افزایش هزینه و زمان تولید می‌شود، بنابراین در فرآیند لپن کاری انتخاب شرایطی که بتواند علاوه‌بر تولید قطعاتی با عدم تختی و زبری سطح مورد نیاز نرخ برداشت ماده بالای 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 چند هدفه از دحام ذرات بهینه سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده برداخته و جبهه پارتو مربوطه به دست آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه از دحام ذرات می‌توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را بر نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این روش علاوه‌بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 خداد 1396

پذیرش: 21 تیر 1396

ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:

لپن کاری

بهینه سازی چند هدفه از دحام ذرات

زبری سطح

نرخ برداشت ماده

تختی

## 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.

فرآیند لپن کاری یکی از این روش‌های تولیدی است. فرآیند لپن کاری فرآیندی سایشی است که معمولاً جهت پرداخت کاری نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برداشت ماده در این فرآیند به وسیله ذرات ساینده‌ای که با سیالی مخلوط شده و بین ابزار لپن کاری و قطعه کار ریخته با مالیده می‌شوند، انجام می‌شود [2,1].

### 1- مقدمه

امروزه با توسعه روزافزون صنعت نیاز به ساخت قطعاتی با دقت و کیفیت سطح بسیار بالا بیش از پیش احساس می‌شود که این دقت و کیفیت سطح بسیار بالا با روش‌های تولید مرسوم مانند سنگزنانی قبل حصول نیست؛ بنابراین در صنعت استفاده از روش‌هایی که توان ساخت قطعاتی با دقت و کیفیت سطح بسیار بالا را داشته باشند بیش از پیش گسترش یافته است.

<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 کردند. آن‌ها برای انجام آزمایش‌ها از ذرات ساینده اکسید آلومنیومی<sup>۵</sup> و دستگاه لپن‌کاری لپ‌مستر<sup>۶</sup> مدل 12C استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه گرفته‌اند که پارامترهای اندازه ذرات ساینده، زمان لپن‌کاری و سرعت چرخشی صفحه لپ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح قطعات تولیدی و پارامترهای اندازه ذرات ساینده، سرعت چرخشی صفحه لپ و فشار لپن‌کاری به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت ماده دارد. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش زمان لپن‌کاری و سرعت چرخشی صفحه لپ و کاهش اندازه ذرات ساینده و فشار لپن‌کاری و سرعت چرخشی صفحه لپ کاهش اندازه ذرات ساینده و اندازه ذرات ساینده، فشار لپن‌کاری و سرعت صفحه لپ سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود.

جیان و همکاران [۸] به بهینه‌سازی فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه پرداخته‌اند. آن‌ها اثر پارامترهای فشار لپن‌کاری، اندازه ذرات ساینده، سرعت چرخشی صفحه لپ، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب ساینده<sup>۷</sup> و نرخ تغذیه دوغاب ساینده را بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن‌کاری شده بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که فشار ۱۱ مگاپاسکال، سرعت صفحه لپ ۳۵ دور بر دقیقه، میزان جریان دوغاب ساینده ۲۲۸.۷۵ میلی‌لیتر بر دقیقه، اندازه ذرات ساینده ۷.۹۵ و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب ۲۵٪ شرایط بهینه برای انجام این فرآیند لپن‌کاری است.

وانگ و همکاران [۹] از تئوری ابتکاری حل مسئله TRIZ<sup>۸</sup> برای بهینه‌سازی لپن‌کاری تخت یک‌طرفه یافته که این مسئله اثر پارامترهای نیروی لپن‌کاری، اندازه ذرات ساینده، سرعت چرخشی صفحه لپ، پارامترهای صفحه لپ و جریان دوغاب ساینده را بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن‌کاری شده بررسی کردند. آن‌ها با تطبیق مقدار نیروی لپن‌کاری، سرعت دورانی، اندازه ذرات و غیره به بهینه‌سازی فرآیند لپن‌کاری پرداخته‌اند.

یوآن و همکاران [۱۰] اثر پارامترهای فشار لپن‌کاری، سرعت چرخشی صفحه لپ و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری را بر زبری سطح قطعات تولیدی در فرآیند لپن‌کاری آزمایش نهادند. آن‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه گرفته‌اند که در حدود ۴۴٪ فشار لپن‌کاری در حدود ۴۶٪ سرعت چرخشی صفحه لپ در حدود ۱۰ دور بر دقیقه، فشار ۳۰ کیلو پاسکال و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب به میزان ۱۰٪ شرایط بهینه بوده و کمترین میزان زبری سطح (Ra) که برابر با ۱۰ نانومتر در این شرایط مشاهده شده است.

پارات و یاراسو [۱۲,۱۱] اثر پارامترهایی چون نیروی لپن‌کاری، زمان لپن‌کاری، جنس ذرات ساینده، غلظت ذرات ساینده در دوغاب و نوع سیال لپن‌کاری بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات تولیدی در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی استوانه‌ای شکل از جنس چدن با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۴۵ میلی‌متر را با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه

لپن‌کاری یک‌طرفه سطوح تخت<sup>۱</sup> پرکاربردترین فرآیند لپن‌کاری در صنعت است؛ بنابراین در این تحقیق نیز این نوع فرآیند لپن‌کاری مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از مهم‌ترین اهداف استفاده از فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه کاهش خطای تختی<sup>۲</sup> و زبری سطح<sup>۳</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 آبندی می‌شود. هرچند فرآیند لپن‌کاری مزایای بسیار زیادی از جمله رسیدن به دقت‌های ابعادی و هندسی بسیار بالا، کاهش تنش‌های سطحی، کاهش زبری سطح، کاهش عیوب سطحی و غیره را دارد، ولی نرخ برداشت ماده در این فرآیند می‌گردد؛ بنابراین در این فرآیند انتخاب شرایطی که بتواند علاوه‌بر تولید قطعاتی با زبری سطح و خطای تختی پایین، نرخ برداشت ماده بالای نیز داشته باشد بسیار مهم و ضروری است [۳,۱].

در ادامه برخی از مرتبط‌ترین تحقیقات انجام‌شده به این تحقیق آورده شده است. چونگ و همکاران [۴] اثر فشار لپن‌کاری و استفاده همزمان از ذرات ساینده بزرگ و کوچک را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده با استفاده از ماشین لپن‌کاری تخت یک‌طرفه لجیتک پیM<sup>۴</sup> با انجام یک‌سری آزمایش بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که افزایش فشار لپن‌کاری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر زبری سطح ندارد، ولی سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین استفاده همزمان از ذرات ساینده بزرگ و کوچک با نسبت برابر بدون افزایش قابل ملاحظه زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود.

سو و همکاران [۵] در فرآیند لپن‌کاری تخت با ذرات ساینده الماسه اثر پارامترهای سرعت چرخشی صفحه لپ، سرعت حمل کننده یا قفسه لپن‌کاری، فشار لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که اندازه ذرات ساینده مهمند عامل مؤثر بر زبری سطح قطعه کار و نرخ برداشت ماده بوده و سرعت چرخشی صفحه لپ، فشار لپن‌کاری و سرعت قفسه لپن‌کاری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده ندارند. آن‌ها مشاهده کردند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده و نرخ برداشت ماده می‌شود، همچنین افزایش سرعت قفسه لپن‌کاری 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 می‌شود.

گولو و کلیمی [۶] اثر پارامترهای زمان و فشار لپن‌کاری را بر زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کردند. در این تحقیق قطعه کار از جنس فولاد ریخته‌گری شده GG6 و با ضخامت ۱۵ میلی‌متر، قطر خارجی ۷۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که زمان لپن‌کاری ۲۵ دقیقه و فشار لپن‌کاری ۶۸۹.۵ کیلو پاسکال شرایط بهینه بوده و کمترین میزان زبری سطح قطعات تولید شده که برابر با ۰.۲ میکرومتر است در این شرایط مشاهده می‌شود.

وانگ و همکاران [۷] اثر پارامترهای زمان لپن‌کاری، سرعت چرخشی صفحه لپ، فشار لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده را در فرآیند لپن‌کاری 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

ایاما و همکاران [19] با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعاتی از جنس کاربید سمنته<sup>۸</sup> اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده و زمان لپن‌کاری را بر زیری سطح و نرخ بهبود زبری سطح قطعه کار بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که کوچک‌تر شدن ذرات ساینده 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 ساینده، افزایش زمان دیگر سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده نمی‌شود.

ملندا و باریلسکی [20] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس اکسید آلومینیوم با استفاده از دستگاه لپن‌کاری ابرالپ<sup>۹</sup> اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، زمان و فشار لپن‌کاری را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده و دریافتند کوچک‌تر شدن ذرات ساینده 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 ساینده بزرگ و کوچک را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعه کار در فرآیند لپن‌کاری با استفاده از ماشین لپن‌کاری تخت یک‌طرفه لجیتک پی‌ام ۵ بررسی و مشاهده کرده‌اند که بیشترین نرخ برداشت ماده و زبری سطح هنگامی به دست می‌آید که از ذرات ساینده کوچک و بزرگ با نسبت برابر استفاده شود. کمترین نرخ برداشت ماده و زبری سطح نیز هنگامی به دست می‌آید که از ذرات ساینده کوچک به طور خالص استفاده گردد.

یوان و همکاران [22] اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، 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>۱۰</sup> بررسی و مشاهده کرده‌اند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده، افزایش سرعت و فشار لپن‌کاری سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین افزایش سرعت و کوچک‌تر شدن ذرات ساینده سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

در این تحقیق برای نخستین بار از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱۱</sup> برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده استفاده شده است. برخلاف سایر تحقیقات انجام شده 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 از دحام ذرات<sup>۱۲</sup> به بهینه‌سازی همزمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه کار پرداخته و بهینه‌پارتو<sup>۱۳</sup> و جبهه‌پارتو<sup>۱۴</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 ساینده، درصد وزنی

گرفته‌اند که جنس ذرات ساینده بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات تولیدی دارد، همچنین افزایش نیروی لپن‌کاری، کاهش زمان لپن‌کاری، استفاده از ذرات ساینده از جنس اکسید آلومینیوم به جای کاربید سیلیسیم<sup>۱</sup> و استفاده از سیال روغنی به جای سیال از جنس سفید سبب افزایش نرخ برداشت ماده، همچنین افزایش نیرو و زمان لپن‌کاری، استفاده از ذرات ساینده از جنس اکسید آلومینیوم به جای ذرات ساینده کاربید سیلیسیم و استفاده از سیال روغنی به جای سیال از جنس 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 ساینده را بر نرخ برداشت ماده، تختی، زبری و توپوگرافی<sup>۲</sup> سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده و دریافتند نوع ذرات ساینده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نرخ برداشت ماده ندارد، ولی بر زبری و توپوگرافی سطح قطعات لپن‌کاری شده تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.

آن و پارک [14] اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، فشار لپن‌کاری و غلظت ذرات ساینده در دوغاب را در فرآیند لپن‌کاری تخت قطعات کاری از جنس آلومینیا، فریت Ni-Zn<sup>۴</sup> و شیشه سیلیکات سدیم<sup>۵</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>۶</sup> با استفاده از دستگاه لپن‌کاری لجیتک پی‌ام ۴<sup>۷</sup> اثر پارامترهای زمان لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده 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 ساینده در دوغاب، نوع سیال لپن‌کاری، نرخ تغذیه دوغاب ساینده، اندازه ذرات ساینده، 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 دریافته است که افزایش فشار لپن‌کاری، افزایش سرعت صفحه لپ، افزایش نرخ تغذیه دوغاب ساینده و بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود. وجود یا نبود و همچنین تعداد شیارهای شعاعی صفحه لپ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نرخ برداشت ماده نمی‌گذارد.

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

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

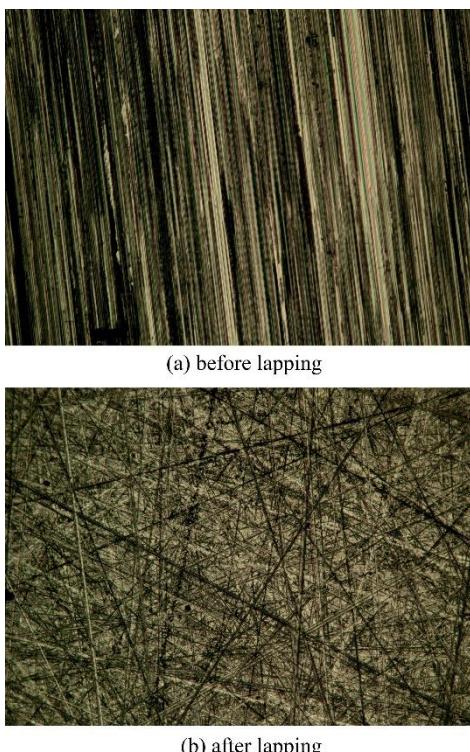
<sup>6</sup> Quartz

<sup>7</sup> Logithec PM4

در شکل ۲-a تصویر بزرگ نمایی سطح قطعه کار سنگ زنی و آماده شده برای انجام فرآیند لپن کاری نشان داده شده است. در شکل ۲-b سطح قطعه کار پس از انجام فرآیند لپن کاری نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود برخلاف سطح قطعه سنگ زنی شده که دارای شیارهایی در یک جهت مشخص، سطح قطعه لپن کاری شده دارای شیارهایی در جهات مختلف است که هر کدام از این شیارهای به صورت تصادفی در یک جهت قرار گرفته اند. وجود شیارهای بی جهت<sup>۲</sup> در سطح قطعات لپن کاری شده سبب افزایش قابلیت نگهداری روانکار<sup>۳</sup> در قطعاتی می شود که روی یکدیگر می لغزند [20,23].

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>۴</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 آزمایش ها تا حد امکان ثابت نگهداشته شده اند.

تمام آزمایش ها در دمای محیط کارگاه انجام شده و مدت زمان انجام فرآیند لپن کاری در هر آزمایش 60 دقیقه است. دوغاب ساینده مورد استفاده در آزمایش ها از ذرات ساینده ای از جنس اکسید آلومینیوم که با سیال لپن کاری مخلوط و تشکیل شده است. هنگام انجام آزمایش ها دوغاب ساینده با نرخ ثابت 2 میلی لیتر بر دقیقه بر صفحه لپ ریخته می شود. قطعات مورد استفاده در آزمایش ها دارای زبری سطح اولیه ( $R_a = 950 \pm 50$  نانومتر) و عدم تختی اولیه  $5.598 \pm 0.311$  میکرومتر است. برای اندازه گیری زبری سطح قطعات پیش و پس از فرآیند لپن کاری از دستگاه زبری سنج سورفتست



شکل ۲ سطح قطعه کار قبل و بعد از لپن کاری

<sup>2</sup> Undirected Processing Traces

<sup>3</sup> Lubricant Retention

<sup>4</sup> Signal Factor

ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری و فشار لپن کاری به دست آورده شده و در نهایت با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی تک هدفه و چند هدفه از ذرات به بهینه سازی نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده پرداخته شده است.

## ۲- مواد و تجهیزات مورد نیاز و روش انجام آزمایش ها

در این تحقیق از دستگاه لپن کاری LAPMASTER 15<sup>۱</sup> که در شکل ۱ نشان داده شده برای انجام آزمایش های فرآیند لپن کاری تخت یک طرفه استفاده شده است. قطعات مورد استفاده در آزمایش ها از جنس فولاد 440c با سختی HV 620 است. قطعات به صورت استوانه هایی با قطر 38.1 میلی متر و ارتفاع 10 میلی متر است. آنالیز شیمیایی قطعات مورد استفاده در این تحقیق به وسیله دستگاه کوانتمتر ARL 3560 OES انجام شده و نتایج آن در جدول ۱ 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 می شود؛ بنابراین مقدار اضافه بار کمتری برای فرآیند لپن کاری باقی خواهد ماند و در نتیجه هزینه و زمان تولید کاهش می یابد. در صنعت معمولاً پیش از فرآیند لپن کاری عملیات سنگ زنی روی قطعه کار صورت می گیرد [24,23]. در این تحقیق نیز پیش از انجام فرآیند لپن کاری سطح قطعات سنگ زنی شده است.



شکل ۱ دستگاه لپن کاری 15 LAPMASTER

شکل ۱ دستگاه لپن کاری 15 LAPMASTER

جدول ۱ ترکیب شیمیایی قطعات کار از جنس فولاد 440c

Table 1 Chemical composition of 440c steel workpieces

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

<sup>1</sup> LAPMASTER 15

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 می‌شود. پس از اتمام هر آزمایش ابتدا قطعه کار تمیز شده سپس وزن، زبری سطح و عدم تختی آن اندازه‌گیری می‌شود. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها 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 شکل‌های 5-3 نشان داده است. همان‌طور که در شکل‌های 3 و 4 مشاهده می‌شود 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 می‌یابد، 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 می‌کند؛ دلیل این پدیده این است که در ابتدا افزایش فشار لپن کاری سبب افزایش عمق خراش‌های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه کار و درنتیجه افزایش نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده می‌شود. 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 می‌شود درنتیجه نرخ برداشت ماده و زبری سطح شروع به کاهش می‌کند.

براساس شکل 5 افزایش فشار لپن کاری سبب کاهش خطای تختی قطعات لپن کاری شده می‌شود. افزایش فشار لپن کاری سبب افزایش فشار به سطح قطعه کار شده و درنتیجه بر جستگی‌های روی سطح قطعه کار هموارتر شده و عدم تختی قطعات لپن کاری شده کاهش می‌یابد.

#### 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 شکل‌های 6-8 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود 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 می‌یابد، ولی با عبور درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری از مقدار معینی (20%)

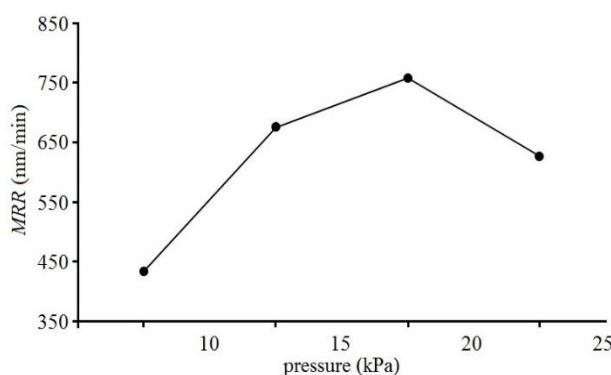


Fig. 3 Effect of lapping pressure on average values for material removal rate

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

اس جی 410<sup>1</sup> ساخت شرکت میتوتویو<sup>2</sup> استفاده شده است. این دستگاه زبری سنج قادر است  $R_a$  را با دقت (قدرت تشخیص) یک نانومتر اندازه‌گیری کند. زبری سطح در 5 نقطه از سطح هر قطعه برای افزایش صحت نتایج اندازه‌گیری 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>3</sup> اندازه‌گیری 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، نور قرمز با محاسبه نرخ برداشت ماده از رابطه (1) استفاده شده است.

اندازه‌گیری کند.

در این تحقیق برای اندازه‌گیری نرخ بردashت ماده از یک ساعت برای اندازه‌گیری زمان فرآیند لپن کاری و از ترازوی الکترونیکی HR-200 که قادر است تا وزن قطعات را با دقت (قدرت تشخیص) 0.1 میلی‌گرم اندازه‌گیری کند برای اندازه‌گیری کاهش جرم قطعه در طول فرآیند لپن کاری استفاده شده است. برای محاسبه نرخ بردashت 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 آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش عاملی کامل<sup>4</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 آزمایش‌ها تکرار شده است.

پیش از انجام آزمایش‌ها ابتدا قطعات از میله‌ای از جنس فولاد 440c بریده، سپس قطعات سنگزده شده و زبری سطح، عدم تختی و وزن آن‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. قطعاتی که اندازه‌های آن‌ها در محدوده‌های 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 آزمایش‌ها انتخاب می‌شوند. 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 می‌شوند. دوغاب ساینده در پمپ تغذیه دوغاب ساینده ریخته شده و دستگاه لپن کاری برای یک دقیقه روشن می‌شود تا دوغاب ساینده بر صفحه لپ ریخته شده و ذرات ساینده در سطح صفحه لپ فرو روند. قطعه کار درون قفسه لپن کاری قرارداده شده و وزنه‌ای برای اعمال فشار لپن کاری روی قطعه کار قرار داده می‌شود. با تغییر جرم وزنه می‌توان فشار لپن کاری مورد

جدول 2 عوامل کنترلی و سطوح آن‌ها

Table 2 Control factors and their levels

عامل کنترلی	سطح 4	سطح 3	سطح 2	سطح 1	سطح
درصد وزنی ذرات ساینده (%wt)	25	20	15	10	
اندازه ذرات ساینده (μm)	122	63	32	16	
فشار لپن کاری (kPa)	25	20	15	10	

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

<sup>2</sup> Mitutoyo

<sup>3</sup> Optical Flat

<sup>4</sup> Full Factorial

جدول ۳ نتایج آزمایشگاهی

Table 3 Experimental results

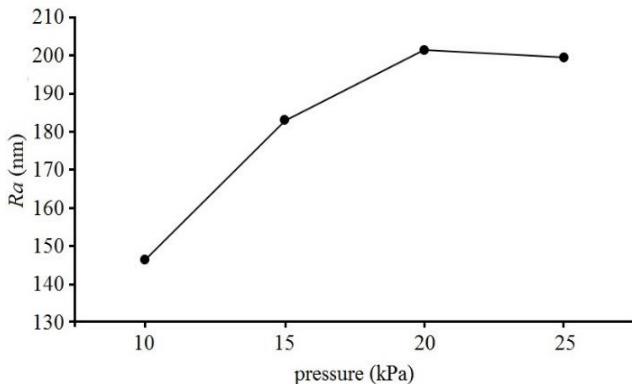


Fig. 4 اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن کاری شده

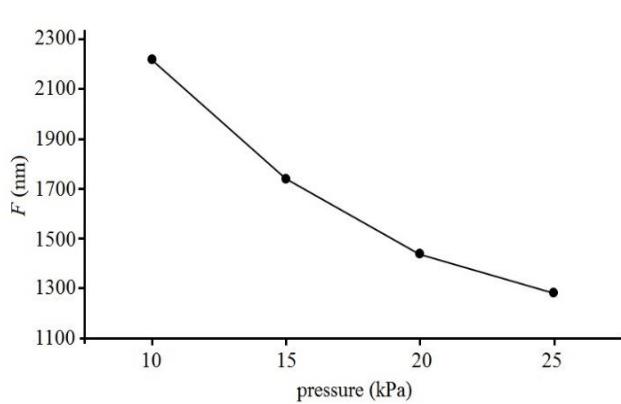


Fig. 5 اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن کاری شده

شکل ۴ اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن کاری شده را نشان می‌کند. در این شکل، زبری سطح (Ra) با افزایش فشار لپن کاری از ۱۰ کیلوپاسکار (kPa) به ۲۵ کیلوپاسکار (kPa) از ۱۴۸ نماینده (nm) به ۲۰۰ نماینده (nm) افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که فشار لپن کاری می‌تواند بر روی کاهش زبری سطح موثر باشد.

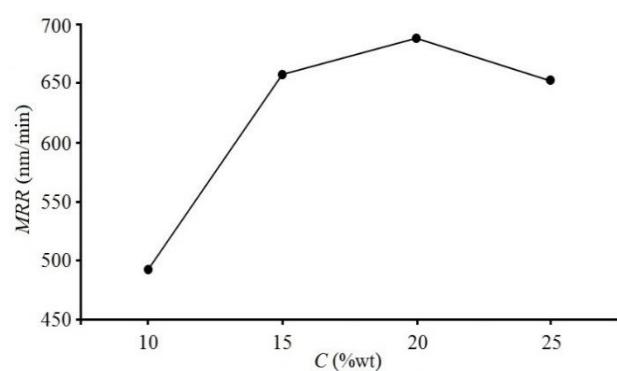


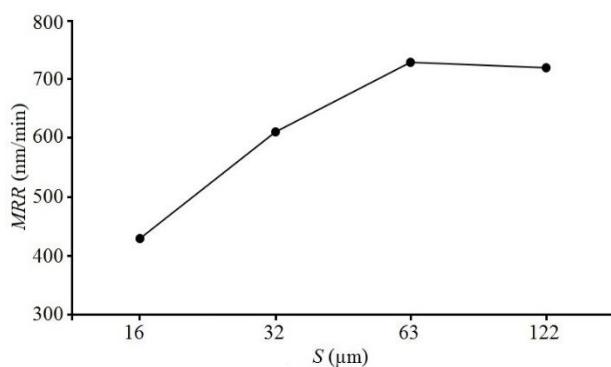
Fig. 6 اثر درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده

شکل ۶ اثر درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده را نشان می‌کند. در این شکل، نرخ برداشت ماده (MRR) با افزایش میزان کافی ذرات ساینده از ۷% به ۲۰٪ از ۴۹۰ mm/min به ۶۹۰ mm/min افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش میزان کافی ذرات ساینده می‌تواند بر روی افزایش نرخ برداشت ماده موثر باشد.

عدم تختی (nm)	زبری سطح (nm)	نرخ برداشت ماده (nm/min)	درصد وزنی ذرات ساینده (%wt)	اندازه ذرات ساینده (µm)	فشار شماره لپن کاری آزمایش
2021	79	136	10	16	10
1555	119	350	10	16	15
1399	138	441	10	16	20
1088	141	319	10	16	25
2177	134	246	10	32	10
1710	174	542	10	32	15
1555	193	609	10	32	20
1244	193	493	10	32	25
2332	197	411	10	63	10
1866	232	659	10	63	15
1555	253	729	10	63	20
1399	247	595	10	63	25
2488	226	503	10	122	10
2021	249	675	10	122	15
1555	266	670	10	122	20
1399	259	496	10	122	25
1866	59	264	15	16	10
1399	94	514	15	16	15
1088	112	616	15	16	20
933	111	474	15	16	25
2021	122	447	15	32	10
1555	159	701	15	32	15
1244	179	782	15	32	20
1244	177	646	15	32	25
2332	182	569	15	63	10
1866	223	813	15	63	15
1555	242	909	15	63	20
1399	239	763	15	63	25
2643	205	564	15	122	10
2021	244	807	15	122	15
1710	259	891	15	122	20
1555	252	755	15	122	25
1710	53	306	20	16	10
1244	89	544	20	16	15
1088	106	635	20	16	20
933	108	494	20	16	25
2021	119	489	20	32	10
1399	157	740	20	32	15
1088	174	817	20	32	20
1088	171	691	20	32	25
2177	173	591	20	63	10
1710	212	857	20	63	15
1399	230	932	20	63	20
1244	226	796	20	63	25
2488	194	593	20	122	10
2021	229	831	20	122	15
1710	249	917	20	122	20
1399	244	780	20	122	25
2021	73	252	25	16	10
1555	104	493	25	16	15
1244	127	594	25	16	20
1088	131	441	25	16	25
2021	128	440	25	32	10
1710	165	699	25	32	15
1399	185	778	25	32	20
1244	189	654	25	32	25
2332	183	571	25	63	10
1866	224	789	25	63	15
1555	242	892	25	63	20
1555	241	792	25	63	25
2799	213	553	25	122	10
2332	250	774	25	122	15
1866	266	895	25	122	20
1710	262	822	25	122	25

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

دلیل این پدیده این است که در ابتدا برای انجام فرآیند لپن کاری به میزان کافی ذرات ساینده در سیال لپن کاری وجود ندارند، درنتیجه 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 می‌شود، پس از



**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 می‌شود. ذرات ساینده بزرگ‌تر سبب ایجاد خراش‌ها و حفره‌های بزرگ‌تری در سطح قطعات لپن کاری شده می‌گردد، در نتیجه پستی و بلندی‌های سطح قطعات لپن کاری شده بزرگ‌تر شده که این امر سبب افزایش خطای تختی قطعات لپن کاری شده می‌شود.

**3-4-3- مدل‌سازی فرآیند لپن کاری به وسیله شبکه عصبی مصنوعی**  
پیش از انجام بهینه‌سازی فرآیند لپن کاری باید مدلی برای پیش‌بینی نتایج حاصل از این فرآیند به دست آورد. این مدل باید بتواند مقادیر خروجی‌های آزمایش‌ها (متغیرهای پاسخ) را با استفاده از مقادیر متغیرهای کنترلی پیش‌بینی 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 مدل‌سازی فرآیند لپن کاری از شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطاط استفاده شده است. براساس پژوهش‌های انجام شده شبکه‌های عصبی قادر است تا خروجی فرایندهای مختلف ماشین‌کاری و پرداخت کاری را با دقت بالایی پیش‌بینی کند، همچنین براساس پژوهش‌های انجام شده استفاده از الگوریتم پس انتشار خطاط برای آموزش شبکه‌های عصبی نتایج مطلوبی را در پیش‌بینی نتایج خروجی این فرآیندها داشته است [29-25].

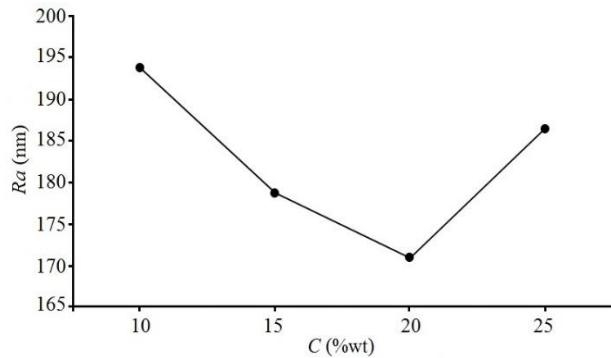
در الگوریتم پس انتشار خطاط به منظور به حداقل رساندن اختلاف بین نتایج پیش‌بینی شده و داده‌های خروجی واقعی (خطای آموزش)، وزن ارتباط داخلی شبکه عصبی در طی فرآیند آموزش تنظیم می‌شود. برای تنظیم وزن شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطاط، داده‌ها از لایه خروجی به لایه پنهان باز می‌گردند و دوباره پردازش می‌شوند. وزن در این الگوریتم با استفاده روابط (4-2) و (4-3) تعیین می‌شود [31,30].

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

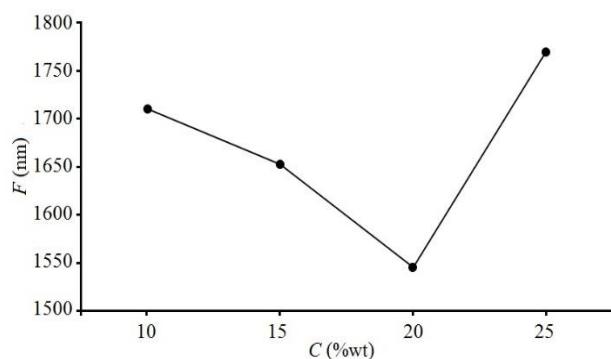
$$\Delta w_{ij} = -\mu \frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}} out_j \quad (3)$$

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

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



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



**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 شکل‌های 9-11 نشان داده شده است. در شکل 9 مشاهده می‌شود که در مقادیر کوچک اندازه ذرات ساینده با بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده به تدریج نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد، ولی با عبور اندازه ذرات ساینده از مقدار معینی (63 میکرومتر)، نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می‌کند. دلیل این پدیده این است که در ابتدا بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش عمق و پهنای خراش‌های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه کار و در نتیجه افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود، 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 می‌شود. در نتیجه نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می‌کند.

همان‌طور که در شکل 10 نشان داده شده است با بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده، زبری سطح قطعات لپن کاری شده افزایش می‌یابد. بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش عمق و پهنای خراش‌های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی سطح قطعه کار شده و در نتیجه سبب افزایش زبری سطح قطعات لپن کاری شده می‌شود. 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 می‌شود.

<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 ۱.۷٪، ۲.۵٪ و ۳.۳٪ و میانگین درصد خطای آزمایش برای نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده به ترتیب ۳٪، ۳.۱٪ و ۳.۲٪ است. کوچک بودن میزان این خطاهای نزدیک بودن مقادیر خطاهای آموزش و آزمایش نشان‌دهنده آموزش صحیح و به اندازه شبکه‌های عصبی است.

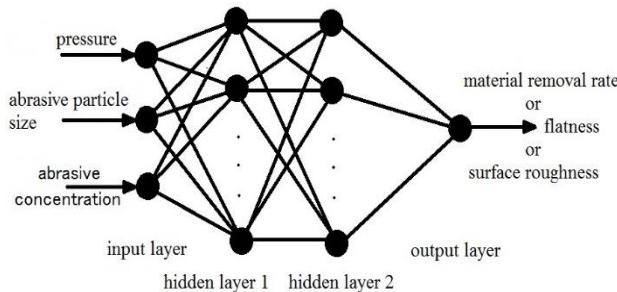


Fig. 12 the construction used in artificial neural network models for lapping process

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

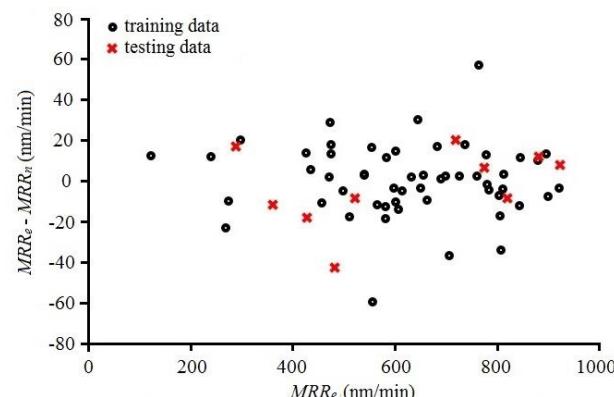


Fig. 13 Difference between material removal rate obtained from experiments and predicted by artificial neural network

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

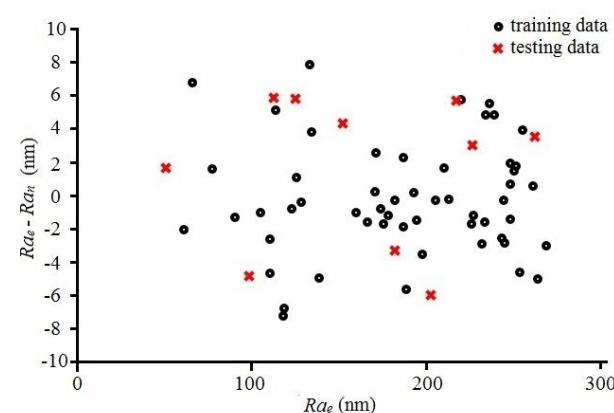
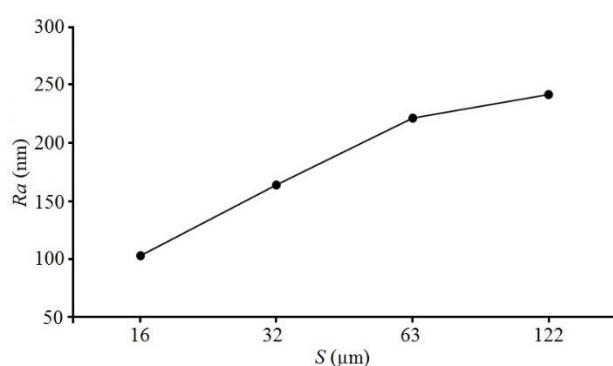


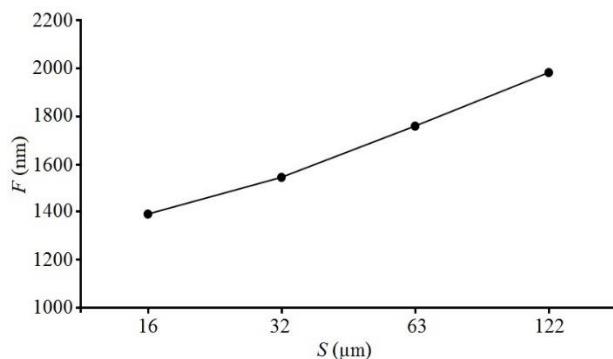
Fig. 14 Difference between surface roughness obtained from experiments and predicted by artificial neural network

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



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

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



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

شکل 12 اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر زبری سطح 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 ۳ 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 آن جا که محدوده و واحدهای داده‌های ورودی فرآیند با یکدیگر تفاوت دارند، برای افزایش سرعت آموزش و کاهش خطای تختی شبکه عصبی، داده‌های ورودی در بازه صفر تا یک نرمال شده‌اند.

از میان داده‌های نشان داده شده در جدول ۳ داده‌های ۵۴ آزمایش برای آموزش شبکه‌های عصبی ایجاد شده و داده‌های ۱۰ آزمایش برای آزمون شبکه‌های عصبی ایجاد شده، به کار برد شده‌اند. انتخاب داده‌های مورد استفاده برای آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی ایجاد شده به صورت تصادفی انجام شده است.

در شکل‌های 13-۱۵ 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 آزمایشی به خوبی پاسخ داده و تطبیق مناسبی با داده‌های

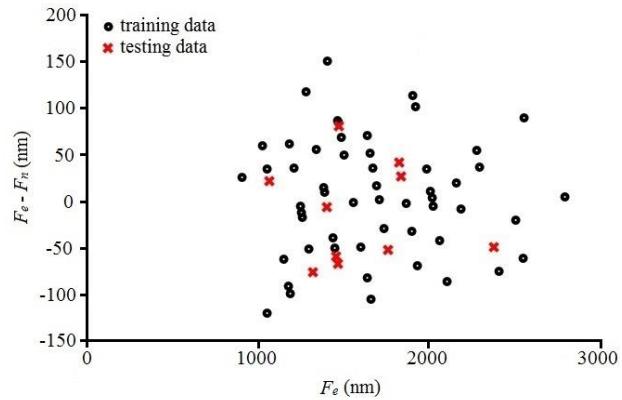
در این تحقیق از نرم‌افزار متلب<sup>1</sup> برای بهینه‌سازی فرآیند به روش از دحام ذرات (PSO<sup>2</sup>) استفاده شده و حالت‌های بهینه برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت ماده، کمترین زبری سطح و کمترین خطای تختی قطعه لپن‌کاری برداشت شده به وسیله این نرم‌افزار به دست آورده شده است. حالت بهینه برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت ماده در فشار لپن‌کاری 19.7 کیلوپاسکال، درصد وزنی 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 آزمایش‌های انجام شده (932 میکرومتر بر دقیقه) بیشتر است. حالت بهینه برای رسیدن به کمترین زبری سطح قطعه لپن‌کاری شده در فشار لپن‌کاری 10 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 19.1% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط زبری سطح قطعه لپن‌کاری سطح به دست آمده از نانومتر به دست آمده است که از کمترین زبری سطح به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده (53 نانومتر) کمتر است. حالت بهینه برای رسیدن به کمترین خطای تختی در فشار لپن‌کاری 25 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 20.7% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط خطای تختی قطعه لپن‌کاری شده برابر با 933 نانومتر به دست آمده است. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود این مقدار برابر با کمترین خطای تختی به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده است.

بزرگ‌ترین مشکل فرآیند لپن‌کاری، پایین بودن نرخ برداشت ماده در این فرآیند است که این امر سبب افزایش قابل ملاحظه هزینه و زمان تولید می‌شود؛ بنابراین در فرآیند لپن‌کاری انتخاب شرایطی که بتواند علاوه‌بر 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 علاوه‌بر بهینه‌سازی تک هدفه فرآیند لپن‌کاری، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند‌هدفه از دحام ذرات، به بهینه‌سازی همزمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات پرداخته شده و بهینه پارت و جبهه پارت مربوطه به دست آورده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه از دحام ذرات (MOPSO) در سال 2004 توسط کوتلو و همکاران مطرح شد. این الگوریتم که تکامل یافته الگوریتم بهینه‌سازی از دحام ذرات ساده است، یکی از معروف‌ترین و برکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه است. در الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه از دحام ذرات یک مفهوم به نام مخزن به الگوریتم بهینه‌سازی از دحام ذرات ساده اضافه شده است. اعضای مخزن بیان‌گر جبهه پارت و شامل ذرات نامغلوب<sup>3</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 آنها در مخزن
- 3- تقسیم‌بندی فضای هدف

4- انتخاب ذره رهبر که مشابه بهترین خاطره جمعی در الگوریتم بهینه‌سازی از دحام ذرات ساده است. برای این کار از بین تقسیمات ایجاد شده در مرحله قبل یکی از این خانه‌ها انتخاب می‌شود. هر قدر تعداد اعضای نامغلوب موجود در یک خانه کمتر باشد، شанс انتخاب آن خانه بیشتر است. این کار به ت نوع



شکل ۱۵ اختلاف خطای تختی به دست آمده از آزمایش‌ها و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی

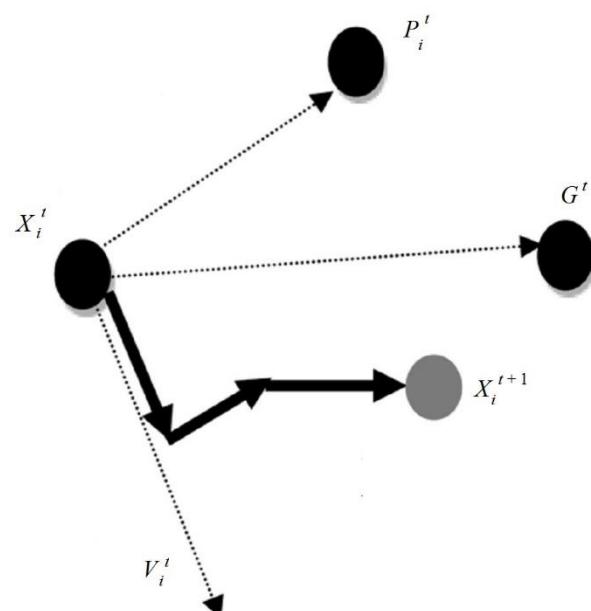
### ۵-۳- بهینه‌سازی فرآیند لپن‌کاری

الگوریتم بهینه‌سازی از دحام ذرات در سال 1995 توسط کندی و ابرهارت [32] مطرح شد. این الگوریتم که از پرواز گروهی پرنده‌گان الهام گرفته شده است، با ایجاد یک جمعیت تصادفی از ذرات (پاسخ‌های ممکن) شروع می‌شود. حرکت و جستجوی هر ذره در دو جهت صورت می‌گیرد؛ به سمت بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به آن رسیده است و به سمت محاسبه می‌شود.

$$V_i^{t+1} = WV_i^t + c_1r_1(p_i^t - X_i^t) + c_2r_2(G_t - X_i^t) \quad (5)$$

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

در این مقاله مقادیر  $c_1$  و  $c_2$  و  $W$  به کمک روش سعی و خطأ به ترتیب برابر با 0.5 و 2.5 و 0.15 انتخاب شده‌اند.



شکل ۱۶ نحوه عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی از دحام ذرات [32]

<sup>1</sup> MATLAB

<sup>2</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>3</sup> Non-dominated

تختی قطعات لپن‌کاری شده است. با استفاده از این الگوریتم بهینه‌سازی می‌توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را با نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این الگوریتم بهینه‌سازی علاوه‌بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه فولاد c 440، تأثیر پارامترهای فشار لپن‌کاری، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده، بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده با استفاده از روش آزمایشگاهی بررسی شده است. از نتایج آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر حاصل می‌شود.

1- در مقادیر کوچک فشار لپن‌کاری، با افزایش فشار، به تدریج مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده افزایش می‌یابد، ولی با عبور فشار لپن‌کاری از مقدار معینی (20 کیلوپاسکال)، مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده شروع به کاهش می‌کنند.

2- افزایش فشار لپن‌کاری سبب کاهش عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

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

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

5- با بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده، زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده افزایش می‌یابد.

6- بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌شود.

در ادامه این تحقیق با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات تکدهدفه به بهینه‌سازی این فرآیند لپن‌کاری پرداخته شده است. نتایج بهینه‌سازی تک هدفه نشان می‌دهند که بیشترین نرخ برداشت ماده در فشار لپن‌کاری 19.7 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 19.3% و اندازه ذرات ساینده 66 میکرومتر، کمترین زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده در فشار لپن‌کاری 10 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 19.1% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر و کمترین خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده در فشار لپن‌کاری 25 کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری 20.7% و اندازه ذرات ساینده 16 میکرومتر به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چنددهدفه به بهینه‌سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و عدم تختی قطعات لپن‌کاری شده پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چنددهدفه ازدحام ذرات می‌توان قطعاتی با زبری سطح و تختی مورد نیاز را با نرخ برداشت ماده بالا تولید کرد. در نتیجه با استفاده از این روش علاوه‌بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

و پراکنده‌گی بهتر پاسخ‌ها کمک می‌کند. در نهایت از میان ذرات نامغلوب خانه

انتخاب شده یکی به صورت تصادفی به عنوان ذره رهبر انتخاب می‌شود.

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، آن‌گاه موقعیت جدید جای بهترین تجربه را می‌گیرد. اگر موقعیت جدید توسط بهترین تجربه مغلوب شود، هیچ اقدامی صورت نمی‌گیرد. اگر هیچ کدام از این موارد رخ ندهد یکی از دو موقعیت بالا به طور تصادفی به عنوان بهترین تجربه در نظر گرفته می‌شود.

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 خانه‌ها انتخاب می‌شود. هر قدر تعداد اعضای نامغلوب موجود در یک خانه بیشتر باشد، شанс انتخاب آن خانه بیشتر است. این کار به تتو و پراکنده‌گی بهتر پاسخ‌ها کمک می‌کند. در نهایت از میان ذرات نامغلوب خانه انتخاب شده یکی به صورت تصادفی انتخاب و حذف می‌شود.

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

در این تحقیق برای بهینه‌سازی چنددهدفه به روش ازدحام ذرات از کدهای نوشته شده در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. بهینه پارتو و جبهه پارتو به دست آمده از نرم‌افزار متلب در جدول 4 آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی چنددهدفه ازدحام ذرات، ابزاری مفید و قدرتمند برای بهینه‌سازی هم‌زمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای

جدول 4 بهینه پارتو و جبهه پارتو

Table 4 Pareto optimal solutions and Pareto front

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

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 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. Agbaraj, 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. Fulmal, 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.

## 5- فهرست عالیم

درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری (%)wt	<i>C</i>
پارامتر شناختی	<i>c<sub>1</sub></i>
پارامتر اجتماعی	<i>c<sub>2</sub></i>
قطر قطعه کار (cm)	<i>d</i>
خروجی مطلوب برای نرون-kام	<i>d<sub>pk</sub></i>
خطای آموزش شبکه عصبی	<i>E<sub>p</sub></i>
خطای تختی (nm)	<i>F</i>
خطای تختی به دست آمده از آزمایش‌ها (nm)	<i>F<sub>e</sub></i>
خطای تختی پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm)	<i>F<sub>n</sub></i>
بهترین موقعیتی که مجموعه ذرات به آن رسیده‌اند	<i>G</i>
تعداد نرون‌های شبکه عصبی مصنوعی	<i>K</i>
تعداد داده‌های آزمایشی	<i>P</i>
نرخ برداشت ماده (nm/min)	<i>MRR</i>
نرخ برداشت ماده به دست آمده از آزمایش‌ها (nm/min)	<i>MRR<sub>e</sub></i>
نرخ برداشت ماده پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm/min)	<i>MRR<sub>n</sub></i>
خروجی نرون-زام	<i>out<sub>j</sub></i>
بهترین موقعیتی که یک ذره به آن رسیده است	<i>p</i>
خروجی محاسبه شده برای نرون-kام	<i>o<sub>pk</sub></i>
عددی تصادفی بین صفر و یک	<i>r</i>
میانگین زبری سطح (nm)	<i>Ra</i>
میانگین زبری سطح به دست آمده از آزمایش‌ها (nm)	<i>Ra<sub>e</sub></i>
میانگین زبری سطح پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (nm)	<i>Ra<sub>n</sub></i>
میانگین اندازه ذرات ساینده (μm)	<i>S</i>
سرعت ذره	<i>V</i>
موقعیت ذره	<i>X</i>
اینرسی وزنی	<i>W</i>
وزن اتصال بین نرون‌های <i>i</i> و <i>j</i>	<i>w<sub>ij</sub></i>
عالیم یونانی	
نرخ آموزش یا همگرایی در شبکه عصبی	<i>μ</i>
اختلاف ارتفاع قطعات پیش و پس از فرآیند لپن کاری (nm)	<i>Δh</i>
اختلاف جرم قطعات پیش و پس از فرآیند لپن کاری (mg)	<i>Δm</i>
زمان لپن کاری (min)	<i>Δt</i>
چگالی (gcm <sup>-3</sup> )	<i>ρ</i>
بالاتنویس‌ها	
شماره تکرار	<i>t</i>
زیرنویس‌ها	<i>i</i>
شماره ذره	<i>i</i>

## 6- تقدیر و تشکر

نویسنده‌گان مقاله بر خود لازم می‌دانند از خدمات مهندس ظهیر کریمی و

- 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