



بررسی و بهینه‌سازی فرآیند لپن کاری تخت با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب

محمد شفیع علویجه، حسین امیرآبادی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۲-۱۸
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۰۵
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۲۸

کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی چندهدفه
الگوریتم ژنتیک
لپن کاری تخت یک طرفه
فولاد ۴۴۰C
مرتب‌سازی نامغلوب

خلاصه: فرآیند لپن کاری یکی از مهم‌ترین فرآیندهای پرداخت کاری به‌منظور رسیدن به سطوحی با تختی بالا است. در این مقاله 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، تختی و زبری سطح قطعات لپن کاری شده مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها توسط دستگاه لپن کاری لپ مستر ۱۵ و بر روی قطعاتی از جنس فولاد ۴۴۰C انجام شده‌اند. مهم‌ترین مشکل در فرآیندهای لپن کاری، پایین بودن نرخ برداشت ماده است که سبب افزایش هزینه و زمان تولید می‌گردد. بنابراین در فرآیندهای لپن کاری، انتخاب شرایطی که بتواند علاوه بر تولید قطعاتی با دقت‌های هندسی و زبری سطح موردنیاز، نرخ برداشت ماده بالایی نیز داشته باشد بسیار مهم و ضروری است. در این مقاله برای اولین بار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب به بهینه‌سازی همزمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده پرداخته و بهینه پارتو مربوطه، بدست آورده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که این الگوریتم بهینه‌سازی ابزاری مفید و قدرتمند برای بهینه‌سازی همزمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده است و 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 علاوه بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

فرآیند لپن کاری^۱، نوعی فرآیند پرداخت کاری ظریف است که معمولاً جهت پرداخت کاری نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برداشت ماده در این فرآیند به‌وسیله ذرات ساینده‌ای که با سیالی مخلوط شده و بین ابزار لپن کاری و قطعه کار ریخته یا مالیده می‌شوند، انجام می‌شود. پرکاربردترین نوع فرآیند لپن کاری مورد استفاده در صنعت، لپن کاری یک‌طرفه سطوح تخت^۲ است. بنابراین در این تحقیق نیز این نوع فرآیند لپن کاری مورد بررسی قرار گرفته است [۱].

در شکل ۱ طرح شماتیکی از فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود،

قطعه‌کار درون قفسه لپن کاری^۳ و بر روی صفحه لپی که در طول فرآیند لپن کاری یک حرکت دورانی انجام می‌دهد، قرار می‌گیرد. از آنجایی که بطور معمول وزن قطعه‌کار به تنهایی نمی‌تواند فشار لازم برای انجام مناسب فرآیند لپن کاری را تأمین نماید معمولاً بوسیله یکسری وزنه که بر روی قطعه‌کار قرار می‌گیرند فشار لپن کاری لازم تأمین می‌شود. در اثر حرکت نسبی صفحه لپ و قطعه‌کار، بوسیله ذرات ساینده موجود در دوغاب^۴ به تدریج براده‌های بسیار ریزی از سطح قطعه‌کار جدا شده و سطح قطعه‌کار پرداخت می‌گردد.

در ادامه برخی از مرتبط‌ترین تحقیقات انجام‌شده به این تحقیق آورده شده است. آن^۵ و پارک^۶ [۲] با استفاده از روش آزمایشگاهی،

- 3 Conditioning ring
- 4 Slurry
- 5 Ahn
- 6 Park

- 1 Lapping
- 2 Single sided lapping of flat workpieces

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hamirabadi@birjand.ac.ir



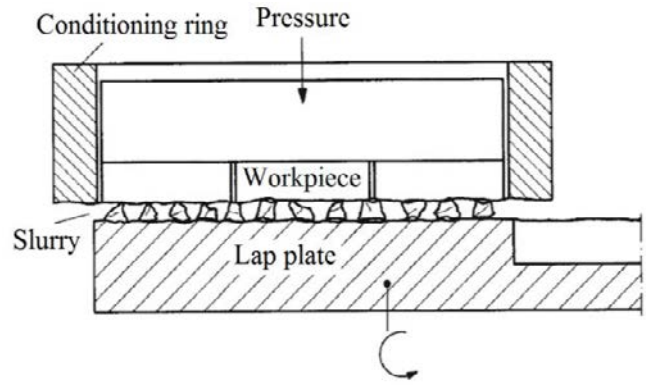
(R_a) قطعات لپن کاری شده که برابر با ۱۰ نانومتر است در سرعت ۱۰ دور بر دقیقه، فشار ۳۰ کیلو پاسکال و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب ۱۰٪، ایجاد می‌شود.

آسکانیو^۸ و همکاران [۶] در فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵، اثر اندازه ذرات ساینده، زمان و فشار لپن کاری را بر میزان ماده برداشته‌شده و زبری سطح قطعه لپن کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده، افزایش فشار و زمان لپن کاری سبب افزایش ماده برداشته‌شده از سطح قطعه کار می‌گردد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفته‌اند که کوچک‌تر شدن ذرات ساینده، کاهش فشار و افزایش زمان لپن کاری سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن کاری شده می‌گردد.

دشپانده^۹ و همکاران [۷] در فرآیند لپن کاری تخت قطعاتی از جنس برنز و فولاد ضدزنگ، اثر جنس ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده، تختی، زبری و توپوگرافی سطح قطعات لپن کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که نوع ذرات ساینده تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نرخ برداشت ماده ندارد ولی بر زبری و توپوگرافی سطح تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارد.

ایاما^{۱۰} و همکاران [۸] با استفاده از روش آزمایشگاهی، در فرآیند لپن کاری تخت قطعاتی از جنس کاربید سمانته^{۱۱} اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده و زمان لپن کاری را بر زبری سطح و نرخ بهبود زبری سطح قطعه لپن کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که کوچک‌تر شدن ذرات ساینده و افزایش زمان لپن کاری سبب کاهش زبری سطح قطعه لپن کاری شده می‌گردد؛ اما برای هر اندازه از ذرات ساینده پس از رسیدن به زبری سطح مشخصی، افزایش زمان دیگر سبب کاهش زبری سطح نمی‌گردد.

ژانگ^{۱۲} و همکاران [۹] در فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس فولاد اثر پارامترهای زمان لپن کاری، سرعت چرخش صفحه لپ، فشار لپن کاری و اندازه ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعه لپن کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها برای انجام آزمایش‌ها از ذرات ساینده اکسید آلومینیوم و دستگاه



شکل ۱: نمایش شماتیک فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه
Fig. 1: Schematic illustration of single side lapping

در فرآیند لپن کاری تخت قطعاتی از جنس آلومینا^۱، فریت^۲ Ni-Zn و شیشه سیلیکات سدیم^۳ اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، فشار لپن کاری و غلظت ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح بررسی کرده‌اند.

گولو^۴ و کلیملی^۵ [۳] در فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس فولاد ریخته‌گری شده GG6، اثر پارامترهای زمان و فشار لپن کاری را بر زبری سطح قطعات لپن کاری شده بررسی کرده‌اند. کمترین زبری سطح قطعات لپن کاری شده که برابر با ۰/۲ میکرومتر است در زمان لپن کاری ۲۵ دقیقه و فشار لپن کاری ۶۸۹/۵ کیلو پاسکال ایجاد شده است.

لامبروپولس^۶ و همکاران [۴] در فرآیند لپن کاری تخت سرامیک‌ها، اثر اندازه ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که بزرگ‌تر شدن ذرات ساینده سبب افزایش زبری سطح و نرخ برداشت ماده می‌گردد.

یوان^۷ و همکاران [۵] در فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس سرامیک با استفاده از روش آزمایشگاهی، اثر پارامترهای فشار لپن کاری، سرعت چرخشی صفحه لپ و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری را بر زبری سطح قطعات لپن کاری شده، بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که کمترین میزان زبری سطح

- 1 Alumina
- 2 Ni-Zn ferrite
- 3 Sodium silicate glass
- 4 Gullu
- 5 Calimli
- 6 Lambropoulos
- 7 Yuan

- 8 Ascanio
- 9 Deshpande
- 10 Iyama
- 11 Cemented Carbide
- 12 Zhang

یک مقدار مشخص سبب کاهش نرخ برداشت ماده می‌گردد. پارات^۴ و یاراسو^۵ [۱۳ و ۱۲] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس چدن با انجام یکسری آزمایش، اثر پارامترهایی همچون نیروی لپن‌کاری، زمان لپن‌کاری، جنس ذرات ساینده، غلظت ذرات ساینده در دوغاب و نوع سیال لپن‌کاری را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه گرفته‌اند که جنس ذرات ساینده، بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات تولیدی دارد. افزایش نیروی لپن‌کاری، کاهش زمان لپن‌کاری، استفاده از ذرات ساینده از جنس اکسید آلومینیوم بجای کاربید سیلیسیم و استفاده از سیال روغنی بجای سیال از جنس نفت سفید سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌گردد. افزایش نیرو و زمان لپن‌کاری، استفاده از ذرات ساینده از جنس اکسید آلومینیوم بجای کاربید سیلیسیم و استفاده از سیال روغنی بجای سیال از جنس نفت سفید سبب کاهش زبری سطح قطعات تولیدی می‌گردد.

فرحناکیان و شاه رجیبیان [۱۴] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس فولاد AISI ۵۲۱۰۰ با انجام یکسری آزمایش، اثر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، سرعت، فشار و زمان لپن‌کاری را بر زبری سطح و تختی قطعات لپن‌کاری شده بررسی کرده‌اند. نتایج بدست آمده نشان داده‌اند که افزایش اندازه ذرات ساینده، سرعت و فشار لپن‌کاری و کاهش زمان لپن‌کاری سبب افزایش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌گردد. افزایش فشار و زمان لپن‌کاری و کاهش اندازه ذرات ساینده و سرعت لپن‌کاری سبب افزایش تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌گردد.

اُتورک^۶ و همکاران [۱۵] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه با انجام یکسری آزمایش و به کمک شبکه عصبی مصنوعی اثر فشار لپن‌کاری، سرعت چرخش صفحه لپ و زمان لپن‌کاری را بر زبری سطح قطعه لپن‌کاری شده بررسی نموده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که کاهش فشار لپن‌کاری و سرعت چرخش صفحه لپ سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌گردد. افزایش زمان لپن‌کاری در ابتدا سبب کاهش زبری سطح می‌گردد اما پس از گذشت ۳۵ دقیقه، افزایش زمان لپن‌کاری دیگر سبب کاهش زبری

لپن‌کاری لپ‌مستر^۱ مدل ۱۲C استفاده کرده‌اند. آنها با استفاده از آنالیز واریانس نتیجه گرفته‌اند که پارامترهای اندازه ذرات ساینده، زمان لپن‌کاری، فشار لپن‌کاری و سرعت چرخش صفحه لپ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح قطعات تولیدی و پارامترهای اندازه ذرات ساینده، سرعت چرخش صفحه لپ و فشار لپن‌کاری به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت ماده دارند. آنها مشاهده کرده‌اند که افزایش زمان لپن‌کاری و سرعت چرخش صفحه لپ و کاهش اندازه ذرات ساینده و فشار لپن‌کاری سبب کاهش زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده می‌گردد. آنها همچنین مشاهده کرده‌اند که افزایش اندازه ذرات ساینده، فشار لپن‌کاری و سرعت چرخش صفحه لپ سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌گردد.

چونگ و همکاران [۱۰] در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه با انجام یکسری آزمایش، اثر فشار لپن‌کاری و استفاده همزمان از ذرات ساینده بزرگ و کوچک را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعه لپن‌کاری شده بررسی نموده‌اند. آنها برای انجام آزمایش‌ها از ماشین لپن‌کاری لجیتک^۲ مدل PM5 استفاده کرده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که افزایش فشار تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر زبری سطح ندارد ولی سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌گردد؛ همچنین استفاده همزمان از ذرات ساینده بزرگ و کوچک با نسبت برابر، بدون افزایش قابل‌ملاحظه زبری سطح سبب افزایش نرخ برداشت ماده می‌گردد.

جیانخیو^۳ و همکاران [۱۱] در فرآیند لپن‌کاری تخت با ذرات ساینده الماسه، اثر پارامترهای سرعت چرخش صفحه لپ، سرعت حمل‌کننده یا قفسه لپن‌کاری، فشار لپن‌کاری و اندازه ذرات ساینده را بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعه کار بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که اندازه ذرات ساینده، مهم‌ترین عامل مؤثر بر زبری سطح قطعه کار و نرخ برداشت ماده بوده و سرعت چرخش صفحه لپ، فشار لپن‌کاری و سرعت قفسه لپن‌کاری تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر زبری سطح ندارند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که افزایش اندازه ذرات ساینده سبب افزایش نرخ برداشت ماده و زبری سطح می‌گردد. آن‌ها همچنین مشاهده کرده‌اند که افزایش سرعت قفسه لپن‌کاری و افزایش فشار سبب افزایش نرخ برداشت ماده شده و افزایش سرعت چرخش صفحه لپ در ابتدا نرخ برداشت ماده را افزایش داده ولی پس از رسیدن به

4 Parate
5 Yarasu
6 Ozturk

1 Lapmaster
2 Logitech
3 Jianxiu

جدول ۱: ترکیب شیمیایی قطعه کار
Table 1: Chemical composition of workpiece

عنصر شیمیایی	آهن	کروم	کربن	مولیبدن	منگنز	سیلیسیم
درصد وزنی	فلز پایه	۱۷٫۲۶	۱٫۰۹	۰٫۴۹	۰٫۴۳	۰٫۴۰

قطعات لپن کاری شده سطح نمی‌گردد.

آزتورک و همکاران [۱۶] در فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه و یفرهای سیلیکونی با استفاده از روش طراحی آزمایش عاملی کامل^۱، اثر پارامترهایی زمان لپن کاری و سرعت چرخش صفحه لپ را بر زبری سطح قطعات لپن کاری شده بررسی کرده‌اند، سپس یک مدل رگرسیونی مناسب برای پیش‌بینی مقدار زبری سطح قطعه لپن کاری شده با استفاده از مقادیر پارامترهای زمان لپن کاری و سرعت چرخش صفحه لپ بدست آورده‌اند و در نهایت با استفاده از برخی الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه مانند الگوریتم بهینه‌سازی شبیه‌سازی آنیلینگ^۲، شرایطی را که در آن شرایط کمترین زبری سطح قطعات لپن کاری شده ایجاد می‌شود، بدست آورده‌اند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که کمترین زبری سطح قطعات لپن کاری شده در سرعت ۵۰ دور بر دقیقه و زمان لپن کاری ۴۵ دقیقه بدست می‌آید.

برخی از مهم‌ترین اهداف استفاده از فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه در تولید قطعات، افزایش تختی و کاهش زبری سطح قطعات تولید شده است. افزایش تختی و کاهش زبری سطح تأثیر بسیار زیادی بر افزایش عمر، کارایی و عملکرد صحیح قطعات تولیدی دارند و سبب کاهش اصطکاک و افزایش آب‌بندی می‌گردند. هرچند فرآیند لپن کاری مزایای بسیار زیادی از جمله رسیدن به دقت‌های ابعادی و هندسی فوق‌العاده بالا، کاهش تنش‌های سطحی، کاهش زبری سطح، کاهش عیوب سطحی و غیره را دارا است، اما نرخ برداشت ماده در این روش بسیار پایین است که این امر سبب افزایش قابل‌ملاحظه هزینه و زمان تولید می‌گردد. بنابراین در فرآیند لپن کاری انتخاب شرایطی که بتواند علاوه بر تولید قطعاتی با زبری سطح و عدم تختی پایین، نرخ برداشت ماده بالایی نیز داشته باشد، بسیار مهم و ضروری است [۱۷]. در این تحقیق به بررسی فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه قطعاتی از جنس فولاد ۴۴۰C پرداخته و برخلاف سایر تحقیقات انجام شده در

زمینه فرآیندهای لپن کاری که اکثراً به بهینه‌سازی تک‌هدفه پارامترهای مؤثر بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطاهای هندسی قطعات تولیدی پرداخته‌اند، برای اولین بار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب^۳، به بهینه‌سازی همزمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده پرداخته و بهینه پارتو و جبهه پارتو مربوطه ارائه شده است.

در ادامه نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده شرح داده شده، سپس مدلی ریاضی برای پیش‌بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، تختی و زبری سطح قطعات لپن کاری شده با استفاده از مقادیر اندازه ذرات ساینده، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری و فشار لپن کاری بدست آورده شده و در نهایت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب به بهینه‌سازی همزمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات تولیدی پرداخته شده است.

۲- آزمایش‌ها

قطعات کار مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد ۴۴۰C با سختی HV ۶۲۰ و به‌صورت استوانه‌هایی با قطر ۳۸/۱ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر می‌باشند. آنالیز شیمیایی قطعات کار مورد استفاده در این تحقیق بوسیله دستگاه کوانتومتر ARL 3560 OES انجام شده و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

به دلیل پایین بودن نرخ برداشت ماده در فرآیندهای لپن کاری و هزینه بالای این فرآیندها، معمولاً قبل از انجام فرآیند لپن کاری با استفاده از فرآیندهای پرداخت کاری دیگر، سطح قطعه کار پرداخت کاری شده و در نتیجه کیفیت سطح قطعه کار افزایش و خطاهای ابعادی و هندسی قطعه کاهش داده می‌شود. بنابراین مقدار ماده‌ای که در طول فرآیند لپن کاری باید از سطح قطعه کار

3 Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

1 Full factorial
2 Simulated annealing

جدول ۲: عوامل کنترلی و سطوح آن‌ها

Table 2: Control factors and their levels

سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	عامل کنترلی
۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	درصد وزنی ذرات ساینده، %wt
۱۲۲	۶۳	۳۲	۱۶	اندازه ذرات ساینده، μm
۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	فشار لپن کاری، kPa

ذرات ساینده و درصد وزنی ذرات ساینده موجود در دوغاب) که بیشترین تأثیر را بر متغیرهای پاسخ (نرخ برداشت ماده، تختی و زبری سطح قطعه) دارند؛ به عنوان عوامل کنترلی انتخاب شده و سطوح کنترلی مناسب برای هر یک از این عوامل کنترلی انتخاب شده‌اند. برای افزایش دقت نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها سایر عوامل تأثیرگذار بر فرآیند لپن کاری مانند سرعت دورانی صفحه لپ (۵۰ دور بر دقیقه)، جنس ذرات ساینده (اکسید آلومینیوم)، مشخصات و جنس صفحه لپ، مدت زمان انجام فرآیند لپن کاری در هر آزمایش (۶۰ دقیقه)، سیال دوغاب ساینده (سیال No. LMKT) و نرخ تغذیه دوغاب ساینده (۲ میلی‌لیتر بر دقیقه) در طول تمامی آزمایش‌ها تا حد امکان ثابت نگه‌داشته شده‌اند. برای طراحی آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش عاملی کامل استفاده شده و برای هر کدام از عوامل کنترلی مطابق جدول ۲، چهار سطح در نظر گرفته شده است. برای افزایش صحت نتایج، هر آزمایش با شرایط یکسان دو بار تکرار شده و در صورت عدم وجود اختلاف زیاد بین نتایج این دو آزمایش، میانگین نتایج بدست آمده به عنوان مقدار آن آزمایش در نظر گرفته شده است. در غیر اینصورت این دو قطعه کنار گذاشته شده و آزمایش‌ها تکرار شده‌اند.

قبل از انجام هر آزمایش، ذرات ساینده که از جنس اکسید آلومینیوم می‌باشند با نسبت وزنی مشخص شده برای آن آزمایش با سیال لپن کاری مخلوط شده سپس دوغاب ساینده در پمپ تغذیه دوغاب ریخته شده و دستگاه لپن کاری برای مدت زمان یک دقیقه روشن می‌گردد تا دوغاب بر روی صفحه لپ ریخته شده و ذرات ساینده بوسیله قفسه لپن کاری در سطح صفحه لپ فرو روند. سپس قطعه کار بر روی صفحه لپ و درون قفسه لپن کاری قرار داده شده و وزنه‌ای برای اعمال فشار روی قطعه قرار داده می‌شود. با تغییر جرم وزنه می‌توان فشار مورد نیاز برای انجام هر آزمایش را تنظیم کرد. بعد



شکل ۲: دستگاه لپن کاری لپ مستر ۱۵

Fig. 2: Lapmaster 15 lapping machine

برداشته شود کاهش یافته و در نتیجه هزینه و زمان تولید کاهش می‌یابد. معمولاً در صنعت قبل از فرآیندهای لپن کاری، عملیات سنگزنی بر روی قطعه کار صورت می‌گیرد [۱۷]. بنابراین در این تحقیق نیز پیش از انجام فرآیند لپن کاری، قطعات سنگزنی شده‌اند. پس از سنگزنی قطعات و قبل از انجام فرآیند لپن کاری، زبری سطح، تختی و وزن هر قطعه اندازه‌گیری می‌شود. به منظور افزایش یکنواختی قطعات کار و انجام آزمایش‌ها در شرایط تقریباً مشابه که سبب افزایش صحت نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌شود. تنها قطعاتی که شرایطی تقریباً مشابه داشته و اندازه‌های آنها در محدوده‌های قابل قبول قرار داشته باشند (زبری سطح اولیه $R_a \pm 0.95$ نانومتر و عدم تختی اولیه 0.311 ± 0.0598 میکرومتر)، برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شده و سایر قطعات کنار گذاشته شده‌اند.

در این تحقیق از دستگاه لپن کاری لپ مستر ۱۵^۱ که در شکل ۲ نشان داده شده برای انجام آزمایش‌های فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه استفاده شده است. با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین که در مقدمه این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند و همچنین نیازها و محدودیت‌های موجود، برخی از عوامل مؤثر بر فرآیند لپن کاری تخت یک‌طرفه (فشار لپن کاری، اندازه

1 Lapmaster



شکل ۳: دستگاه زبری سنج سورف تست SJ-۴۱۰
Fig. 3: Surfptest SJ-410 surface roughness tester



شکل ۴: تختی سنج نوری Chek-Lite
Fig. 4: Chek-Lite optical flat



شکل ۵: ترازوی الکترونیکی HR-۲۰۰
Fig. 5: HR-200 precision electronic balance

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر عوامل کنترلی بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن کاری شده

نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

از قرار دادن قطعه کار در قفسه لپن کاری، دستگاه لپن کاری مجدداً به مدت ۶۰ دقیقه با سرعت صفحه لپ ۵۰ دور بر دقیقه روشن گشته و دوغاب ساینده با نرخ تغذیه ثابت ۲ میلی لیتر بر دقیقه بر روی صفحه لپ ریخته می‌شود. در طول فرآیند لپن کاری به علت حرکت نسبی صفحه لپ و قطعه کار نسبت به یکدیگر، توسط ذرات ساینده موجود در دوغاب از سطح قطعه کار براده برداری صورت گرفته و به مرور زمان سطح قطعه کار پرداخت می‌گردد. پس از اتمام هر آزمایش ابتدا قطعه کار تمیز شده سپس وزن، زبری سطح و تختی آن اندازه‌گیری می‌گردد. قبل از انجام آزمایش بعدی باید سطح صفحه لپ به خوبی تمیز گردد زیرا به علت استفاده از ذرات ساینده‌ای با اندازه‌های مختلف در هر یک از آزمایش‌ها، باقی ماندن ذرات ساینده از آزمایش قبلی می‌تواند سبب ایجاد خطا در نتایج آزمایش بعدی گردد.

به منظور اندازه‌گیری زبری سطح قطعات قبل و بعد از فرآیند لپن کاری از دستگاه زبری سنج سورف تست^۱ SJ-410 ساخت شرکت میتوتویو^۲ که در شکل ۳ نشان داده شده و می‌تواند R_a را با دقت (قدرت تشخیص) یک نانومتر اندازه‌گیری کند، استفاده شده است. برای افزایش صحت نتایج، زبری سطح در ۵ نقطه از سطح هر قطعه اندازه‌گیری شده و میانگین این ۵ اندازه به عنوان زبری سطح آن قطعه در نظر گرفته شده است. میزان تختی قطعات قبل و بعد از فرآیند لپن کاری با استفاده از تختی سنج نوری^۳ نشان داده شده در شکل ۴ اندازه‌گیری شده است. نور مورد استفاده در این تختی سنج، نور قرمز با طول موج ۰/۶۲۲ میکرومتر است. از آنجا که عدم تختی برابر با تعداد خطوط مشاهده شده ضرب در نصف طول موج است. بنابراین، این دستگاه قادر است، عدم تختی را با دقت ۰/۳۱۱ میکرومتر اندازه‌گیری کند. برای اندازه‌گیری نرخ برداشت ماده از ترازوی الکترونیکی HR-200 که در شکل ۵ نشان داده شده و قادر است تا وزن قطعات را با دقت ۰/۱ میلی گرم اندازه‌گیری کند، استفاده شده است. برای محاسبه نرخ برداشت ماده از رابطه (۱) استفاده شده است [۹].

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

- 1 Surftest
- 2 Mitutoyo
- 3 Optical flat

جدول ۳: نتایج آزمایش‌ها

Table 3: Experimental results

شماره آزمایش	فشار لپن کاری، kPa	درصد وزنی ذرات ساییده	اندازه ذرات ساییده، μm	نرخ برداشت ماده، nm/min	زبری سطح، nm	عدم تختی، nm
۱	۱۰	۱۰	۱۶	۱۳۶	۷۹	۲۰۲۱
۲	۱۰	۱۰	۳۲	۲۴۶	۱۳۴	۲۱۷۷
۳	۱۰	۱۰	۶۳	۴۱۱	۱۹۷	۲۳۳۲
۴	۱۰	۱۰	۱۲۲	۵۰۳	۲۲۶	۲۴۸۸
۵	۱۰	۱۵	۱۶	۲۶۴	۵۹	۱۸۶۶
۶	۱۰	۱۵	۳۲	۴۴۷	۱۲۲	۲۰۲۱
۷	۱۰	۱۵	۶۳	۵۶۹	۱۸۲	۲۳۳۲
۸	۱۰	۱۵	۱۲۲	۵۶۴	۲۰۵	۲۶۴۳
۹	۱۰	۲۰	۱۶	۳۰۶	۵۳	۱۷۱۰
۱۰	۱۰	۲۰	۳۲	۴۸۹	۱۱۹	۲۰۲۱
۱۱	۱۰	۲۰	۶۳	۵۹۱	۱۷۳	۲۱۷۷
۱۲	۱۰	۲۰	۱۲۲	۵۹۳	۱۹۴	۲۴۸۸
۱۳	۱۰	۲۵	۱۶	۲۵۲	۷۳	۲۰۲۱
۱۴	۱۰	۲۵	۳۲	۴۴۰	۱۲۸	۲۰۲۱
۱۵	۱۰	۲۵	۶۳	۵۷۱	۱۸۳	۲۳۳۲
۱۶	۱۰	۲۵	۱۲۲	۵۵۳	۲۱۳	۲۷۹۹
۱۷	۱۵	۱۰	۱۶	۳۵۰	۱۱۹	۱۵۵۵
۱۸	۱۵	۱۰	۳۲	۵۴۲	۱۷۴	۱۷۱۰
۱۹	۱۵	۱۰	۶۳	۶۵۹	۲۳۲	۱۸۶۶
۲۰	۱۵	۱۰	۱۲۲	۶۷۵	۲۴۹	۲۰۲۱
۲۱	۱۵	۱۵	۱۶	۵۱۴	۹۴	۱۳۹۹
۲۲	۱۵	۱۵	۳۲	۷۰۱	۱۵۹	۱۵۵۵
۲۳	۱۵	۱۵	۶۳	۸۱۳	۲۲۳	۱۸۶۶
۲۴	۱۵	۱۵	۱۲۲	۸۰۷	۲۴۴	۲۰۲۱
۲۵	۱۵	۲۰	۱۶	۵۴۴	۸۹	۱۲۴۴
۲۶	۱۵	۲۰	۳۲	۷۴۰	۱۵۷	۱۳۹۹
۲۷	۱۵	۲۰	۶۳	۸۵۷	۲۱۲	۱۷۱۰
۲۸	۱۵	۲۰	۱۲۲	۸۳۱	۲۲۹	۲۰۲۱
۲۹	۱۵	۲۵	۱۶	۴۹۳	۱۰۴	۱۵۵۵
۳۰	۱۵	۲۵	۳۲	۶۹۹	۱۶۵	۱۷۱۰
۳۱	۱۵	۲۵	۶۳	۷۸۹	۲۲۴	۱۸۶۶
۳۲	۱۵	۲۵	۱۲۲	۷۷۴	۲۵۰	۲۳۳۲
۳۳	۲۰	۱۰	۱۶	۴۴۱	۱۳۸	۱۳۹۹

ادامه جدول ۳: نتایج آزمایش‌ها
Table 3: Experimental results

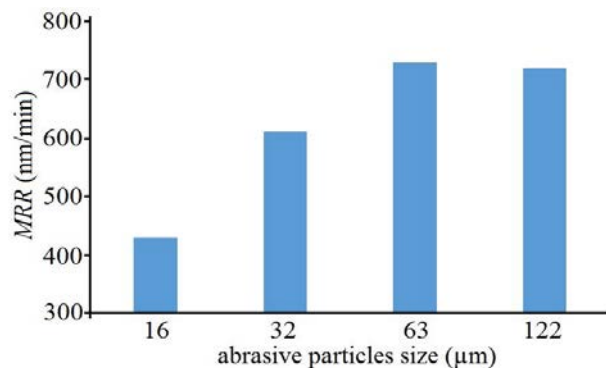
شماره آزمایش	فشار لپن‌کاری، kPa	درصد وزنی ذرات ساییده	اندازه ذرات ساییده، μm	نرخ برداشت ماده، nm/min	زبری سطح، nm	عدم تختی، nm
۳۴	۲۰	۱۰	۳۲	۶۰۹	۱۹۳	۱۵۵۵
۳۵	۲۰	۱۰	۶۳	۷۲۹	۲۵۳	۱۵۵۵
۳۶	۲۰	۱۰	۱۲۲	۶۷۰	۲۶۶	۱۵۵۵
۳۷	۲۰	۱۵	۱۶	۶۱۶	۱۱۲	۱۰۸۸
۳۸	۲۰	۱۵	۳۲	۷۸۲	۱۷۹	۱۲۴۴
۳۹	۲۰	۱۵	۶۳	۹۰۹	۲۴۲	۱۵۵۵
۴۰	۲۰	۱۵	۱۲۲	۸۹۱	۲۵۹	۱۷۱۰
۴۱	۲۰	۲۰	۱۶	۶۳۵	۱۰۶	۱۰۸۸
۴۲	۲۰	۲۰	۳۲	۸۱۷	۱۷۴	۱۰۸۸
۴۳	۲۰	۲۰	۶۳	۹۳۲	۲۳۰	۱۳۹۹
۴۴	۲۰	۲۰	۱۲۲	۹۱۷	۲۴۹	۱۷۱۰
۴۵	۲۰	۲۵	۱۶	۵۹۴	۱۲۷	۱۲۴۴
۴۶	۲۰	۲۵	۳۲	۷۷۸	۱۸۵	۱۳۹۹
۴۷	۲۰	۲۵	۶۳	۸۹۲	۲۴۲	۱۵۵۵
۴۸	۲۰	۲۵	۱۲۲	۸۹۵	۲۶۶	۱۸۶۶
۴۹	۲۵	۱۰	۱۶	۳۱۹	۱۴۱	۱۰۸۸
۵۰	۲۵	۱۰	۳۲	۴۹۳	۱۹۳	۱۲۴۴
۵۱	۲۵	۱۰	۶۳	۵۹۵	۲۴۷	۱۳۹۹
۵۲	۲۵	۱۰	۱۲۲	۴۹۶	۲۵۹	۱۳۹۹
۵۳	۲۵	۱۵	۱۶	۴۷۴	۱۱۱	۹۳۳
۵۴	۲۵	۱۵	۳۲	۶۴۶	۱۷۷	۱۲۴۴
۵۵	۲۵	۱۵	۶۳	۷۶۳	۲۳۹	۱۳۹۹
۵۶	۲۵	۱۵	۱۲۲	۷۵۵	۲۵۲	۱۵۵۵
۵۷	۲۵	۲۰	۱۶	۴۹۴	۱۰۸	۹۳۳
۵۸	۲۵	۲۰	۳۲	۶۹۱	۱۷۱	۱۰۸۸
۵۹	۲۵	۲۰	۶۳	۷۹۶	۲۲۶	۱۲۴۴
۶۰	۲۵	۲۰	۱۲۲	۷۸۰	۲۴۴	۱۳۹۹
۶۱	۲۵	۲۵	۱۶	۴۴۱	۱۳۱	۱۰۸۸
۶۲	۲۵	۲۵	۳۲	۶۵۴	۱۸۹	۱۲۴۴
۶۳	۲۵	۲۵	۶۳	۷۹۲	۲۴۱	۱۵۵۵

ساینده کوچک هستند، با بزرگتر شدن ذرات ساییده، به تدریج نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد ولی با عبور اندازه ذرات ساییده از مقدار معینی (۶۳ میکرومتر)، نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می‌کند.

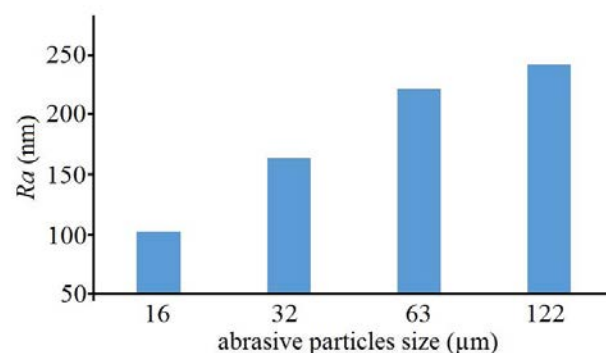
اثر تغییرات اندازه ذرات ساییده بر روی نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه لپن‌کاری شده به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که وقتی ذرات

سطح قطعه کار و در نتیجه افزایش نرخ برداشت ماده می‌گردد. 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 می‌گردد. در نتیجه نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می‌کند. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که با بزرگتر شدن ذرات ساینده، زبری سطح 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 می‌گردد. هرچند به مرور با بزرگتر شدن اندازه ذرات ساینده به علت خرد شدن این ذرات ساینده بزرگ در اثر فشار بالای وارد بر هریک از آنها، آهنگ افزایش زبری سطح کاهش یافته و حتی در مواردی سبب کاهش زبری سطح می‌گردد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود بزرگتر شدن ذرات ساینده سبب کاهش تختی می‌گردد. ذرات ساینده بزرگتر باعث ایجاد خراش‌ها و حفره‌های بزرگتری در سطح قطعات لپ‌کاری شده می‌گردند در نتیجه پستی و بلندی‌های سطح قطعات بزرگتر شده که این امر باعث افزایش خطای تختی قطعات لپ‌کاری شده می‌گردد.

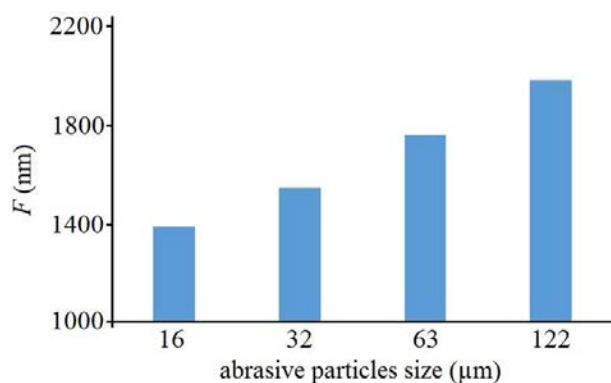
اثر تغییرات درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپ‌کاری بر روی نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه لپ‌کاری شده به ترتیب در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در مقادیر کوچک درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپ‌کاری، با افزایش درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپ‌کاری، به تدریج نرخ برداشت ماده افزایش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپ‌کاری شده کاهش می‌یابد ولی با عبور درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپ‌کاری از مقدار معینی (۲۰٪)، نرخ برداشت ماده شروع به کاهش و مقادیر زبری سطح و خطای تختی قطعات لپ‌کاری شده شروع به افزایش می‌کنند. این پدیده این است که در ابتدا برای انجام فرآیند لپ‌کاری به میزان کافی ذرات ساینده در سیال لپ‌کاری وجود ندارند در نتیجه افزایش درصد وزنی ذرات ساینده سبب افزایش نرخ برداشت ماده و در نتیجه کاهش زبری سطح و عدم تختی قطعات لپ‌کاری شده می‌گردد. اما پس از رسیدن به درصد وزنی مشخصی، برای انجام فرآیند لپ‌کاری به میزان کافی ذرات ساینده در سیال لپ‌کاری وجود دارد و افزایش بیشتر نه تنها سبب بهبود نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی



شکل ۶: اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده
Fig. 6: Effect of abrasive particles size on average values for material removal rate



شکل ۷: اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپ‌کاری شده
Fig. 7: Effect of abrasive particles size on average values for surface roughness of lapped workpieces



شکل ۸: اثر اندازه ذرات ساینده بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپ‌کاری شده
Fig. 8: Effect of abrasive particles size on average values for out of flatness in lapped workpieces

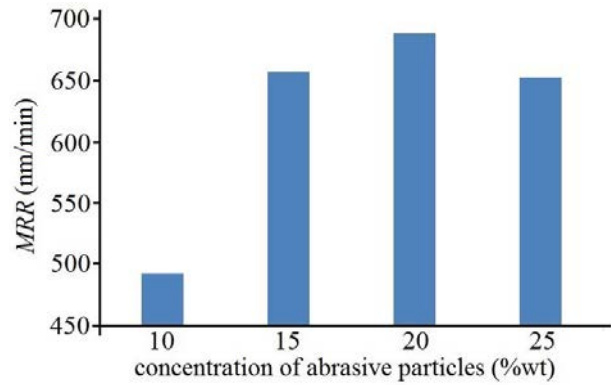
علت این پدیده این است که در ابتدا بزرگتر شدن ذرات ساینده سبب افزایش عمق و پهنای خراش‌های ایجاد شده توسط ذرات ساینده روی

قطعات لپن کاری شده نمی‌گردد بلکه وجود ذرات ساینده بیش از اندازه در سیال لپن کاری به علت 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 می‌گردد.

اثر تغییرات فشار لپن کاری بر روی نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه لپن کاری شده به ترتیب در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که در مقادیر کوچک فشار لپن کاری، با افزایش فشار لپن کاری، به تدریج نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات افزایش می‌یابد ولی با عبور فشار لپن کاری از مقدار معینی (۲۰ کیلوپاسکال)، نرخ برداشت ماده و زبری سطح شروع به کاهش می‌کنند. علت 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 در نتیجه افزایش نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات می‌گردد اما 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 شده و در نتیجه نرخ برداشت ماده و زبری سطح قطعات شروع به کاهش می‌کند. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که افزایش فشار سبب افزایش تختی قطعات می‌گردد. افزایش فشار لپن کاری باعث افزایش فشار به سطح قطعه کار شده و در نتیجه برجستگی‌های روی سطح قطعه کار هموارتر شده و خطای تختی قطعه کار کاهش می‌یابد.

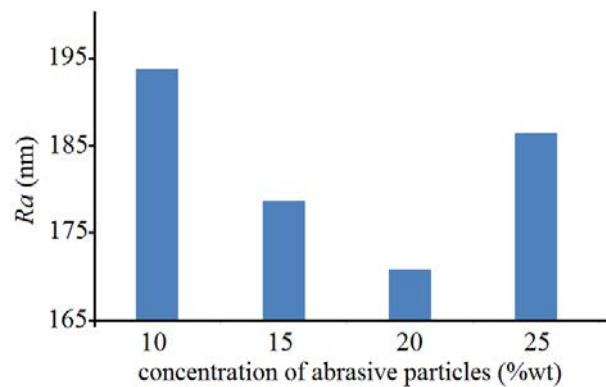
۲-۳- مدل سازی ریاضی فرآیند لپن کاری

قبل از انجام بهینه‌سازی فرآیند لپن کاری باید مدلی برای پیش‌بینی نتایج حاصل از این فرآیند بدست آورد. این مدل باید بتواند مقادیر خروجی‌های آزمایش‌ها (متغیرهای پاسخ) را با استفاده از مقادیر متغیرهای کنترلی پیش‌بینی نماید. در این تحقیق متغیرهای کنترلی عبارتند از فشار لپن کاری، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری و اندازه ذرات ساینده و متغیرهای پاسخ عبارتند از نرخ برداشت ماده، خطای تختی و زبری سطح قطعات لپن کاری شده. در این تحقیق برای مدل‌سازی فرآیند لپن کاری از نرم‌افزار آماری



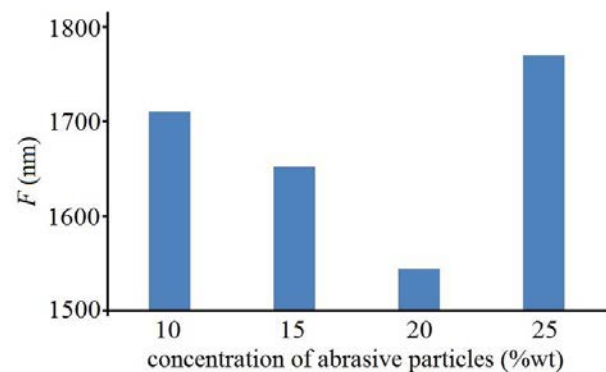
شکل ۹: اثر درصد وزنی ذرات ساینده بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده

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



شکل ۱۰: اثر درصد وزنی ذرات ساینده بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن کاری شده

Fig. 10: Effect of concentration of abrasive particles on average values for surface roughness of lapped workpieces



شکل ۱۱: اثر درصد وزنی ذرات ساینده بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن کاری شده

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

مینی تب^۱ استفاده شده است. با استفاده از این نرم افزار و نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، معادلات (۲) تا (۴) به ترتیب برای پیش‌بینی مقادیر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده بدست آمده است.

$$MRR = -1830.68 + 151.414X_1 + 15.1921X_2 + 86.1742X_3 - 3.71813X_1^2 - 0.064258X_2^2 - 2.00938X_3^2 - 0.23053X_1X_2 - 0.371307X_1X_3 - 0.18776X_2X_3 + 0.0116053X_1X_2X_3 \quad (2)$$

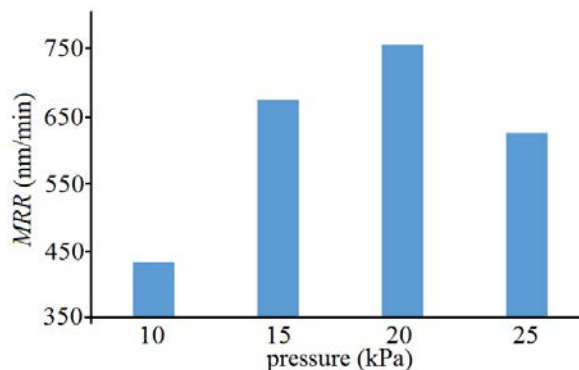
$$Ra = -41.0787 + 17.9912X_1 + 4.51596X_2 - 11.3308X_3 - 0.38875X_1^2 - 0.0213319X_2^2 + 0.31125X_3^2 - 0.0195529X_1X_2 - 0.0176977X_1X_3 - 0.00865976X_2X_3 + 0.000643737X_1X_2X_3 \quad (3)$$

$$F = 4091.39 - 169.765X_1 + 9.51749X_2 - 114.383X_3 + 3.20688X_1^2 - 0.0390041X_2^2 + 2.81937X_3^2 - 0.137749X_1X_2 + 0.247032X_1X_3 + 0.232042X_2X_3 - 0.000761056X_1X_2X_3 \quad (4)$$

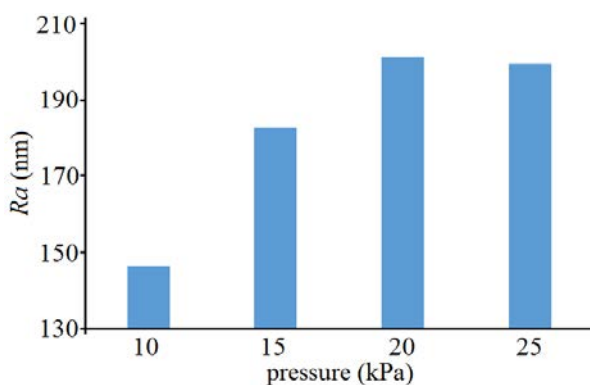
میانگین اختلاف بین نتایج آزمایش‌های مشخص شده در جدول ۳ با نتایج بدست آمده از معادلات (۲) الی (۴) به ترتیب برابر با ۳/۴٪، ۳/۱٪ و ۳/۹٪ و بیشترین اختلاف بین نتایج آزمایش‌های مشخص شده در جدول ۳ با نتایج بدست آمده از معادلات (۲) الی (۴) به ترتیب برابر با ۱۶/۵٪، ۹/۴٪ و ۱۳/۳٪ است. در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ به ترتیب پراکندگی مقادیر مانده حاصل از مدل رگرسیون نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن کاری شده در برابر مقادیر متناظر بدست آمده از آزمایش‌های مشخص شده در جدول ۳ نشان داده شده است. از این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر بدست آمده از آزمایش‌ها هم‌پوشانی و تطابق مناسبی با مقادیر پیش‌بینی شده بوسیله معادلات (۲) تا (۴) دارند.

۳-۳- بهینه‌سازی

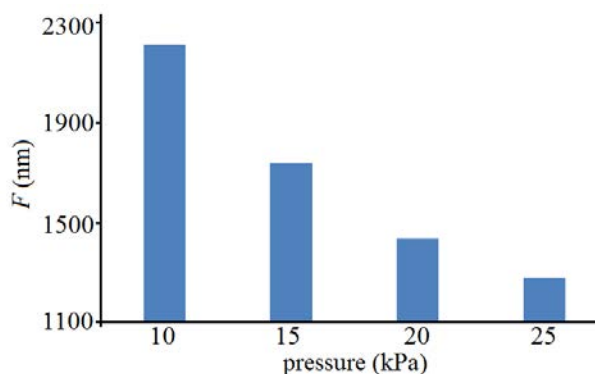
در این تحقیق برای بهینه‌سازی فرآیند لپن کاری به روش الگوریتم ژنتیک از نرم‌افزار متلب^۲ استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو و بهینه‌سازی است که مبنای آن علم وراثت و انتخاب طبیعی است. این الگوریتم، جمعیت مورد نظر را با یک سری قواعد انتخابی خاص تکامل داده و موجب بهینه‌سازی آن می‌گردد



شکل ۱۲: اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر نرخ برداشت ماده
Fig. 12: Effect of lapping pressure on average values for material removal rate



شکل ۱۳: اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر زبری سطح قطعات لپن کاری شده
Fig. 13: Effect of lapping pressure on average values for surface roughness of lapped workpieces

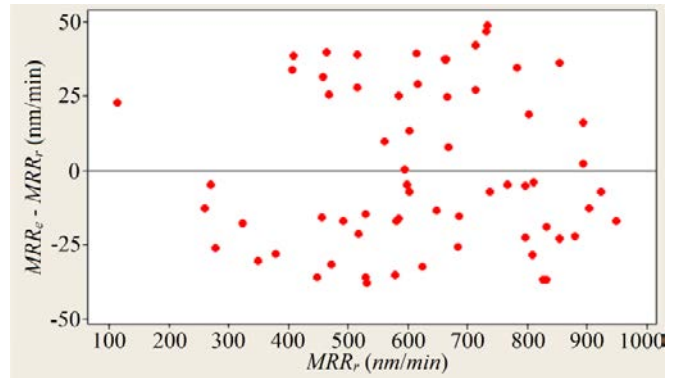


شکل ۱۴: اثر فشار لپن کاری بر میانگین مقادیر خطای تختی قطعات لپن کاری شده
Fig. 14: Effect of lapping pressure on average values for out of flatness in lapped workpieces

1 Minitab
2 MATLAB

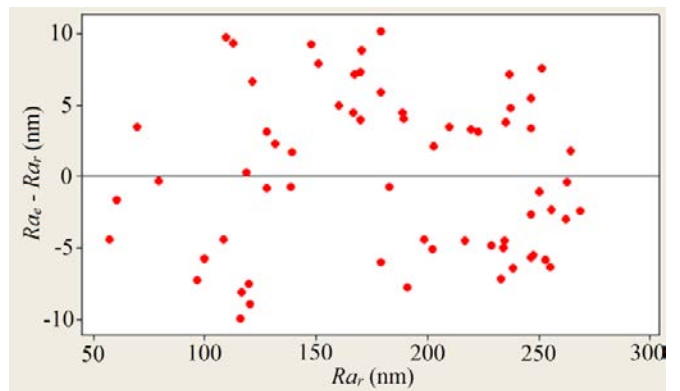
درصد وزنی ۱۸/۵٪ و اندازه ذرات ساینده ۱۶ میکرومتر بدست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط، زبری سطح برابر با ۵۰ نانومتر بدست آمده که از کمترین زبری سطح بدست آمده از آزمایش‌های نشان داده شده در جدول ۳ (۵۳ نانومتر) کمتر است. با استفاده از این نرم‌افزار حالت بهینه برای رسیدن به کمترین خطای تختی که برابر با ۹۶۵ نانومتر است در فشار ۲۵ کیلوپاسکال، درصد وزنی ۱۸/۵٪ و اندازه ذرات ساینده ۱۶ میکرومتر بدست آمده است. با انجام آزمایش در این شرایط، خطای تختی ۹۳۳ نانومتر بدست آمده که برابر با کمترین خطای تختی بدست آمده از آزمایش‌های نشان داده شده در جدول ۳ است. با استفاده از این نرم‌افزار حالت بهینه برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت ماده که برابر با ۹۹۵ نانومتر بر دقیقه است در فشار ۱۹/۴ کیلوپاسکال، درصد وزنی ۲۰/۵٪ و اندازه ذرات ساینده ۸۹/۴ میکرومتر بدست آمده است. با انجام آزمایش در فشار ۱۹/۴ کیلوپاسکال، درصد وزنی ۲۰/۵٪ و اندازه ذرات ساینده ۸۶ میکرومتر، نرخ برداشت ماده ۹۷۳ نانومتر بر دقیقه بدست آمده است که از بیشترین نرخ برداشت ماده بدست آمده از آزمایش‌های نشان داده شده در جدول ۳ (۹۳۲ نانومتر بر دقیقه) بیشتر است. همخوانی مناسب و نزدیک بودن نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های رگرسیون و نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده این است که مدل‌های رگرسیون ایجاد شده توانسته‌اند مقادیر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و خطای تختی قطعات لپن‌کاری شده را به خوبی پیش‌بینی کنند. مقایسه نتایج آزمایش‌های انجام شده در شرایط بهینه پیش‌بینی شده توسط الگوریتم ژنتیک با نتایج ۶۴ آزمایش نشان داده شده در جدول ۳ نشان‌دهنده عملکرد مطلوب و قابل اعتماد بودن الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی شرایط بهینه در این فرآیند لپن‌کاری است.

بزرگترین مشکل فرآیندهای لپن‌کاری، مخصوصاً وقتی تعداد قطعاتی که قرار است لپن‌کاری شوند زیاد باشد، پایین بودن نرخ برداشت ماده در این فرآیندها است که این امر سبب افزایش قابل‌ملاحظه هزینه و زمان تولید می‌گردد. بنابراین در فرآیند لپن‌کاری تخت 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 بهینه‌سازی تک هدفه فرآیند لپن‌کاری، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب، به بهینه‌سازی همزمان نرخ



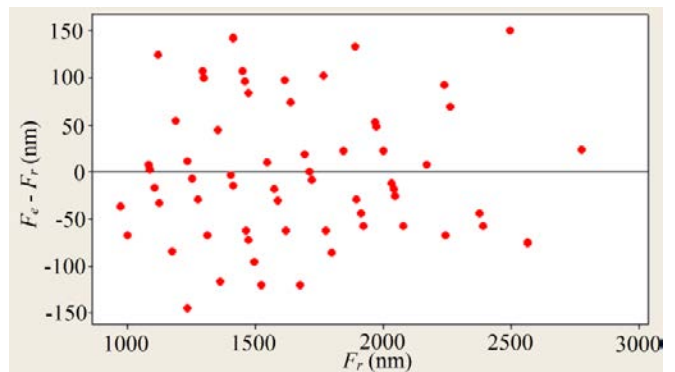
شکل ۱۵: اختلاف نتایج آزمایشگاهی و مدل رگرسیون نرخ برداشت ماده

Fig. 15: Difference between material removal rate obtained from experiments and predicted by regression model



شکل ۱۶: اختلاف نتایج آزمایشگاهی و مدل رگرسیون زبری سطح

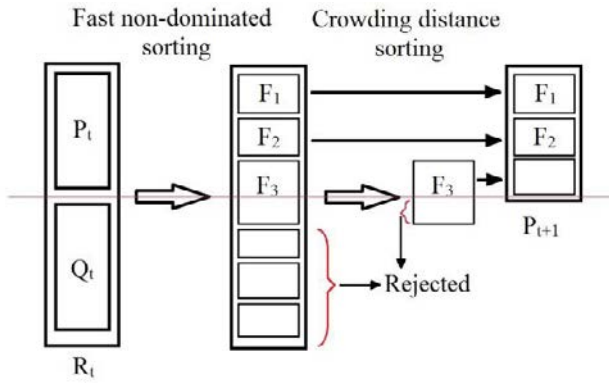
Fig. 16: Difference between surface roughness obtained from experiments and predicted by regression model



شکل ۱۷: اختلاف نتایج آزمایشگاهی و مدل رگرسیون خطای تختی

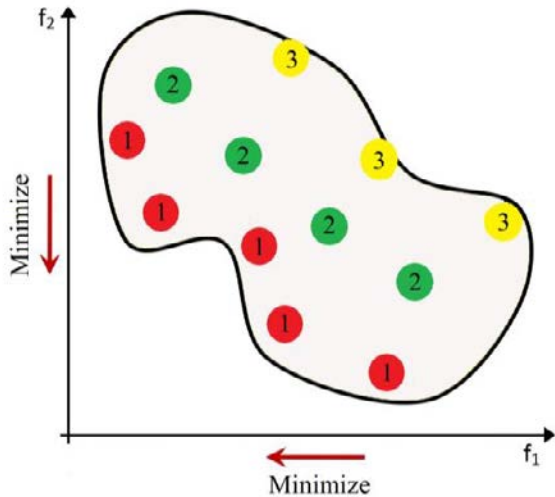
Fig. 17: Difference between out of flatness obtained from experiments and predicted by regression model

[۱۸]. با استفاده از این نرم‌افزار حالت بهینه برای رسیدن به کمترین زبری سطح که برابر با ۵۶ نانومتر است، در فشار ۱۰ کیلوپاسکال،



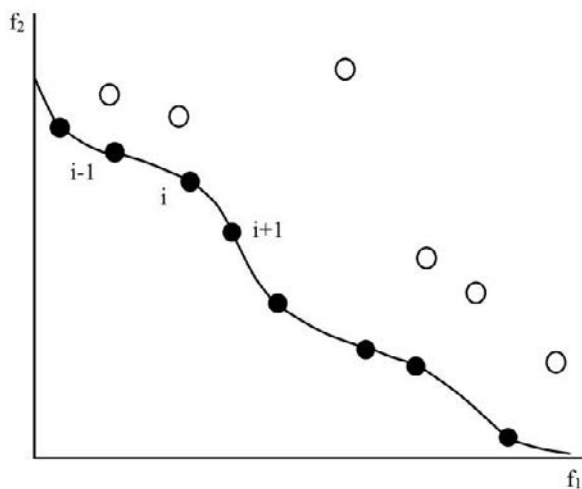
شکل ۱۸: ساختار مدل الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب

Fig. 18: The function of non-dominated sorting genetic algorithm II



شکل ۱۹: نحوه دسته‌بندی نامغلوب در یک مسئله دو هدفه کمینه‌سازی

Fig. 19: Non-dominated sorting in two-objective optimization



شکل ۲۰: فاصله ازدحام در یک مسئله دو هدفه کمینه‌سازی

Fig. 20: Crowding distance in two-objective optimization

برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات پرداخته شده و بهینه پارتو و جبهه پارتو مربوطه، بدست آورده شده است.

جواب بهینه در بهینه‌سازی چندهدفه برخلاف بهینه‌سازی تک‌هدفه، تنها یک جواب نیست؛ بلکه دسته‌ای از جواب‌ها می‌باشد که در اصطلاح به آن‌ها جواب‌های نامغلوب یا پارتو گفته می‌شود. یک جواب نامغلوب، نقطه‌ای است که نمی‌توان نسبت به آن نقطه، نقطه‌ای دیگر پیدا نمود که حداقل در یکی از توابع هدف بهبود ایجاد کند درحالی‌که در مابقی توابع هدف حداقل به خوبی آن نقطه باشد. به عبارت دیگر بهبود در یک تابع هدف سبب بدتر شدن حداقل یک تابع هدف دیگر می‌شود. در واقع تمام اعضای جبهه پارتو، جواب‌های بهینه‌ای هستند که هیچ‌یک از آن‌ها به صورت مطلق از دیگری بهتر نیست و هر کدام حداقل در یک تابع هدف از سایرین بهتر می‌باشد.

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب توسط دب^۱ و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۲ مطرح شده است. این الگوریتم که تکامل یافته الگوریتم ژنتیک ساده است، یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، مراحل اجرای این الگوریتم بهینه‌سازی به صورت زیر است [۲۰ و ۲۱]:

۱- تولید جمعیت اولیه (P_t) به صورت تصادفی و به تعداد N

۲- ارزیابی جمعیت تولیدشده با استفاده از توابع هدف مسأله

۳- مرتب نمودن جمعیت تولیدشده بر اساس روش مرتب‌سازی نامغلوب و پارامتر فاصله ازدحام^۲؛ در این مرحله اعضای جمعیت در داخل دسته‌هایی قرار می‌گیرند به گونه‌ای که اعضای موجود در دسته اول، یک مجموعه کاملاً نامغلوب توسط دیگر اعضای جمعیت فعلی می‌باشند. اعضای موجود در دسته دوم نیز بر همین مبنای، تنها توسط اعضای دسته اول مغلوب شده و این روند به همین صورت در دسته‌های دیگر ادامه یافته تا به تمام اعضای موجود، یک رتبه بر مبنای شماره دسته اختصاص داده شود (دسته‌های F_1 ، F_2 و غیره در شکل ۱۸ و دسته‌های ۱، ۲ و ۳ در شکل ۱۹).

سپس اعضای موجود در هر دسته بر اساس معیار فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. بر اساس این معیار، اعضای از یک دسته که در فاصله بیشتر از سایر اعضای آن دسته قرار دارند، مطلوب‌تر بوده و در رتبه بالاتری قرار می‌گیرند. این امر علاوه بر اینکه احتمال جستجوی

۱ Deb
۲ Crowding distance

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب ابزاری مفید و قدرتمند برای بهینه‌سازی همزمان نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعه 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 علاوه بر ایجاد قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در فرآیند لپن‌کاری تخت یک‌طرفه فولاد 440c، تأثیر پارامترهای اندازه ذرات ساینده، فشار لپن‌کاری و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری، بر نرخ برداشت ماده، زبری سطح و تختی قطعات لپن‌کاری شده با استفاده از روش آزمایشگاهی بررسی شده است. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب به بهینه‌سازی این فرآیند لپن‌کاری پرداخته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت:

- ۱- بزرگتر شدن ذرات ساینده سبب افزایش زبری سطح و کاهش تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌گردد. وقتی ذرات ساینده کوچک باشند، با بزرگتر شدن ذرات ساینده، به تدریج نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد؛ ولی با عبور اندازه ذرات ساینده از مقدار معینی (۶۳ میکرومتر)، نرخ برداشت ماده شروع به کاهش می‌کند.
- ۲- افزایش فشار لپن‌کاری سبب افزایش تختی قطعات لپن‌کاری شده می‌گردد. وقتی فشار لپن‌کاری کم باشد، 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 (۲۰ کیلوپاسکال)، مقادیر نرخ برداشت ماده و زبری سطح شروع به کاهش می‌کنند.
- ۳- در مقادیر کوچک درصد وزنی ذرات ساینده، با افزایش درصد وزنی ذرات ساینده، به تدریج نرخ برداشت ماده و تختی قطعات لپن‌کاری شده افزایش و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده کاهش می‌یابند ولی با عبور درصد وزنی ذرات ساینده از مقدار معینی (۲۰٪)، نرخ برداشت ماده و تختی قطعات لپن‌کاری شروع به کاهش و زبری سطح قطعات لپن‌کاری شده شروع به افزایش می‌کنند.

فضای بیشتری را سبب می‌شود، موجب توزیع یکنواخت جمعیت در جبهه پارتو شده و از تراکم آن‌ها در یک مکان جلوگیری می‌نماید. برای محاسبه معیار فاصله ازدحام هر عضو از اعضای دسته F_i ، اعضای جمعیت این دسته بر حسب هر یک از توابع هدف مرتب می‌شوند (شکل ۲۰). برای اعضای ابتدایی و انتهایی مجموعه مرتب شده، مقدار فاصله ازدحامی، بی‌نهایت است. مقدار فاصله ازدحامی سایر اعضا از رابطه (۵) بدست آورده می‌شود.

$$CD(k) = \sum_{i=1}^m \frac{f_i(k-1) - f_i(k+1)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (5)$$

- ۴- تولید نسل فرزندان (Q_t) به تعداد N عضو با استفاده از عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش.
- ۵- تولید مجموعه (R_t) با تعداد اعضای $2N$ از اجتماع مجموعه‌های والدین (P_t) و فرزندان (Q_t)
- ۶- مرتب نمودن مجموعه R_t بر اساس روش دسته‌بندی نامغلوب و معیار ازدحام جمعیت.
- ۷- انتخاب N عضو از مجموعه R_t و ایجاد نسل والد جدید (P_{t+1}) برای تکرار بعد.
- ۸- اعمال عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش بر روی نسل والد جدید (P_{t+1}) و تولید نسل فرزندان (Q_{t+1}) با تعداد N عضو.
- ۹- تکرار مراحل ۵ تا ۹ تا برآورده شدن شرایط توقف الگوریتم. در این تحقیق از نرم‌افزار متلب برای بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شده است. بهینه پارتو بدست آمده از نرم‌افزار متلب در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که در جدول ۴ قابل مشاهده است برای رسیدن به بیشترین نرخ برداشت ماده، بسته به اینکه مقدار مجاز زبری سطح و تختی قطعه لپن‌کاری شده چقدر است، فشار لپن‌کاری، اندازه ذرات ساینده و درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن‌کاری به ترتیب می‌توانند بین ۱۰ تا ۲۵ کیلوپاسکال، ۱۶ تا ۸۹/۶۵ میکرومتر و ۱۷/۰۴ تا ۲۰/۴۹ نانومتر انتخاب شوند. به عنوان مثال اگر زبری سطح و خطای تختی مجاز برای یک قطعه به ترتیب ۱۰۰ نانومتر و ۱/۵ میکرومتر باشند، اپراتور دستگاه از بین نقاط پارتو ارائه شده در جدول شماره ۴ شرایط بهینه شماره ۲۸ را انتخاب می‌کند که با توجه به تختی و زبری سطح مورد نیاز برای قطعه تولیدی دارای بیشترین نرخ برداشت ماده می‌باشد.

جدول ۴: بهینه پارتو

Table 4: Pareto optimal solutions

شماره	فشار لپن کاری، kPa	اندازه ذرات ساینده، μm	درصد وزنی ذرات ساینده	نرخ برداشت ماده، nm/min	زبری سطح، nm	عدم تختی، nm
۱	۱۹/۴۲	۸۹/۴	۲۰/۴۹	۹۹۵	۲۵۹	۱۶۴۰
۲	۲۵	۱۶	۱۸/۵۴	۵۳۱	۱۱۶	۹۶۵
۳	۱۰	۱۶	۱۸/۵۴	۳۱۸	۵۶	۱۷۹۵
۴	۱۱/۹۹	۱۶	۱۸/۶۱	۴۴۳	۷۵	۱۶۰۲
۵	۱۱/۲۵	۱۶/۴۴	۱۸/۵۱	۴۰۴	۷۰	۱۶۷۶
۶	۲۲/۰۳	۲۲/۶۸	۱۹/۳۹	۶۸۴	۱۴۰	۱۰۷۷
۷	۱۳/۹۶	۱۶/۱۶	۱۸/۸	۵۴۰	۹۰	۱۴۳۷
۸	۱۸/۰۱	۳۹/۸۷	۱۸/۹۲	۸۲۹	۱۸۲	۱۳۸۷
۹	۱۸/۸۱	۳۶/۶۸	۱۸/۶۶	۸۱۳	۱۷۶	۱۳۱۷
۱۰	۱۰/۴۱	۱۷/۱۶	۱۸/۷۶	۳۵۸	۶۵	۱۷۶۶
۱۱	۲۳/۳۸	۲۱/۶۵	۱۸/۶۷	۶۳۹	۱۳۷	۱۰۳۵
۱۲	۱۷/۹۳	۲۸/۲۳	۱۸/۶۹	۷۴۵	۱۵۰	۱۲۹۱
۱۳	۱۷/۶۳	۶۴/۹۳	۱۹/۴۳	۹۴۵	۲۳۱	۱۵۹۳
۱۴	۱۰/۲۲	۱۶/۳	۱۸/۶۶	۳۳۷	۶۰	۱۷۷۵
۱۵	۱۲/۴	۱۶/۷۸	۱۸/۷۱	۴۷۳	۸۱	۱۵۷۳
۱۶	۱۳/۱۷	۱۶/۱۴	۱۸/۵۹	۵۰۴	۸۴	۱۵۰۱
۱۷	۱۱/۸۱	۱۶/۲۳	۱۷/۰۴	۴۲۱	۷۵	۱۶۳۳
۱۸	۱۳/۶۷	۱۷/۷۹	۱۸/۶۵	۵۴۲	۹۳	۱۴۷۷
۱۹	۱۶/۵۱	۱۶/۸۱	۱۹/۶۳	۶۲۷	۱۰۷	۱۲۶۷
۲۰	۱۷	۲۷/۴۸	۲۰/۱۱	۷۲۹	۱۴۴	۱۳۴۶
۲۱	۱۷/۴۰	۳۸/۹۲	۱۹/۵۸	۸۱۷	۱۷۸	۱۴۱۸
۲۲	۱۷/۷۶	۵۹/۴۴	۱۹/۴۳	۹۲۷	۲۲۳	۱۵۵۰
۲۳	۲۳/۸۵	۱۷/۸۱	۱۸/۵۴	۵۹۰	۱۲۴	۹۹۴
۲۴	۱۶/۵۷	۵۰/۹۲	۱۹/۸۵	۸۷۱	۲۰۲	۱۵۶۹
۲۵	۱۷/۰۵	۶۹/۹۴	۲۰/۲	۹۵۱	۲۳۶	۱۶۷۴
۲۶	۱۰/۵۰	۱۶/۰۶	۱۸/۵۲	۳۵۳	۶۲	۱۷۴۵
۲۷	۱۸/۲۴	۳۰/۷۷	۱۸/۷	۷۶۷	۱۵۸	۱۲۹۷
۲۸	۱۴/۸	۱۶/۰۹	۱۸/۶۷	۵۷۰	۹۵	۱۳۷۳
۲۹	۱۱/۴۳	۱۶/۱۶	۱۸/۵۱	۴۱۲	۷۰	۱۶۵۶
۳۰	۱۸/۰۳	۳۲/۸۳	۱۹/۹۵	۷۸۴	۱۶۴	۱۳۳۴
۳۱	۱۳/۱۷	۱۶/۳۹	۱۸/۸۴	۵۰۸	۸۵	۱۵۰۳
۳۲	۱۷/۳۵	۱۶/۱۷	۱۸/۴۵	۶۳۲	۱۰۸	۱۲۱۰
۳۳	۱۷/۷۵	۴۵/۱۷	۲۰	۸۶۰	۱۹۵	۱۴۵۴
۳۴	۱۹/۶۸	۸۹/۶۵	۲۰/۴۹	۹۹۵	۲۶۰	۱۶۲۸

ΔM	اختلاف جرم قطعات قبل و بعد از فرآیند لپن کاری، mg
Δt	زمان لپن کاری، min
ρ	چگالی، g/cm^3
زیرنویس	
e	آزمایش
i	شماره تابع هدف
r	رگرسیون

مراجع

- [1] N. Zhu, F. Zheng, Y. Zhu, S. Xu, D. Zuo, Research of abrasive embedment-free lapping on soft-brittle lithium niobate wafer, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87 (2016) 1951-1956.
- [2] Y. Ahn, S. S. Park, Surface roughness and material removal rate of lapping process on ceramics, *KSME International Journal*, 11(5) (1997) 494-504.
- [3] A. Gullu, H. Calimli, The investigation of the effects of machining parameters on surface roughness in lapping, *Gazi University Journal of Science*, 18(2) (2005) 229-237.
- [4] J. C. Lambropoulos, S. D. Jacobs, B. E. Gillman, H. J. Stevens, Deterministic microgrinding, lapping, and polishing of glass-ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 88(5) (2005) 1127-1132.
- [5] J. Yuan, B. Lv, Z. Zhou, B. Tao, Parameters optimization on the lapping process for advanced ceramics by applying Taguchi method, *Materials Science Forum*, 532 (2006) 488-491.
- [6] G. Ascanio, C. Cava, R. Chicurel, R. Reséndiz, Improved single-face lapping by using an air bearing supported lap. *Journal of Applied Research and Technology*, 5(3) (2007) 187-195.
- [7] L. S. Deshpande, S. Raman, O. Sunanta, C. Agbaraji, Observations in the flat lapping of stainless steel and bronze, *Wear*, 265(1) (2008) 105-116.
- [8] T. Iyama, I. Tanabe, A. L. Moe, K. Yoshi F. Nasu, Development of intelligent lapping system estimation of finished surface roughness and its improvement

۴- بیشترین نرخ برداشت ماده در فشار ۱۹/۴ کیلوپاسکال، درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری ۲۰/۵٪ و اندازه ذرات ساینده ۸۹/۴ میکرومتر، کمترین زبری سطح در فشار ۱۰ کیلوپاسکال، درصد وزنی ۱۸/۵٪ و اندازه ذرات ساینده ۱۶ میکرومتر و بیشترین تختی قطعات لپن کاری شده در فشار ۲۵ کیلوپاسکال، درصد وزنی ۱۸/۵٪ و اندازه ذرات ساینده ۱۶ میکرومتر بدست می‌آید.

۵- با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب 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 علاوه بر تولید قطعاتی با کیفیت مطلوب، هزینه و زمان تولید نیز کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از زحمات جناب آقای مهندس ظهیر کریمی و 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 آنها اعلام دارند.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

$CD(k)$	فاصله ازدحامی عضو k ام
d	قطر قطعه، cm
F	خطای تختی، nm
f	تابع هدف
f^{\max}	بیشترین مقدار تابع هدف
f^{\min}	کمترین مقدار تابع هدف
m	تعداد توابع هدف
MRR	نرخ برداشت ماده، nm/min
Ra	میانگین زبری سطح، nm
X_1	فشار لپن کاری، kPa
X_2	متوسط قطر ذرات ساینده، μm
X_3	درصد وزنی ذرات ساینده در دوغاب لپن کاری

علائم یونانی

Δh	اختلاف ارتفاع قطعات قبل و بعد از فرآیند لپن کاری، nm
------------	--

- [15] S. Ozturk, E. Kayabasi, E. Celik, H. Kurt, Determination of lapping parameters for silicon wafer using an artificial neural network, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(1) (2018) 260-270.
- [16] S. Ozturk, L. Aydin, N. Kucukdogan, E. Celik, Optimization of lapping processes of silicon wafer for photovoltaic applications, *Solar Energy*, 164 (2018) 1-11.
- [17] I. D. Marinescu, E. Uhlmann, T. K. Doi, *Handbook of lapping and polishing*, Taylor & Francis, London, 2007.
- [18] R. L. Haupt, S. E. Haupt, *Practical genetic algorithms*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
- [19] K. Deb, A. Pratap, S. A. Agarwal, fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans Evol Comput*, 6 (2002) 182-197.
- [20] S. E. Mirmohammadsadeghi, H. Amirabadi, High-pressure jet-assisted turning of AISI 304: Experimental and multi-objective optimization approach, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, (2017) 0954408917738488.
- [21] N. Alikar, S. M. Mousavi, R. A. R. Ghazilla, M. Tavana, E. U. Olugu, Application of the NSGA-II algorithm to a multi-period inventory-redundancy allocation problem in a series-parallel system, *Reliability Engineering & System Safety*, 160 (2017) 1-10.
- speed, *Journal of Machine Engineering*, 10(1) (2010) 5-12.
- [9] Y. Zhang, I. D. Marinescu, R. VandenBoom, Optimisation of D2 steel lapping with a polymer plate, *International Journal of Abrasive Technology*, 3(3) (2010) 203-214.
- [10] C. Chung, C. S. Korach, I. Kao, Experimental study and modeling of lapping using abrasive grits with mixed sizes, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133(3) (2011) 031006.
- [11] S. Jianxiu, L. Xinglong, Z. Zhuqing, L. Zhixiang, Influence of lapping parameters on 6H-SiC Crystal Substrate (0001) C surface based on diamond particle, *Advanced Materials Research*, 565 (2012) 237-242.
- [12] 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*, 4 (2013) 479-487.
- [13] P. R. Parate, R. B. Yarasu, Optimization of parameters of lapping operation by Taguchi approach for surface roughness of SS 321, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 4(4) (2013) 15-21.
- [14] M. Farahnakian, H. Shahrajabian, Experimental study on surface roughness and flatness in lapping of AISI 52100 steel, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 9(2) (2016) 61-68.

