

بررسی فرآیند ماشین کاری هیبریدی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار و بهینه سازی چندهدفه پارامترهای فرآیند

سیداحسان میرمحمدصادقی
دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

حسین امیرآبادی*
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

ماشین کاری رایج سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به دلیل ویژگی‌هایی چون سختی بالا و رسانایی گرمایی پایین این آلیاژ منجر به کیفیت سطح پایین و نیروهای برشی زیاد می‌گردد. در این پژوهش فرآیند ماشین کاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار به منظور بهبود شرایط ماشین کاری این سوپرآلیاژ به کار گرفته شد. برای دستیابی به شرایط مناسب فرآیند، کاربرد فشار جت سیال در محدوده بهینه متناسب با دیگر پارامترهای فرآیند ضروری می‌باشد. آزمایش‌ها در پنج فشار ۱، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ بار، سه سرعت برشی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متربر دقیقه، دو نرخ پیشروی ۰/۰۵ و ۰/۱۴ میلی متربر دور و عمق برش ۱ میلی متر با طراحی کامل صورت گرفت تا بررسی پارامترهای فرآیند امکان پذیر باشد. با انجام آزمایش‌ها نیروهای ماشین کاری و زبری سطح اندازه گیری شد. به منظور بهینه سازی چندهدفه از الگوریتم NSGA-II برای مدل‌های شبکه عصبی آموزش داده شده به کمک الگوریتم ژنتیک استفاده گردید و محدوده‌های بهینه فشار جت سیال متناسب با دیگر پارامترهای فرآیند بدست آمد. نتایج بهینه سازی چندهدفه نشان می‌دهد که برای نرخ پیشروی ۰/۰۵ میلی متربر دور در محدوده سرعت برشی ۵۵ تا ۱۰۰ متربر دقیقه، محدوده بهینه فشار جت سیال ۸۵ تا ۱۰۹ بار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ماشین کاری هیبریدی، سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸، جت سیال پرفشار، بهینه سازی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک، NSGA-II.

Investigation on Hybrid Jet Assisted Machining of Inconel 718 Superalloy and Multi Objective Optimization of Process Parameters

S. E. Mirmohammadsadeghi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

H. Amirabadi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

Conventional machining of Inconel 718 superalloy due to specifications such as high hardness and low thermal conductivity, results in low surface quality and high cutting forces. In this research hybrid high pressure jet assisted machining process was employed to improve machining conditions of this superalloy. To obtain suitable conditions of process applying optimal range of jet pressure proportional to other process parameters is essential. Experiments were conducted in five jet pressures, 1, 50, 100, 150, 200 bar, three cutting speeds, 50, 75 and 100 m/min, two feed rates, 0.05 and 0.14 mm/rev, and 1 mm of depth of cut with full factorial designed to reach possibility of process parameters investigation. By executing the experiments, cutting forces and surface roughness were measured. In order to multi-objective optimization, NSGA-II was employed to artificial neural network models which were trained by genetic algorithm, and optimized jet pressure ranges proportional to other process parameters were obtained. The multi objective optimization results demonstrate that for feed rate of 0.05 mm/rev and cutting speed range of 50-100 m/min, optimal range of jet pressure is 80-109 bar.

Keywords: Hybrid Machining, Inconel 718 Superalloy, High pressure Jet, Multi Objective Optimization, Genetic Algorithm, NSGA-II.

۱- مقدمه

مواد به طور ویژه برای ساخت پره‌های موتور توربینی استفاده می‌شوند که در فشار و دماهای بالاتر عمل می‌کنند. آلیاژهای پایه نیکل، سوپر آلیاژهایی با کاربرد گسترده هستند که حدود ۵۰ درصد وزن مواد به کار رفته در موتورهای هواپیما را دربرمی‌گیرند و به طور عمده در بدنه موتورهای توربینی استفاده می‌گردند. این مواد استحکام به وزن بالاتری در مقایسه با فولاد با چگالی بالا فراهم می‌نمایند. مواد به کار رفته در موتورهای توربینی بایستی خصوصیات استحکام در دمای بالا، مقاومت به خوردگی شیمیایی و نسبت استحکام به وزن بالا را به منظور مصرف سوخت کمتر برای عملیات پروازهای اقتصادی تر و طول عمر بیشتر،

سوپر آلیاژهای پایه نیکل در صنایع هوایی، نفت، گاز و تجهیزات دریایی، راکتورهای هسته ای، تاسیسات پتروشیمی کاربرد دارند. کاربرد آلیاژهای پایه نیکل در چنین محیط‌هایی به ویژگی‌های منحصر بفرد این آلیاژها مانند مقاومت بالا به خوردگی شیمیایی، خستگی مکانیکی، حرارتی، شوک حرارتی، خزش، خوردگی مکانیکی در دماهای بالا مربوط می‌گردد. این ویژگی‌ها برای کارایی و عملکرد بهتر در شرایطی که آلیاژ به کار می‌رود، مورد نیاز است. در موتورهای صنایع هوایی، این

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hamirabadi@birjand.ac.ir

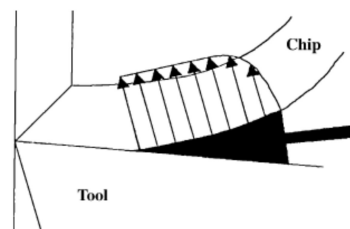
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۰۹

فراهم نمایند.

آلیاژهای پایه نیکل شامل ترکیبات بین فلزی $Ni3(Al, Ta)$ در زمینه محلول جامد نیکل با کروم (Cr)، تنگستن (W) و رینیوم (Re) به عنوان عناصر تقویت کننده محلول می باشند. تانتالیوم (Ta) در ترکیب بین فلزی استحکام در دمای بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون آنها را افزایش می دهد. این عنصر می تواند با تیتانیوم (Ti) جایگزین شده تا دما و مقاومت در برابر اکسیداسیون آلیاژ را کاهش دهد. پره های موتور توربینی از جنس پایه نیکل می تواند تا دمای کاری بالای ۵۲۰ درجه سلسیوس را تحمل کند. آلیاژهای تجاری پایه نیکل شامل اینکونل^۱، نيمونیک^۲، رنه^۳، اودیمت^۴ و پیرومت^۵ می باشند. سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرکاربردترین آلیاژ به کار رفته در بین آلیاژهای پایه نیکل می باشد، این آلیاژ به ترتیب ۲۵ و ۴۵ درصد از حجم تولید سالانه ریخته گری و شکل دهی به کمک آهنگری از آلیاژهای پایه نیکل را شامل می شود. گرماسختی، استحکام بالا، چقرمگی بالا، پخشندگی گرمایی پایین، جوش خوردن ماده قطعه کار به لبه برنده، ایجاد لبه انباشته و واکنش شیمیایی با مواد ابزار در شرایط دمای بالا، ویژگی های مهم سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ می باشند که سبب قابلیت ماشینکاری بسیار پایین این آلیاژ نیز می گردد [۱].

قابلیت ماشینکاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بسیار پایین می باشد و به منظور ماشینکاری این سوپر آلیاژ روش های ویژه ماشینکاری هیبریدی کمکی مطرح گردیده است. روش هایی چون ماشینکاری به کمک جت سیال پرفشار، ماشینکاری به کمک لیزر، ماشینکاری با خنک کاری برودتی و ماشینکاری به کمک ارتعاش از این دسته فرایندها محسوب می شوند، اعمال جت سیال روان کار و خنک کار پرفشار یک روش بسیار موثر برای بهبود ماشینکاری مواد سخت، مانند آلیاژهای پیشرفته نیکل و تیتانیوم، سرامیک ها، مواد کامپوزیتی و فولادهای آلیاژی می باشد [۲]. اساس کار این روش بر مبنای اعمال سیال خنک کار و روان کار با فشار بالاست. در ماشینکاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار می توان بین سطح تماس براده و ابزار یک فشار هیدرولیکی مناسب ایجاد نمود [۳]. شکل ۱ مکانیزم ایجاد گوه فشار هیدرولیکی با اعمال جت سیال پرفشار را نشان می دهد.



شکل ۱- مکانیزم ایجاد گوه فشار هیدرولیکی با اعمال جت سیال پرفشار [۳]

مطابق شکل ۱ گوه فشار هیدرولیکی در سطح تماس ابزار-براده با اعمال جت سیال پرفشار ایجاد می گردد. کاهش سطح تماس ابزار-براده، کاهش دما در ناحیه برش، کاهش میزان انتقال گرما به ابزار، شکل گیری و شکست بهتر براده افزایش راندمان روان کاری فیلم سیال به دلیل کاهش میزان به نقطه جوش رسیدن این فیلم روان کار از مزایای ایجاد این گوه فشار هیدرولیکی است [۳].

سیلر و همکاران [۴] سایش ابزار را در ماشینکاری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V به دو روش خنک کاری رایج و خنک کاری به کمک جت سیال پرفشار مورد بررسی قرار داده اند. براساس نتایج آنها کمترین سایش ابزار مربوط به فشار سیال ۲۰/۳ مگاپاسکال می باشد.

داسیلوا و همکاران [۵] مکانیزم سایش در ماشینکاری آلیاژ Ti6Al4V به کمک جت سیال پرفشار را مورد بررسی قرار داده اند. نتایج آنها افزایش عمر ابزار با استفاده از جت سیال کمکی را را نشان می دهد. همچنین نتایج آزمایشات آنها در سرعت های برشی گوناگون حکایت از وجود شرایط بهینه فشار جت سیال با در نظر گرفتن عمر ابزار دارد. آنها به افزایش سایش در سطح آزاد ابزار با افزایش سرعت برشی در شرایط گوناگون فشار جت سیال اشاره نموده اند که ناشی از تمرکز دمای بیشتر در سطح ابزار به دلیل کاهش سطح تماس ابزار-براده در نتیجه افزایش سرعت برشی می باشد.

لاکیک و همکاران [۶] تراشکاری آلیاژ CK45 به کمک جت سیال پرفشار را مورد بررسی قرار داده اند. نتایج آنها نشان می دهد که استفاده از جت سیال پرفشار افزایش قابلیت تولید، کاهش دمای ماشینکاری در ناحیه برش، بهبود شکل گیری و شکست براده، افزایش عمر ابزار و زبری سطح قابل قبول را در بر دارد.

سردانوویک و لاکیک [۷] با مطالعه بر روی تراشکاری AISI52100 با ابزار پوشش دار به کمک جت سیال پرفشار، قابلیت تولید بیشتر، سایش ابزار کمتر و زبری سطح قابل قبول را از ویژگی های به کارگیری جت سیال پرفشار بیان نموده اند.

ازوگوو و همکاران به منظور بررسی عمر ابزار در ماشینکاری هیبریدی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار با سه فشار ۱۱۰، ۱۵۰ و ۲۰۳ بار در سه سرعت برشی مختلف و دو نرخ پیشروی آزمایش هایی انجام داده و افزایش عمر ابزار را تا ۳۵۰٪ حین ماشینکاری پرداخت اینکونل ۷۱۸ به این روش گزارش نموده اند [۸] و [۹].

ایشان وجود گودال های کوچک میکرونی را در فشارهای بالا مشاهده نموده که باعث افزایش زبری سطح در فشار های بیشتر از فشار بهینه جت سیال می گردد [۸].

براهام بوچناک و همکاران [۱۰] اثر ماشینکاری به کمک جت سیال پرفشار را بر روی قابلیت ماشینکاری آلیاژ Ti555-3 مورد بررسی قرار داده اند. نتایج آزمایش های آنها شکست بهتر براده و زبری سطح کمتر با استفاده از جت سیال کمکی را نشان می دهد.

میا و دهر [۱۱] با انجام آزمایش هایی در دو حالت ماشینکاری خشک و ماشینکاری به کمک جت سیال در فشار ثابت ۸۰ بار بر روی فولاد EN24T سخت کاری شده متوجه شده اند که افزایش سختی قطعه موجب افزایش زبری سطح می گردد.

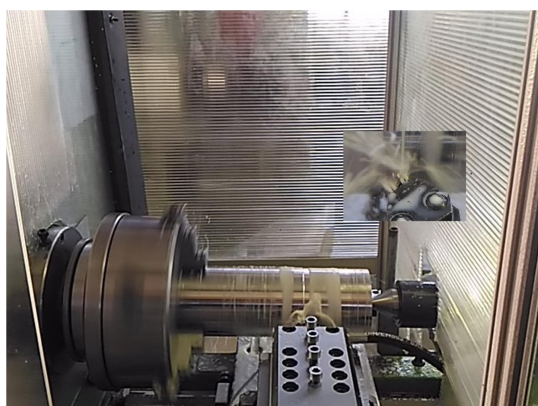
آید و همکاران [۱۲] سایش ابزار در ماشینکاری آلیاژ Ti17 در

- 1 Inconel
- 2 Nimonic
- 3 Rene
- 4 Udimet
- 5 Pyromet

محدوده شرایط مناسب ماشین کاری بر اساس پارامترهای هدف نیروی برشی و زبری سطح ماشین کاری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش ابتدا طراحی آزمایش‌ها به صورت کامل صورت گرفت و آزمایش‌ها برای ماشین کاری هیبریدی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار اجرا گردید. سپس با انجام کدنویسی در نرم افزار MATLAB شبکه عصبی توسط الگوریتم ژنتیک آموزش داده شد و در نهایت توسط الگوریتم NSGA-II مدل شبکه عصبی آموزش داده شده، بهینه گردید و محدوده‌های بهینه شرایط ماشین کاری در فرآیند ماشین کاری هیبریدی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار بر اساس بهینه‌سازی همزمان دو تابع هدف زبری سطح و نیروی ماشین کاری بدست آمد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش از روش ماشین کاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار استفاده گردید. در این روش از جت سیال پرفشار به منظور اعمال متمرکز و موثر سیال برشی در محل ماشین کاری استفاده می‌گردد. برای تامین جت سیال برشی پرفشار از یک پمپ واتر جت با قابلیت تامین فشار سیال تا ۲۰۰ bar استفاده گردید. هم‌چنین از یک ابزارگیر مناسب جهت اعمال جت سیال در محل ماشین کاری استفاده شد. دیگر دستگاه‌های مورد استفاده شامل پمپ کمکی برای تامین دی سیال مورد نیاز پمپ واتر جت، دستگاه اینورتر، دستگاه تاکومتر، دستگاه تراش مدل TN50BR، دینامومتر مدل 9265B ساخت شرکت کیستلر^۲ و زبری سنج M300 ساخت شرکت ماهر^۳ می‌باشد. استاندارد مورد استفاده برای ابزارگیر PSSNR2525M12 و اینسرت مورد استفاده از جنس کارباید تنگستن پوشش دار گرید CP200 با کد SNMG120412 می‌باشد. شکل ۲ نمای کلی ماشین کاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار به همراه دینامومتر، ابزارگیر و قطعه نمونه مورد استفاده از جنس سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را حین انجام آزمایش نشان می‌دهد. در شکل ۲ چگونگی اعمال جت سیال پرفشار مشخص می‌باشد.



شکل ۲- نمای کلی از شرایط آزمایش ماشین کاری هیبریدی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار

حالت‌های روان کاری و خنک کاری رایج و فشارهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ بار جت سیال پرفشار مورد بررسی قرار داده‌اند و وجود فشار بهینه جت سیال را در فشار ۱۰۰ بار با بررسی عمر ابزار نتیجه گرفته‌اند.

برمینگهام و همکاران [۱۳] دو روش ماشین کاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار و ماشین کاری با خنک کاری پرودتی بر روی قطعه‌ای از جنس Ti6Al4V انجام داده و نتایج را با یکدیگر مورد مقایسه قرار داده‌اند. بنابر تحقیقات صورت گرفته ایشان استفاده از جت سیال پرفشار افزایش بیشتر عمر ابزار را در مقایسه با خنک کاری پرودتی به همراه دارد.

کرامر و همکاران [۱۴] آزمایش‌های تجربی ماشین کاری خشک، ماشین کاری با روان کاری رایج و ماشین کاری با استفاده از جت سیال پرفشار را بر روی میله‌های پیستون سخت شده انجام داده و نتایج شکست براده، عمر ابزار و کارایی خنک‌کار را مورد بررسی و مقایسه قرار داده‌اند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که ماشین کاری خشک به دلیل براده بلند و انعطاف پذیر برای تمامی شرایط سرعت برشی و نرخ پیشروی کارایی مناسبی ندارد. هم‌چنین در مقایسه با خنک کاری رایج، استفاده از جت سیال پرفشار امکان به کارگیری سرعت برشی و نرخ پیشروی بیشتر را فراهم می‌نماید. شکست براده نیز به کمک این روش بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا نموده‌است. در ماشین کاری با خنک کاری معمول سایش ابزار خیلی سریع اتفاق افتاده و در مقابل با استفاده از جت سیال پرفشار، عمر ابزار به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

واگنوریوس و سوربی [۱۵] تاثیر استفاده از جت سیال خنک کاری پرفشار را بر روی عمر ابزارهای سیالون^۱ در ماشین کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها بهبود قابل ملاحظه‌ای در شکست براده را نشان می‌دهد. هم‌چنین سایش ابزارهای سرامیکی سیالون در اثر ایجاد شکاف در لبه برنده افزایش یافته ولی میزان سایش در سطح آزاد ابزار کاهش می‌یابد.

ناوس و همکاران [۱۶] اثر استفاده از این روش را در سایش ابزار حین تراشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316 مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آن‌ها آزمایش‌های ماشین کاری به کمک جت سیال پرفشار را با سه فشار سیال ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال صورت داده و با ماشین کاری خشک و ماشین کاری با خنک کاری معمول مورد مقایسه قرار داده‌اند. براساس تحقیقات آن‌ها کمترین سایش ابزار در ماشین کاری به کمک جت سیال با فشار ۱۰ مگاپاسکال مشاهده شده‌است.

با بررسی نتایج تحقیقات پیشین مشخص می‌گردد که به دلیل وجود شرایط بهینه در این فرآیند، عدم بکارگیری شرایط مناسب فشار جت سیال در این روش ماشین کاری باعث بدتر شدن شرایط ماشین کاری و پایین تر آمدن کیفیت محصول نهایی می‌گردد. در پژوهش‌های قبلی نویسندگان این تحقیق نیز به وجود شرایط بهینه در ماشین کاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار اشاره گردیده‌است [۱۷ و ۱۸]. بنابراین در ماشین کاری به کمک جت سیال پرفشار به دلیل تفاوت در شرایط بهینه مربوط به زبری سطح و نیروی برشی، استفاده از روش بهینه‌سازی همزمان و چند هدفه مناسبی به منظور یافتن

² Kistler
³ Mahr

¹ SiAlON

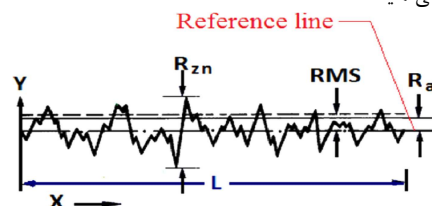
به منظور اجرای صحیح آزمایش‌ها نیاز به طراحی آزمایش مناسب می‌باشد [۱۹]. آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی گردید تا بررسی پارامترهای فرآیند شامل فشار جت سیال برشی، سرعت برشی، نرخ پیشروی امکان پذیر باشد. در طراحی کامل^۱ آزمایش‌ها ۳۰ آزمایش در نظر گرفته شد به طوریکه فشار جت سیال در پنج سطح، سرعت برشی در سه سطح، نرخ پیشروی در دو سطح و عمق برش در یک سطح تعیین گردید جدول ۱ پارامترهای تنظیمی آزمایش‌های ماشین‌کاری هیبریدی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار و سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای تنظیمی آزمایش‌های ماشین‌کاری هیبریدی

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار	
پارامتر فرآیند	سطوح آزمایش
فشار جت سیال (bar)	۱۵۰-۲۰۰-۱۰۰-۵۰
سرعت برشی (m/min)	۷۵-۱۰۰
نرخ پیشروی (mm/rev)	۰/۰۵-۰/۱۴
عمق برش (mm)	۱

آزمایش‌ها بر روی قطعه ای از جنس سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به قطر ۱۰۰ mm و طول ۲۷۰ mm صورت گرفت. حین انجام هر مرحله از آزمایش‌ها نیروهای ماشین‌کاری مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. با داشتن سه مولفه اصلی نیروی ماشین‌کاری، نیروی برآیند ماشین‌کاری محاسبه گردید.

زبری سطح آزمایش‌ها به روش تماسی مورد اندازه گیری قرار گرفت. در این روش پروب دستگاه زبری سنج با حرکت بر روی پستی و بلندی‌های سطح بالا و پایین رفته و پروفایل زبری سطح مطابق شکل ۳ را ارائه می‌نماید.



شکل ۳- پروفایل زبری سطح [۲۰]

پارامتر زبری سطح اندازه گیری شده در این پژوهش R_a می‌باشد. رابطه (۱) چگونگی محاسبه زبری سطح را از روی پروفایل زبری سطح نشان می‌دهد.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1)$$

برای هر آزمایش پارامتر زبری سطح R_a سه بار تکرار شده و میانگین سه بار اندازه گیری در نقاط مختلف برای هر آزمایش محاسبه گردید [۲۰]. استاندارد مورد استفاده در اندازه گیری زبری مطابق ISO 4287/1 در نظر گرفته شد.

سپس رابطه میان نیروی ماشین‌کاری و یا زبری سطح با پارامترهای متغیر فرآیند (شامل فشار جت سیال برشی، سرعت برشی، نرخ پیشروی) توسط شبکه عصبی آموزش داده شده به کمک الگوریتم

ژنتیک مدل گردید و در نهایت با استفاده از الگوریتم NSGA-II مقادیرهای بهینه توابع هدف و شرایط ماشین‌کاری بدست آمد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نتایج آزمایشات

جدول ۲ نتایج نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح آزمایش‌های صورت گرفته را ارائه می‌کند.

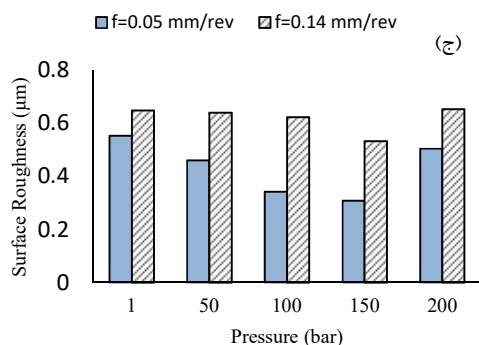
شکل ۴ مقایسه زبری سطح ماشین‌کاری شده در فرآیند ماشین‌کاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار در فشارهای متفاوت جت سیال در سه سطح سرعت برشی و دو سطح نرخ پیشروی مورد آزمایش را نشان می‌دهد. نمودارهای شکل ۴ وجود فشار بهینه جت سیال پرفشار را برای دستیابی به زبری سطح کمتر تایید می‌کنند.

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های ماشین‌کاری هیبریدی اینکونل ۷۱۸

به کمک جت سیال پرفشار					
شماره آزمایش	سرعت برشی (m/min)	نرخ پیشروی (mm/rev)	فشار سیال (bar)	زبری سطح (μm)	نیروی ماشین‌کاری (N)
۱	۱۰۰	۰/۰۵	۱	۰/۵۵۲	۱۴۸۸/۱
۲	۱۰۰	۰/۰۵	۵۰	۰/۴۵۹	۱۲۴۰/۹*
۳	۱۰۰	۰/۰۵	۱۰۰	۰/۳۴۲	۱۳۲۶/۱
۴	۱۰۰	۰/۰۵	۱۵۰	۰/۳۰۸	۱۳۸۷/۷
۵	۱۰۰	۰/۰۵	۲۰۰	۰/۵۰۴	۱۶۲۸/۶
۶	۱۰۰	۰/۱۴	۱	۰/۶۴۷	۱۹۶۶/۵
۷	۱۰۰	۰/۱۴	۵۰	۰/۶۳۹	۱۸۱۶/۳
۸	۱۰۰	۰/۱۴	۱۰۰	۰/۶۲۲	۱۸۰۸/۶
۹	۱۰۰	۰/۱۴	۱۵۰	۰/۵۳۲	۱۸۷۶/۱
۱۰	۱۰۰	۰/۱۴	۲۰۰	۰/۶۵۳	۱۹۸۶/۱
۱۱	۷۵	۰/۰۵	۱	۰/۴۱۴	۱۶۵۸/۱
۱۲	۷۵	۰/۰۵	۵۰	۰/۳۴۲	۱۶۴۴/۷
۱۳	۷۵	۰/۰۵	۱۰۰	۰/۳۱۱	۱۲۹۹/۹
۱۴	۷۵	۰/۰۵	۱۵۰	۰/۳۴۰	۱۴۳۴/۳
۱۵	۷۵	۰/۰۵	۲۰۰	۰/۴۹۹	۱۴۷۰/۵
۱۶	۷۵	۰/۱۴	۱	۱/۰۱۷*	۲۱۴۰/۱
۱۷	۷۵	۰/۱۴	۵۰	۰/۴۵۵	۲۰۶۳/۲
۱۸	۷۵	۰/۱۴	۱۰۰	۰/۴۰۱	۱۸۳۳/۷
۱۹	۷۵	۰/۱۴	۱۵۰	۰/۴۵۶	۲۰۱۰/۲
۲۰	۷۵	۰/۱۴	۲۰۰	۰/۵۵۹	۲۰۸۸/۹
۲۱	۵۰	۰/۰۵	۱	۰/۳۲۴	۱۵۴۰/۴
۲۲	۵۰	۰/۰۵	۵۰	۰/۲۹۶*	۱۴۹۳/۲
۲۳	۵۰	۰/۰۵	۱۰۰	۰/۳۴۱	۱۴۷۸/۳
۲۴	۵۰	۰/۰۵	۱۵۰	۰/۳۴۲	۱۳۵۰/۶
۲۵	۵۰	۰/۰۵	۲۰۰	۰/۳۷۱	۱۴۳۳/۱
۲۶	۵۰	۰/۱۴	۱	۰/۷۸۷	۲۲۱۷/۷*
۲۷	۵۰	۰/۱۴	۵۰	۰/۶۵۰	۲۱۹۹/۹
۲۸	۵۰	۰/۱۴	۱۰۰	۰/۶۸۰	۲۱۲۶/۳
۲۹	۵۰	۰/۱۴	۱۵۰	۰/۷۱۳	۱۹۸۲/۷
۳۰	۵۰	۰/۱۴	۲۰۰	۰/۸۱۱	۲۰۴۹/۷

* بیشترین و کمترین مقدار زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری را نشان می‌دهد.

1 Full Factorial

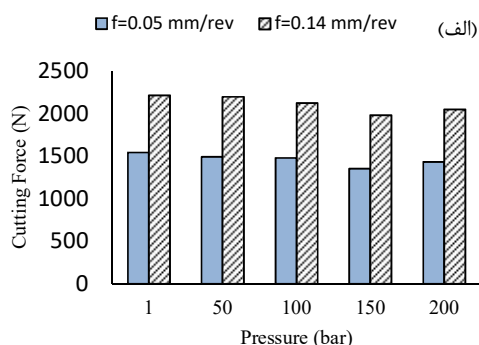


شکل ۴- زبری سطح ماشین کاری شده براساس فشار جت سیال استفاده شده در (الف) سرعت برشی ۵۰ متر بر دقیقه (ب) سرعت برشی ۷۵ متر بر دقیقه (ج) سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه

با بررسی نمودارهای شکل ۵ وجود شرایط بهینه برای فشار جت سیال تایید می گردد. در هر سه نمودار شکل ۵ به دلیل بیشتر بودن سطح مقطع براده در نرخ پیشروی بیشتر، نیروی ماشین کاری بیشتر می باشد.

با مطالعه نمودارها در سرعت های برشی گوناگون مشخص می گردد که کمترین نیروی ماشین کاری برای سرعت های برشی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متر بر دقیقه به ترتیب در فشارهای جت سیال ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ بار رخ می دهد. بنابراین نتایج حاکی از کاهش فشار جت سیال بهینه با افزایش سرعت برشی می باشد.

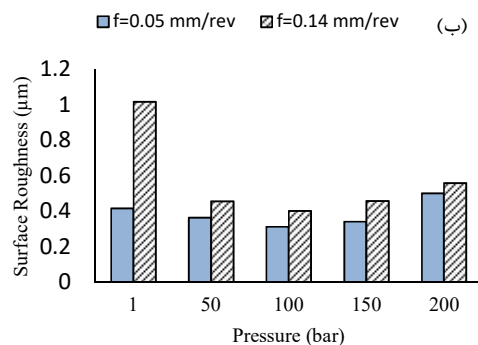
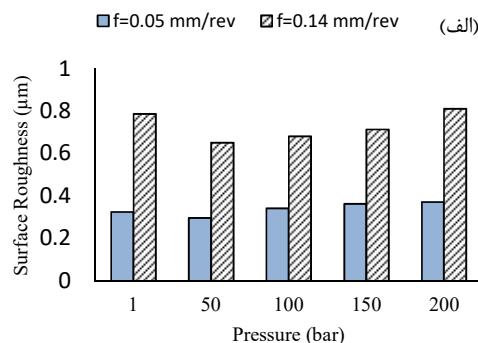
با توجه به اینکه با افزایش سرعت برشی سطح تماس ابزار-براده کاهش می یابد [۵] در نتیجه در سرعت های برشی بیشتر فشار جت سیال بهینه لازم به منظور بالا نگه داشتن براده کاهش می یابد.



با بررسی نمودارها مشخص می شود که در بین پنج سطح فشار سیال مورد آزمایش، فشارهای جت سیال ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ بار به ترتیب در سرعت های برشی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متر بر دقیقه کمترین زبری سطح را در پی دارند. این نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت برشی فشار بهینه جت سیال افزایش می یابد که ناشی از سایش بیشتر ابزار در سرعت های برشی بیشتر می باشد. این امر به خاطر تمرکز دمای بیشتر بر روی ابزار به دلیل کاهش سطح تماس ابزار-براده با افزایش سرعت برشی می باشد [۵]. بنابراین در سرعت های برشی بیشتر فشار بهینه جهت روان کاری و خنک کاری موثر در ناحیه ماشین کاری افزایش می یابد.

از طرف دیگر مقایسه نتایج زبری سطح برای دو نرخ پیشروی ۰/۱۴ و ۰/۰۵ میلی متر بر دور نشان می دهد که به دلیل تاثیر مستقیم گام پیشروی بر روی زبری سطح ماشین کاری شده، زبری سطح بیشتر در نرخ پیشروی بیشتر رخ می دهد.

شکل ۵ مقایسه نیروی ماشین کاری در فرآیند ماشین کاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار در فشارهای متفاوت جت سیال را در سه سرعت برشی و دو نرخ پیشروی نشان می دهد.



آورده شده است.

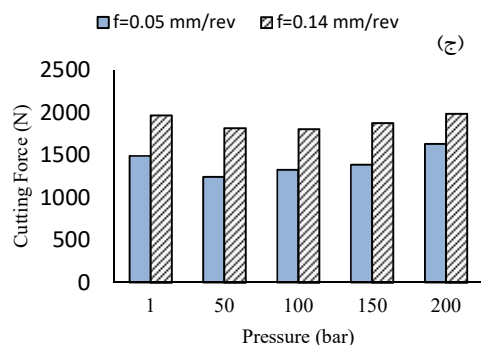
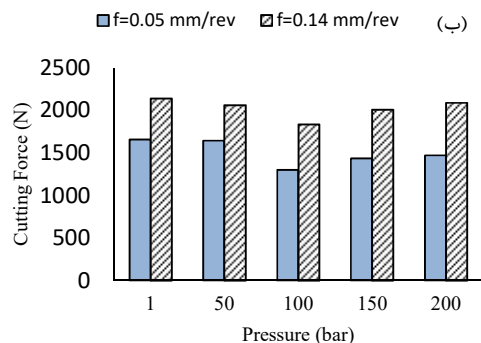
جدول ۳ تعیین پیکربندی مناسب شبکه عصبی براساس کمترین درصد خطای بدست آمده

پیکربندی شبکه عصبی	۳-۳-۴-۱	۳-۳-۵-۱	۳-۴-۵-۱	۳-۵-۳-۱	۳-۵-۷-۱
درصد خطای زبری	۷/۹	۱۱/۲	۸/۲	۱۵/۶	۹/۱
سطح					
درصد خطای نیروی ماشین کاری	۹/۵	۹/۵	۷/۹	۷/۰	۵/۳

همانطور که از جدول ۳ نیز مشخص است پیکربندی بهینه مدل شبکه عصبی زبری سطح ۳-۳-۴-۱ و پیکربندی بهینه مدل شبکه عصبی نیروی ماشین کاری ۳-۵-۷-۱ می باشد. تفاوت در تعداد نرون ها در لایه های مخفی دو مدل شبکه عصبی زبری سطح و نیروی برش، به دلیل تفاوت در محدوده بهینه شرایط برای هریک از این دو پارامتر هدف می باشد.

۳-۳- آموزش شبکه عصبی

به منظور تعیین مدل پیش بینی فرآیند با دقت قابل قبول بایستی شبکه عصبی آموزش داده شود. یکی از روش های پیش فرض آموزش شبکه عصبی استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا می باشد. این روش آموزش برای دستیابی به دقت قابل قبول برای مدل ارائه شده نیازمند داده های بسیار زیادی بوده که برای فرآیندهای ساخت مانند ماشین کاری هیبریدی نیاز به صرف هزینه بسیار زیاد می باشد. بنابراین به منظور کاهش خطای آموزش شبکه عصبی در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای آموزش شبکه عصبی استفاده گردید. برای این کار کدهای شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک با قابلیت ارتباط با یکدیگر در نرم افزار MATLAB نوشته شدند. شکل های ۶ و ۷ نمودار همگرایی در فرآیند آموزش شبکه عصبی به کمک الگوریتم ژنتیک را به ترتیب برای داده های زبری سطح و نیروی ماشین کاری نشان می دهند. برای دو پارامتر زبری سطح و نیروی ماشین کاری از تابع جهش گوسین استفاده شده است. تعداد نسل های تعیین شده برای الگوریتم ژنتیک به گونه ای انتخاب می گردد که تا زمانی که خطای آموزش و تست کاهش یابد تعداد نسل ها افزایش یابد. افزایش بیش از حد نسل ها موجب یادگیری بیش از حد شبکه عصبی و در نتیجه افزایش خطای تست می گردد.



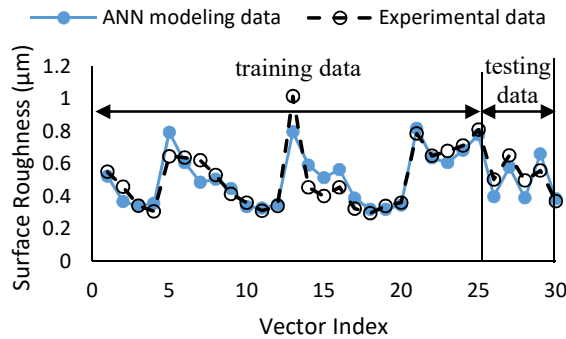
شکل ۵- نیروی ماشین کاری براساس فشار جت سیال استفاده شده در (الف) سرعت برشی ۵۰ متر بر دقیقه (ب) سرعت برشی ۷۵ متر بر دقیقه (ج) سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه

۳-۲- شبکه عصبی

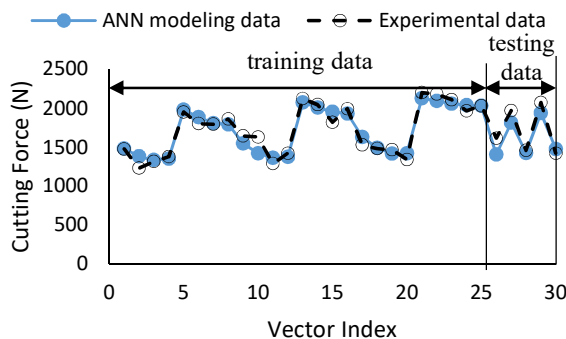
شبکه عصبی در فرآیندهای ساخت، ابزار مناسبی برای ایجاد مدل پیشگوی فرآیند می باشد. در این پژوهش از شبکه عصبی برای دستیابی به مدل پیشگوی فرآیند به دلیل قابلیت آن در ارائه مدل پیشگو برای روابط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیندهای با پیچیدگی زیاد استفاده شده است [۲۱-۲۳].

به دلیل پیچیدگی های مدل مورد بررسی از شبکه عصبی با دو لایه مخفی استفاده گردید. برای تعیین پیکربندی مناسب شبکه عصبی میانگین کمترین خطای آموزش و تست شبکه عصبی به عنوان معیار انتخاب در نظر گرفته شد. به منظور تعیین تعداد نرون ها و تابع انتقال مناسب هر لایه از شبکه عصبی، ابتدا به روش سعی و خطا تابع انتقال مناسب برای هر کدام از لایه های مخفی و لایه خروجی شبکه عصبی انتخاب گردید. انتخاب تابع انتقال لوگ سیگموئید برای تمامی لایه های شبکه عصبی کمترین خطای آموزش و تست شبکه عصبی را در پی داشت. پس از تعیین توابع انتقال، تعداد نرون های هر لایه با هدف کاهش خطای آموزش و خطای تست شبکه عصبی تعیین گردید.

جدول ۳ چگونگی انتخاب پیکربندی مناسب شبکه عصبی مورد استفاده را بر اساس خطای آموزش و تست مربوط به داده های نیروی ماشین کاری و زبری سطح نشان می دهد. در این جدول تنها تعدادی از سعی و خطاهای صورت گرفته نزدیک به پیکربندی بهینه شبکه عصبی



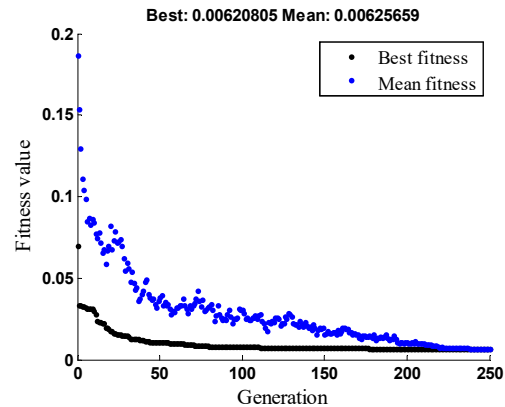
شکل ۸- نتایج زبری سطح تجربی و پیش بینی مدل شبکه عصبی



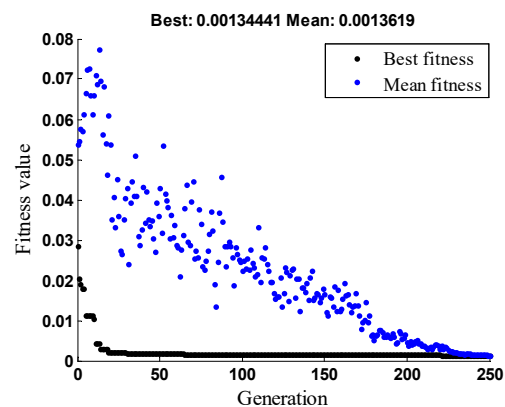
شکل ۹- نتایج نیروی ماشین کاری تجربی و پیش بینی مدل شبکه عصبی

۴-۳- بهینه‌سازی چندهدفه

با بررسی نتایج بدست آمده برای مقدارهای نیروی ماشین کاری و زبری سطح مشخص می‌گردد که رابطه پیچیده‌ای بین پارامترهای فرآیند و مقدارهای نیرو و زبری سطح وجود دارد که تعیین آن به روش‌های معمول رگرسیونی با خطای بسیار زیادی همراه است. از طرف دیگر پارامترهای تنظیمی مناسب ماشین کاری براساس شرایط، شکل و ابعاد قطعه متغیر می‌باشد، بنابراین نمی‌توان همه قطعات با ابعاد و شکل‌های گوناگون را با تنها یک مجموعه شرایط ثابت از پارامترهای فرآیند، ماشین کاری نمود و نیاز به مشخص کردن محدوده‌های مناسب برای پارامترهای تنظیمی می‌باشد. روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه علاوه بر اینکه پارامترهای تنظیمی بهینه فرآیند را تنها برای هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه بدست می‌آورند، تنها یک مجموعه جواب از پارامترهای تنظیمی ارائه می‌دهند. بنابراین این روش‌ها نمی‌توانند مناسب بهینه‌سازی فرآیندی چون فرآیند ماشین کاری هیبریدی به کمک جت سیال باشند زیرا روند متفاوت تغییرات توابع هدف (نیروی ماشین کاری و زبری سطح) بر اساس تغییرات پارامترهای تنظیمی فرآیند (شامل فشار جت سیال، سرعت برشی و نرخ پیشروی) در این فرآیند مشاهده می‌گردد. در این پژوهش از شبکه عصبی برای مدل سازی روابط بین پارامترهای فرآیند و توابع هدف استفاده گردیده و الگوریتم ژنتیک به منظور آموزش مدل شبکه عصبی به کار برده شده است. بدین منظور در نرم افزار متلب، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک به گونه‌ای کدنویسی گردیدند که ارتباط بین کدها برای آموزش شبکه



شکل ۶- نمودار همگرایی در فرآیند آموزش مدل شبکه عصبی زبری سطح ماشین کاری به کمک الگوریتم ژنتیک



شکل ۷- نمودار همگرایی در فرآیند آموزش مدل شبکه عصبی نیروی ماشین کاری به کمک الگوریتم ژنتیک

در جدول ۴ خطاهای مدل نهایی دو شبکه عصبی آموزش داده شده توسط الگوریتم ژنتیک برای زبری سطح و نیروی ماشین کاری آورده شده است.

جدول ۴- خطاهای مدل نهایی دو شبکه عصبی آموزش داده شده

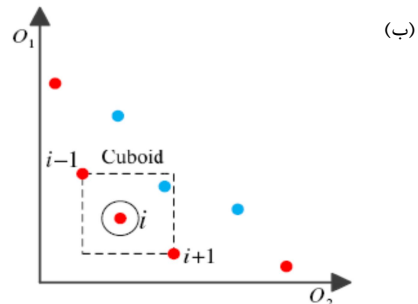
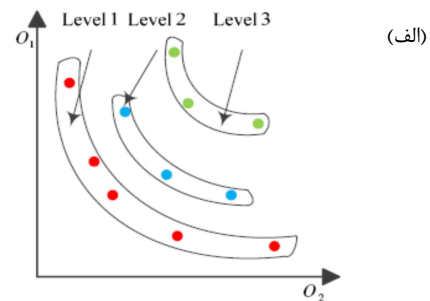
توسط الگوریتم ژنتیک برای زبری سطح و نیروی ماشین کاری				
میانگین خطای تست	مقدارهای خطای تست	میانگین خطای آموزش	مینیمم مربعات خطای آموزش	پیکربندی شبکه عصبی
۷/۹٪	-۱/۷٪/-۱/۱٪/-۱/۴٪ ۱۰/۳٪/-۷/۰٪	۵/۸٪	۰/۰۰۶۲۰	۰/۰۰۶۲۰
۵/۳٪	-۱/۴٪/-۶/۰٪/-۲/۴٪ ۹/۵٪/-۷/۰٪	۲/۹٪	۰/۰۰۱۳۴	۰/۰۰۱۳۴
			نیروی ماشین کاری	

شکل‌های ۸ و ۹ مقایسه نتایج زبری سطح و نیروی ماشین کاری تجربی و نتایج تخمین زده شده توسط شبکه عصبی آموزش داده شده توسط الگوریتم ژنتیک برای داده‌های آموزش و تست را نشان می‌دهند.

عصبی برقرار گردد. و بدین ترتیب مدل آموزش داده شده شبکه عصبی توسط الگوریتم ژنتیک بدست آمد و سپس توسط روش بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم NSGA-II مقادارهای بهینه فرآیند (جبهه پرتو) تعیین گردید.

۳-۵- NSGA-II

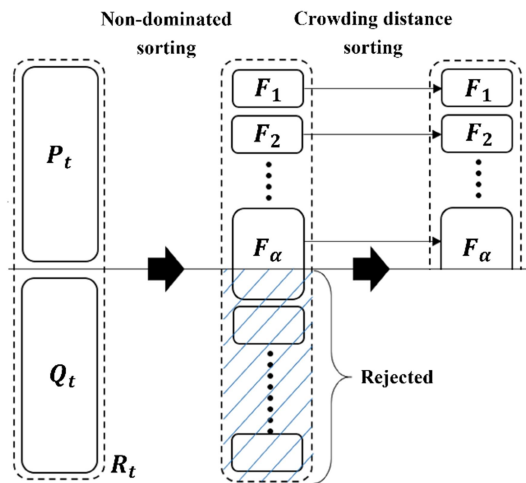
این الگوریتم دارای دو اپراتور اصلی می‌باشد. اپراتور اول شیوه طبقه بندی غیر مغلوب نام دارد و اپراتور دوم شیوه طبقه بندی ازدحام جمعیت خوانده می‌شود. نحوه عملکرد این دو اپراتور در شکل ۱۰ آمده است [۲۴].



شکل ۱۰- (الف) شیوه طبقه بندی غیر مغلوب (ب) شیوه طبقه بندی ازدحام جمعیت [۲۴].

در شکل ۱۱ روند کلی شکل‌گیری پرتوی بهینه در این الگوریتم نشان داده شده است [۱۸]. روند بهینه‌سازی بدین صورت است که در ابتدا جمعیت تصادفی P_t تولید می‌شود، سپس جمعیت Q_t برابر با جمعیت P_t توسط عملگرهای الگوریتم ژنتیک (از قبیل جهش و پیوند) ایجاد می‌شود. بعد از محاسبه مقادارهای متناظر تمامی توابع هدف، تمام جمعیت‌های جدید بر اساس تعریف جبهه پرتو و روند غیر مغلوب^۱ شماره‌گذاری می‌گردند. در مرحله‌ی بعد جبهه‌های پرتوی غالب بر اساس شماره آن‌ها به ترتیب صعودی دسته بندی می‌شوند^۲ (دسته بندی $F_1, F_2, \dots$ در شکل ۱۱). در ادامه جمعیت نسل بعد (P_{t+1}) از میان جمعیت جبهه‌های پرتو برتر (به ترتیب اولویت) انتخاب می‌گردند. بدین ترتیب این روند تکاملی تا رسیدن به جبهه پرتو بهینه ادامه می‌یابد. اما لازم به ذکر است در صورتی که تعداد جمعیت‌های موجود در یک جبهه پرتو بیش از جمعیت‌های مورد نیاز باشد، انتخاب جمعیت

نسل بعد بر اساس معیار ازدحام جمعیت^۳ صورت می‌پذیرد.



شکل ۱۱- روند کلی بهینه‌سازی همزمان در NSGA-II [۱۸].

بر اساس این معیار از میان جمعیت‌هایی با درجه‌ی یکسان، آن‌هایی که در فاصله‌ی بیشتر از سایرین قرار دارند انتخاب می‌شوند. این امر علاوه بر آن‌که احتمال جستجوی فضای بیشتری را سبب می‌شود، موجب توزیع یکنواخت جمعیت در جبهه پرتو شده و از تراکم آن‌ها در یک مکان جلوگیری می‌نماید [۲۴]. این اپراتور چگالی جواب‌های اطراف یک نقطه در یک جبهه پرتو را محاسبه می‌کند. بعد از مرتب کردن اعضای این جبهه پرتو بر اساس روند افزایشی تابع اول، پارامتر ازدحام جمعیت مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد. مرتب کردن و محاسبه ازدحام جمعیت برای همه توابع هدف صورت می‌گیرد.

$$cd_k(x_{(i,k)}) = \frac{f_k(x_{(i+1,k)}) - f_k(x_{(i-1,k)})}{f_k^{max} - f_k^{min}} \quad (2)$$

k شماره تابع هدف و f_k k امین جواب در فضای هدف و $x_{(i,k)}$ i امین جواب در فضای تصمیم‌گیری می‌باشد. f_k^{max} و f_k^{min} به ترتیب حداکثر و حداقل جواب تابع هدف k ام می‌باشد. $cd(x)$ که از رابطه (۳) بدست می‌آید پارامتر ازدحام جمعیت برای جواب x می‌باشد.

$$cd(x) = \sum_k cd_k(x) \quad (الف)$$

شکل ۱۲ (الف) اساس کار الگوریتم NSGA-II استفاده شده را ارائه می‌کند. شکل ۱۲ (ب) جبهه پرتوی بدست آمده با به کارگیری الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی همزمان دو تابع هدف زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری را نشان می‌دهد.

نتایج جبهه پرتو بدست آمده در بهینه‌سازی چندهدفه و همزمان دو پارامتر هدف زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری در شکل ۱۲ نشان می‌دهند که در محدوده جواب‌های بهینه، با افزایش یک پارامتر هدف پارامتر دیگر کاهش می‌یابد.

1 Non-dominated procedure
2 Non-dominated sorting

3 Crowding distance

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم

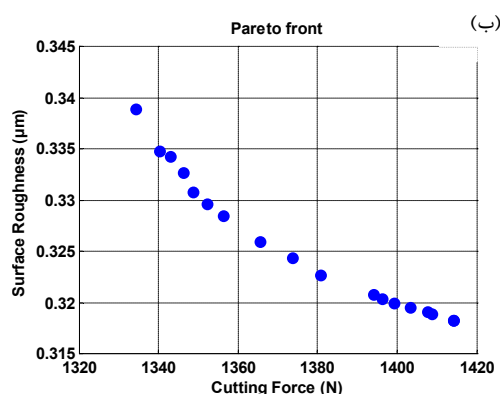
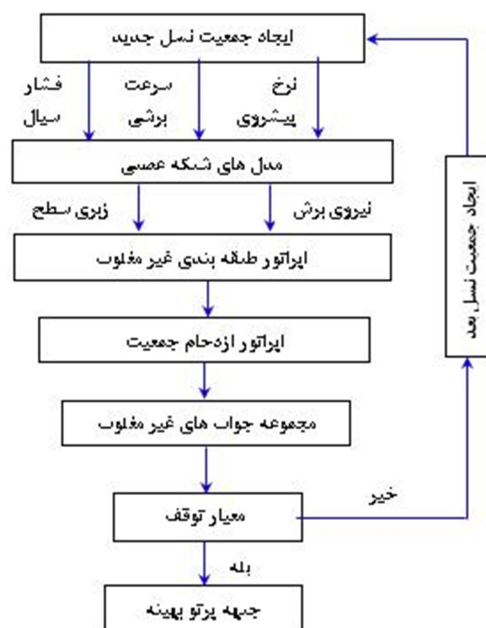
NSGA-II				
سرعت برشی (m/min)	نرخ پیشروی (mm/rev)	فشار جت سیال (bar)	زبری سطح (μm)	نیروی ماشین کاری (N)
۵۵/۸۲	۰/۰۵۰۰	۸۴/۹۴	۰/۳۱۸	۱۴۱۳/۶
۹۹/۷۸	۰/۰۵۰۱	۱۰۷/۳۳	۰/۳۳۸	۱۳۳۴/۲
۹۱/۱۹	۰/۰۵۰۱	۹۵/۴۵	۰/۳۳۳	۱۳۴۳/۵
۶۸/۵۶	۰/۰۵۰۲	۹۷/۹۹	۰/۳۲۴	۱۳۷۴/۹
۵۸/۵۴	۰/۰۵۰۰	۸۶/۵۰	۰/۳۱۹	۱۴۰۴/۹
۵۹/۱۱	۰/۰۵۰۰	۹۱/۱۵	۰/۳۲۰	۱۳۹۹/۵
۷۲/۵۴	۰/۰۵۰۰	۹۴/۲۵	۰/۳۲۴	۱۳۶۹/۱
۹۴/۶۵	۰/۰۵۰۰	۱۰۶/۶۵	۰/۳۳۶	۱۳۳۷/۵
۵۶/۷۲	۰/۰۵۰۱	۸۷/۰۷	۰/۳۱۹	۱۴۰۹/۷
۱۰۰	۰/۰۵۰۰	۱۰۸/۷۸	۰/۳۳۹	۱۳۳۳/۷
۵۵/۸۲	۰/۰۵۰۱	۸۷/۰۶	۰/۳۱۸	۱۴۱۳/۶
۶۲/۳۴	۰/۰۵۰۰	۹۳/۳۳	۰/۳۲۱	۱۳۹۰/۲
۵۹/۳۹	۰/۰۵۰۰	۸۸/۵۳	۰/۳۲۰	۱۴۰۰/۹
۹۵/۸۹	۰/۰۵۰۰	۸۸/۵۰	۰/۳۳۵	۱۳۴۲/۵
۸۸/۷۶	۰/۰۵۰۱	۹۴/۹۸	۰/۳۳۱	۱۳۴۶/۲
۸۱/۶۵	۰/۰۵۰۱	۱۰۰/۲۲	۰/۳۲۹	۱۳۵۲/۵
۶۸/۱۱	۰/۰۵۰۰	۹۴/۵۳	۰/۳۲۳	۱۳۷۷/۱

همانطور که در جدول ۶ آمده است نتایج بهینه‌سازی چند هدفه محدوده کلی فشار جت سیال ۸۵-۱۰۹ بار را برای محدوده سرعت برشی ۵۵-۱۰۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۱ میلی‌متر ارائه می‌کند. و در این محدوده هرچه سرعت برشی بیشتر باشد محدوده فشار مناسب افزایش می‌یابد و استفاده از فشار جت سیال خارج از محدوده ارائه شده باعث افزایش زبری، تخریب کیفیت سطح قطعه و همچنین افزایش نیروی ماشین کاری می‌گردد.

جدول ۶- خلاصه نتایج بهینه‌سازی چندهدفه

نیروی ماشین کاری (N)	زبری سطح (μm)	فشار جت سیال (bar)	نرخ پیشروی (mm/rev)	سرعت برشی (m/min)
۱۴۰۰-۱۴۱۴	۰/۳۱۸-۰/۳۲۰	۸۵-۹۱	۵۵-۶۰	۵۵-۶۰
۱۳۵۲-۱۴۰۰	۰/۳۲۰-۰/۳۲۹	۱۰۰-۸۸	۶۰-۸۰	۶۰-۸۰
۱۳۳۳-۱۳۵۲	۰/۳۲۹-۰/۳۳۹	۸۸-۱۰۹	۸۰-۱۰۰	۸۰-۱۰۰

نکته مهمی که از جدول ۶ مشخص است ارائه مجموعه‌ای از محدوده‌های شرایط بهینه بدست آمده از بهینه‌سازی چند هدفه توسط الگوریتم NSGA-II به جای یک شرایط بهینه ثابت می‌باشد. روشن است که در فرآیند ماشین کاری استفاده تنها از یک مجموعه شرایط ثابت برای ماشین کاری همه قطعات با هر شکل و کاربردی میسر نمی‌باشد. در نتیجه استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه نمی‌تواند چندان نیاز این فرآیند را مرتفع نماید. لذا روش ارائه شده در این پژوهش می‌تواند یک روش کاربردی برای بدست آوردن محدوده‌های مناسب شرایط کار ماشین کاری هیبریدی به کمک جت



شکل ۱۲- (الف) اساس کار الگوریتم NSGA-II استفاده شده به منظور بهینه‌سازی چندهدفه (ب) جبهه پرتوی بدست آمده با اجرای الگوریتم NSGA-II

جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی همزمان دو تابع هدف زبری سطح و نیروی ماشین کاری با استفاده از الگوریتم NSGA-II و پارامترهای بهینه فرآیند شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و فشار جت سیال را مطابق جبهه پرتوی بدست آمده در شکل ۱۲ (ب) آورده است.

از مزایای این روش بهینه‌سازی چند هدفه بدست آوردن محدوده مناسب و بهینه فشار جت سیال برای شرایط گوناگون سرعت برشی می‌باشد.

جدول ۶ خلاصه نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی چندهدفه آورده شده در جدول ۵ را ارائه می‌کند. با مطالعه جدول ۶ محدوده بهینه فشار جت سیال برای محدوده‌های گوناگون سرعت برشی مشخص می‌گردد.

با بررسی نتایج جدول ۶ مشخص می‌گردد که در سرعت‌های برشی بالاتر فشار جت سیال بهینه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت برشی زبری سطح بهینه افزایش پیدا کرده و نیروی بهینه ماشین کاری کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش پارامترهای فرآیند ماشینکاری هیبریدی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار شامل فشار جت سیال، سرعت برشی، نرخ پیشروی و تاثیر آنها بر پارامترهای نیروی ماشینکاری و زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مدل پیشگوی فرآیند با استفاده از شبکه عصبی آموزش داده شده توسط الگوریتم ژنتیک بدست آمد، به طوری که با کمترین خطا بتوان رابطهای میان پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند به دست آورد و در نهایت بهینه سازی چند هدفه فرآیند توسط الگوریتم NSGA-II صورت گرفت. در فرآیند ماشینکاری به کمک جت سیال پرفشار عدم استفاده از شرایط بهینه می تواند اثرات مخربی بر روی محصول نهایی ایجاد کند. بنابراین نتایج بهینه سازی چند هدفه بدست آمده می تواند به منظور به کارگیری بهینه و مناسب پارامترهای ماشینکاری هیبریدی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک جت سیال پرفشار مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تجربی نشان می دهد که با افزایش سرعت برشی در هر دو نرخ پیشروی به دلیل کاهش سطح تماس ابزار-براده و افزایش تمرکز دما و در نتیجه افزایش سایش ابزار، فشار بهینه لازم برای دستیابی به زبری سطح بهینه افزایش می یابد ولی به دلیل کاهش سطح تماس ابزار-براده فشار بهینه لازم برای دستیابی به نیروی ماشینکاری بهینه کاهش می یابد.

نتایج بهینه سازی همزمان دو پارامتر هدف زبری سطح و نیروی ماشینکاری نشان می دهند که در محدوده سرعت برشی ۱۰۰-۵۵ متر بر دقیقه با عمق برش ۱ میلی متر و نرخ پیشروی ۰/۰۵ میلی متر بر دور، محدوده بهینه فشار ۸۵-۱۰۹ بار می باشد. در این شرایط محدوده بهینه نیروی ماشینکاری (N) ۱۴۱۴-۱۳۳۴ و محدوده بهینه زبری سطح ماشینکاری شده (μm) ۰/۳۳۹-۰/۳۲۰ می باشد. و به کارگیری فشار جت سیال خارج از محدوده بهینه سبب افزایش زبری سطح یا نیروی ماشینکاری می گردد.

۵- مراجع

- [5] Da Silva R.B., Machado A.R., Ezugwu E.O., Bonney J. and Sales W.F., Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, pp. 1459-1464, 2013.
- [6] Lakic G.G., Sredanovic B., Kramar D. and Kopac J., et al. Possibilities of Application of High Pressure Jet Assisted Machining in Hard Turning with Carbide Tools. *Tribology in Industry*, Vol. 39, pp. 238-247, 2017.
- [7] Sredanovic B. and Lakic G.G., Hard turning of bearing steel AISI 52100 with carbide tool and high pressure coolant supply. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, DOI: 10.1007/s40430-017-0764-2, 2017.
- [8] Ezugwu E. O. and Bonney J., Finish Machining of Nickel-Base Inconel 718 Alloy With Coated Carbide Tool Under Conventional and High-Pressure Coolant Supplies. *Tribology Transactions*, Vol. 48, pp. 76-81, 2005.
- [9] Ezugwu E. O. and Bonney J., Effect of High-Pressure Coolant Supply When Machining Nickel-Base, Inconel 718 Alloy With Coated Carbide Tools. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153, pp. 1045-1050, 2004.
- [10] Braham-Bouchnak T., Germain G., Morel A. and Furet B., Influence of high pressure coolant assistance on the machinability of the Titanium alloy Ti555-3. *Machining Science and Technology*, Vol. 19, pp. 134-151, 2015.
- [11] Mía M. and Dhar N.R., Prediction of surface roughness in hard turning under high pressure coolant using Artificial Neural Network. *Measurement*, Vol. 92, pp. 464-474, 2016.
- [12] Ayed Y., Germain G., Ammar A. and Furet B., Tool wear analysis and improvement of cutting conditions using the high-pressure water-jet assistance when machining the Ti17 titanium alloy. *Precision Engineering*, Vol. 42, pp. 294-301, 2015.
- [13] Bermingham M. J., Palanisamy S., Kent D. and Dargusch M. S., A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti-6Al-4V cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 752-765, 2012.
- [14] Kramar D., Krajnik P. and Kopac J., Capability of high pressure cooling in the turning of surface hardened piston rods, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 212-218, 2010.
- [15] Vagnorius Z. and Sorby K., Effect of high-pressure cooling on life of SiAlON tools in machining of Inconel 718. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 83-92, 2011.
- [16] Naves V. T. G., Da Silva M. B. and Da Silva F. J., Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel. *Wear*, Vol. 302, pp.1201-1208, 2013.
- [17] میرمحمدصادقی س. ا. و امیرآبادی ح. بررسی فرآیند ماشینکاری هیبریدی به کمک جت سیال پرفشار و بهینه سازی فرآیند با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*. د. ۱۵، ش. ۱۳، ص ۶۴-۶۷، ۱۳۹۴.
- [18] Mirmohammadsadeghi S.E. and Amirabadi H., 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*, DOI: 10.1177/0954408917738488, 2017.
- [19] Moradi M. and Mohazabpak A., Statistical modelling and optimization of laser percussion micro-drilling on
- [1] Sanz C., Fuentes E. and Gonzalo O., Turning Performance Optimisation of Aeronautical Materials by Using High Pressure Cooling Technology. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 2, No.2, pp. 269-280, 2007.
- [2] Lauwers B., Surface Integrity in Hybrid Machining Processes. *Procedia Engineering*, Vol.19, pp. 241-251, 2011.
- [3] Ezugwu E. O., Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 1353-1367, 2005.
- [4] Da Silva R.B., Sales W.F., Costa E.S., Ezugwu E.O., Bonney J., Da Silva M.B. and Machado A.R., Surface integrity and tool life when turning of Ti-6Al-4V with coolant applied by different methods. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI: 10.1007/s00170-017-0658-6, 2017.

- Inconel 718 sheet using response surface methodology. *Journal of lasers in Engineering*, Vol. 39, 2017.
- [20] Moradi M., Mehrabi O., Azdast T. and Benyounis K.Y., Enhancement of low power CO 2 laser cutting process for injection molded polycarbonate. *Optics & Laser Technology*, Vol. 96:208-218, 2017.
- [21] Khorram A., Yazdi M.S., Ghoreishi M. and Moradi M. Using ANN approach to investigate the weld geometry of Ti6Al4V titanium alloy. *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, pp. 491-498, 2010.
- [22] Jafarian F., Taghipour M. and Amirabadi H., Application of artificial neural network and optimization algorithms for optimizing surface roughness, tool life and cutting forces in turning operation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No.5, pp. 1469-1477, 2013.
- [23] Jafarian F., Amirabadi H. and Fattahi M., Improving surface integrity in finish machining of Inconel 718 alloy using intelligent systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, pp. 817-827, 2014.
- [24] Deb K., Pratap A. and Agarwal S., A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput*, Vol. 6, pp. 182-197, 2002.