

مدلسازی و بهینه سازی تاثیر پارامترهای مؤثر در عملیات اسیدشویی آلیاژ تیتانیوم با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

ولی علی میرزالو

گروه مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

(دریافت مقاله ۹۴/۰۱/۲۲ - پذیرش مقاله : ۹۴/۰۳/۱۷)

چکیده

برای حذف لایه آلفای سطحی از سطح قطعات فورج داغ شده از جنس آلیاژ تیتانیوم و بهبود کیفیت سطح معمولاً از فرآیند اسیدشویی استفاده می شود. با توجه به اثر متقابل پارامترهای مؤثر در این فرآیند، بررسی تاثیر پارامترها بر کیفیت سطح قطعه و میزان باربرداری و بهینه سازی آنها، نیازمند انجام آزمایشات تجربی و استفاده از روشهای مدلسازی است. در این تحقیق، تاثیر پارامترهای دما، مدت عملیات، غلظت اسید های هیدروفلوریک و نیتریک بر توابع پاسخ زبری سطح قطعه و عمق باربرداری، مدلسازی و بهینه سازی می شود. ابتدا با طراحی آزمایشات با روش تاگوچی و انجام آنها، تاثیر پارامترهای مذکور بر توابع پاسخ با روش شبکه عصبی مصنوعی مدلسازی می شود و با استفاده از این مدل تاثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح قطعه و عمق باربرداری بررسی می گردد. سپس با ترکیب روش الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، مقدار بهینه پارامترهای ورودی بدست می آید. نتایج نشان می دهد که شبکه عصبی پیش خور سه لایه ای با الگوریتم آموزش پس انتشار لونبرگ-مارکواریت با ده گره برای لایه پنهان با دقت بالایی زبری سطح و عمق باربرداری را برحسب پارامترهای ورودی مدلسازی می کند. با افزایش دما و درصد اسید هیدروفلوریک، عمق باربرداری بیشتر می شود و درصد اسید نیتریک و دمای عملیات در تاثیر بر عمق باربرداری باهم اثر متقابل دارند. مدت عملیات در زبری سطح تاثیر قابل توجهی ندارد و با افزایش دما در درصدهای پایین اسید هیدروفلوریک، زبری سطح کاهش می یابد اما در درصدهای بالای اسید، زبری سطح افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: اسید شویی، آلیاژ تیتانیوم، زبری سطح، شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک.

Modeling and optimization of the effective parameters in the pickling operation of the titanium alloy by the artificial neural network and genetic algorithm

V. Alimirzaloo

Department of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

(Received 11 April 2015, accepted 7 June 2015)

Abstract

Alfa layer due to the hot forging of the titanium alloy is removed using the acid pickling operation. Because of the interaction between the effective parameters, investigation and optimization of the effective parameters needs experimentation and modeling methods. In this research effect of the temperature, operation time and percent of the hydrofluoric and nitric acids on the surface roughness and depth of cutting are modeled and optimized. First the experiments are designed using taguchi method and implemented. Then the process is modeled by an artificial neural network and the effect of the parameters on the surface roughness and depth of cutting are investigated. Next by combining the artificial neural network with genetic algorithm the process is optimized. Results show that a Multilayer Feed forward network with Levenberg-Marquardt backpropagation learning algorithm and ten nodes in the hidden layer could model the operation precisely. Increasing the temperature and hydrofluoric acid percent cause to increase the depth of cutting. Nitric acid percent and operation temperature have interaction in affecting on the amount of depth of cutting. Operation time have no effect on the roughness. Increasing the temperature at low percent of hydrofluoric acid cause to decrease the roughness however it increases at high percent of hydrofluoric acid.

Keywords: Acid pickling, titanium alloy, surface roughness, Artificial neural network, genetic algorithm.

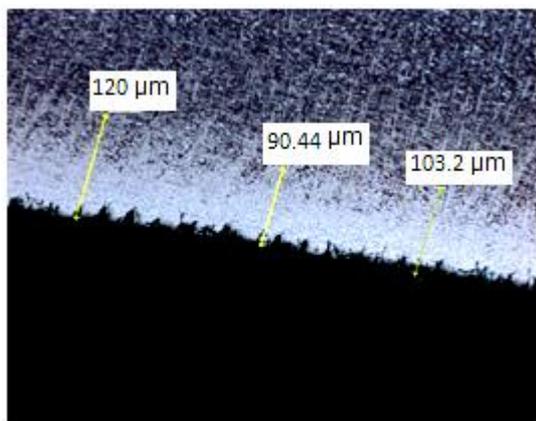
E-mail of corresponding author: v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

مقدمه

اسید شویی یک نوع ماشینکاری شیمیایی^۱ با عمق باربرداری کم برای بهبود کیفیت سطح است که در آن از انرژی شیمیایی برای جدا کردن قسمتی از مواد استفاده می‌شود. امروزه از این روش در صنایع مختلف از جمله صنعت هوافضا در ساخت پره های کمپرسور موتورهای توربینی، نازل جت، ساخت بدنه موشک استفاده می‌شود. اولین کاربرد صنعتی این روش در سال ۱۹۵۳ بود که جهت کاهش وزن بدنه هواپیما، بکار گرفته شد. در سالهای اخیر مطالعات معدودی در این زمینه انجام شده است. لندگروس در سال ۱۹۹۴ با بررسی اثر پارامترهای مختلف قابل تغییر در فرآیند، به این نتیجه رسید که با تغییر نوع و شرایط محلول میتوان کیفیت سطح، تolerانس ابعادی و خوردگی کناره و زمات اسیدشویی را تا حد مطلوبی بهبود داد [۱]. تاکاهاشی و همکارانش در سال ۲۰۰۲ تاثیر اندازه دانه بندی اولیه را در براقی و سفیدی سطح قطعه تیتانیومی که با محلول اسید نیتریک-اسید هیدروفلوریک اسید شویی شده بود را بررسی کرده اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که کاهش اندازه دانه ها باعث کاهش براقی سطح می‌شود [۲]. سای و تسای در سال ۲۰۰۴ خصوصیات سطحی ناشی از اسیدشویی الیاژ Ti6Al4V را در محلول شیمیایی با ترکیبی از اسید هیدروفلوریک (HF) و اسید نیتریک (HNO₃) را بررسی کردند. آنها به طور کلی به این نتیجه رسیدند که نسبت محلولهای HF و HNO₃ تاثیر زیادی در برداشتن لایه α از روی سطح دارد. همچنین واکنشهای شیمیایی در داخل لایه α ، منجر به شکل گیری نهایی ترکیب H₂TiF₆ می‌شود که در فشار بالا توسط گازهای تولید شده خورده می‌شود [۳]. بان و همکارانش در سال ۲۰۰۶ تاثیر اسید سولفوریک در بهبود کیفیت سطح تیتانیوم را در عملیات حکاکی بررسی کرده اند نتایج آنها نشان می‌دهد که زبری سطح با دما و مدت عملیات افزایش می‌یابد و همچنین عمق باربرداری با افزایش دما بعد از یک فاصله

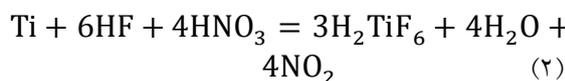
زمانی اولیه به سرعت افزایش می‌یابد [۴]. هو و همکارانش در سال ۲۰۰۸ توانستند سطحی از جنس نیکل نانو کریسالیزه شده را برای اولین بار به صورت شیمیایی ماشینکاری کنند. آنها توانستند با ترکیب اسید سولفوریک و HNO₃، از ایجاد ترک بر روی سطح قطعه جلوگیری کنند [۵]. روسو و موتوبو در سال ۲۰۱۱ تاثیر محلول اسیدشویی را روی سطحی با آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V بررسی کرده اند. آنها بعد از بررسی پارامترهای مورد نظر به این نتیجه رسیدند که، لایه α توسط نسبت بهینه اسیدهای HF و HNO₃، به اندازه کافی برداشته شده است و نسبت اسیدهای HF و HNO₃ تاثیر زیادی در زمان و دمای اسیدشویی دارد. در این تحقیق از اسید فسفریک برای کاهش تاثیر منفی اسیدهای HF و HNO₃ بر روی سطح ناصاف، استفاده شده است [۶]. ورمس و همکارانش در سال ۲۰۱۳ تاثیر عملیات های اسید شویی و آنودایز کردن را در سطح آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بر مولفه های یکپارچگی سطحی را بررسی کرده اند. بررسی آنها نشان می‌دهد از لحاظ میکروساختاری تغییری در سطح بوجود نمی‌آید اما تنشهای فشاری داخلی بطور موثری کاهش می‌یابد [۷]. یکی از کاربردهای فرآیند اسیدشویی، حذف لایه های سطحی مضر از سطح قطعات مانند پره های تیتانیومی فورج شده است. از آنجا که در اثر فورج داغ اینگونه پره ها، لایه ترد سطحی به نام لایه α بوجود می‌آید که استحکام خستگی پره ها را کاهش می‌دهد، لازم است بعد از فورج از سطح قطعه باربرداری شود. [۸]. در زمینه اسیدشویی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V مطالعات کمی مشاهده شده است و مطالعات موجود، بیشتر به بررسی اثر پارامترها پرداخته اند و با توجه به اثر متقابل این پارامترها، لازم است که به منظور دستیابی به شرایط بهینه، فرآیند مدلسازی شده و مقادیر مناسب این پارامترها استخراج شود که در این زمینه مطالعه ای مشاهده نشده است. در این تحقیق تاثیر پارامترهای مؤثر شامل

در اثر این واکنش فلورید تیتانیوم و گاز هیدروژن تولید می شود. در صورتی که هیدروژن حاصل در فلز پایه جذب



شکل ۱. لایه آلفای سطحی در قطعه فورج شده [۸].

شود می تواند اثرات مخرب بر خواص مکانیکی قطعه، بخصوص بر کاهش مقاومت به شکست بگذارد. یکی از راهها برای جلوگیری از جذب هیدروژن، افزایش مقداری اسید نیتریک به HF است [۹]. در این حالت، تیتانیوم بصورت زیر با محلول اسیدی واکنش می دهد [۳]:



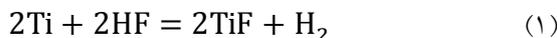
این واکنش گرمازا بوده و منجر به افزایش دمای محلول می شود و افزایش دما بر سرعت واکنش تاثیر می گذارد. بنابراین در فرآیند اسیدشویی طبق معادله (۲)، عنصر تیتانیوم از سطح قطعه با محلول اسیدی واکنش داده و باربرداری می شود. در کاربردهای صنعتی بخصوص در صنایع هوایی، کیفیت سطح نهایی قطعه بسیار مهم است زیرا کیفیت سطح بر خواص مکانیکی قطعه تأثیر مستقیم دارد. طراحان فرآیندهای ساخت، همواره در پی یافتن بهترین روش ها جهت دست یافتن به سطوحی با صافی سطح بالا هستند که در این زمینه تحقیقات وسیعی انجام شده و هنوز ادامه دارد. در عملیات اسیدشویی، ریز ساختار سطح در یک محلول اسیدی یا بازی قوی، در معرض واکنش شیمیایی قرار گرفته و حل می شود. در یک نگاه

دما، مدت عملیات، غلظت اسیدها بر زبری سطح قطعه و عمق باربرداری با انجام آزمایشات تجربی و مدل سازی با روش شبکه های عصبی مصنوعی بررسی می شود و سپس پارامترهای ورودی برای زبری سطح کمینه و عمق باربرداری مطلوب، با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری شامل شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک بهینه سازی می شوند.

عملیات اسیدشویی آلیاژ تیتانیم

آلیاژ تیتانیم Ti-6Al-4V شامل مخلوطی از فازهای آلفا و بتا است که دارای مقدار کافی عناصر پایدار کننده فاز بتا در دمای اتاق بوده و ممکن است در دمای اتاق از ۱۰ تا ۵۰ درصد فاز بتا داشته باشد. با افزایش دما از میزان فاز آلفا کاسته می شود و بر مقدار فاز بتا افزوده می شود. در اثر فورج داغ آلیاژ تیتانیم یک لایه فاز آلفای ترد در سطح قطعه فورج شده وجود می آید که ناشی از خنک شدن سریع سطح قطعه است. این لایه که به عنوان لایه آلفای سطحی شناخته می شود باعث تشکیل و رشد میکروتکرکها و کاهش عمر قطعه کار می شود. بنابراین لازم است این لایه از سطح قطعه، بار برداری شود. بررسی ها نشان می دهد که مطابق شکل (۱)، حداکثر مقدار ضخامت لایه آلفای سطحی در فورج پره های توربینی از جنس Ti-6Al-4V حدود ۱۵۰ میکرون است. [۸]. این لایه معمولاً با استفاده از عملیات اسیدشویی که یک نوع ماشینکاری شیمیایی است باربرداری می شود.

برای اسیدشویی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V معمولاً از محلول HNO₃ و HF استفاده می شود. در صورتی که از HF به تنهایی برای فرآیند اسیدشویی استفاده شود، HF با تیتانیوم موجود در سطح قطعه به صورت زیر واکنش می دهد:



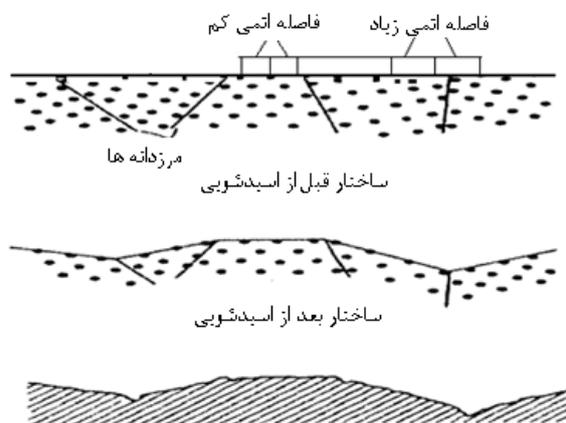
گیرد. روش تاگوچی یکی از پرکاربردترین و اقتصادی ترین روشهای طراحی آزمایش است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۱) فاکتورهای دما، زمان و غلظت اسیدها و تعداد سطوح آنها را نشان می‌دهد. مقادیر انتخابی فاکتورها بر اساس مطالعات قبلی انجام شده در زمینه اسیدشویی آلیاژ تیتانیوم و آزمایشات اولیه در نظر گرفته شده است. فاکتورها، تعداد سطوح و مقادیر آنها تأثیر مستقیم بر آرایه انتخابی دارند. با توجه به تعداد فاکتورها و سطوح آنها، آرایه L_{27} به عنوان اقتصادی ترین آرایه استاندارد برای انجام آزمایشات در این تحقیق، انتخاب شده است. طبق این آرایه، ترتیب آزمایشات و مقادیر پارامترها بصورت جدول (۲) می‌شود [۱۱-۱۲]. برای تهیه نمونه‌ها از میلگردی از جنس آلیاژ تیتانیوم $Ti6Al4V$ با قطر 20mm استفاده شد. این میلگرد توسط دستگاه وایرکات مدل $DK7632$ به تعداد ۲۷ نمونه استوانه ای شکل، هریک با ضخامت 6mm برش داده شده اند (شکل ۳). بعد از آماده سازی نمونه‌ها، جهت ایجاد لایه آلفای سطحی، نمونه‌ها در کوره ای با درجه حرارت 880 درجه سانتی گراد برای مدت 10 دقیقه قرار داده شدند سپس در هوا خنک شدند. برای حذف لایه اکسید سطحی از فرآیند سندبلاست استفاده شد که فقط جهت تمیز کردن سطح نمونه صورت می‌گیرد و قادر به برداشت لایه آلفا از روی سطح نمونه نیست.

جدول ۱. سطوح متغیرها.

سطوح متغیرها	۱	۲	۳
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۲۰	۳۰	۴۰
زمان (min)	۱	۵/۵	۱۰
HF (%)	۲	۵	۸
HNO ₃ (%)	۰	۱۵	۳۰

میکروسکوپی محلول شیمیایی هم بر دانه‌های سطحی و هم بر مرزدانه‌ها تاثیر گذار بوده، بطوری که معمولا سرعت واکنش شیمیایی در دو مورد مذکور متفاوت است. این امر به دلیل بالاتر بودن سطح انرژی مرزدانه‌ها نسبت به دانه های سطح، امری طبیعی به نظر می‌رسد. همچنین وجود اختلاف فواصل اتمی در مواد بی‌شکل^۱ باعث ایجاد سطوح ناهموار می‌شود. زیرا هرچه فاصله اتمی بیشتر باشد سرعت خوردگی در این محل بیشتر است [۱۰]. شکل (۲) تأثیر مرزدانه‌ها و فاصله اتمها را بر پروفیل سطح نهایی حاصل از عملیات اسید شویی نشان می‌دهد.

بررسی های قبلی در مورد تاثیر پارامترهای موثر در فرآیند اسید شویی آلیاژ تیتانیوم $Ti6Al4V$ نشان می‌دهد که پارامترهای دما، غلظت اسیدها و مدت زمان ماشینکاری در کیفیت سطح نهایی قطعه و عمق بار برداری تاثیر گذار هستند. بنابراین برای بهینه سازی فرآیند این پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۲. عملیات اسیدشویی و تاثیر فاصله اتمی و مرز دانه‌ها بر پروفایل سطح نهایی. سطح حاصل از اسید شویی

طراحی و انجام آزمایشات

به منظور افزایش راندمان، دقت در تحلیل‌ها و صرفه جویی در هزینه، باید طراحی آزمایش مناسب صورت

ضخامت نمونه‌ها در قبل و بعد از اسیدشویی برای هر آزمایش و محاسبه اختلاف ضخامت، عمق باربرداری بدست می‌آید. ضخامتها توسط میکرومتری با دقت 0.001mm اندازه‌گیری شد. بعد از انجام کامل آزمایشات مطابق جدول طراحی آزمایشات، پارامترهای خروجی زبری سطح و عمق باربرداری نمونه‌ها مطابق جدول (۲) بدست آمد. زبری سطح نمونه‌ها توسط دستگاه زبری سنج مدل SJ-410 شرکت Mitutoyo، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها از معیار زبری میانگین Ra برحسب μm استفاده شد. در این معیار در طول مشخصی از سطح قطعه، ارتفاع قله‌ها یعنی $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z'_1, Z'_2, Z'_3, \dots, Z'_n$ و عمق دره‌ها یعنی $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z'_1, Z'_2, Z'_3, \dots, Z'_n$ اندازه‌گیری می‌شود سپس میانگین آنها بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n |Z_i + Z'_i| \quad (1)$$

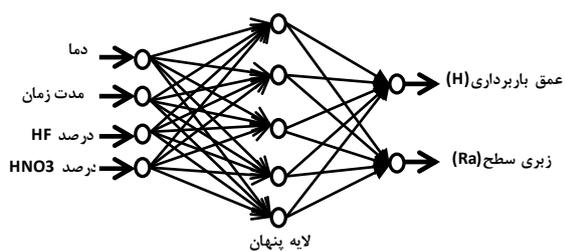
مدلسازی با شبکه عصبی

شبکه عصبی مصنوعی یک سیستم پردازشی داده است که از مغز انسان ایده گرفته و با استفاده از پردازنده‌های کوچکی که بصورت شبکه‌ای به هم پیوسته و موازی با یکدیگر رفتار می‌کنند داده‌ها را پردازش می‌کند تا یک مسأله را حل نماید. تاکنون شبکه‌های عصبی مختلفی برای مدل‌سازی مسایل معرفی شده است. شبکه عصبی چند لایه پیشخور پس انتشار خطا^۲، از جمله پر استفاده‌ترین شبکه‌های عصبی؛ بخصوص در کاربردهای مدل‌سازی است که در دهه‌های اخیر و در زمینه‌های گوناگون علوم و مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. در این نوع شبکه عصبی، سه نوع لایه نورونی شامل لایه ورودی، پنهان و خروجی وجود دارد. با توجه به اینکه در لایه ورودی اطلاعات خام به شبکه تغذیه می‌شود و عملیات وزن دهی و تابع تبدیل انجام نمی‌شود در بعضی منابع این نوع شبکه‌ها شبکه دو لایه هم نامیده می‌شوند. در هریک از گره‌ها



شکل ۳. نمونه آماده شده برای آزمایش.

بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایشات اجرا شد. عملیات اسیدشویی بر روی نمونه‌ها به روش غوطه‌وری انجام شد. در این روش پس از آماده‌سازی ظرف ضد اسید و تدارک محلول اسیدشویی مناسب با شرایط ویژه آن محلول، قطعه را داخل ظرف غوطه‌ور می‌سازند. محلولهای اولیه اسیدشویی شامل HF با غلظت ۷۰٪ و HNO_3 با غلظت ۵۵٪ تشکیل شده است. طبق جدول طراحی آزمایشات تاگوچی، آزمایشات با توجه به درصد اسیدها و شرایط زمان و دما اجرا شد. با توجه به گرمازا بودن فرآیند شیمیایی در عملیات اسیدشویی، کنترل دما یکی از مشکل‌ترین مسایل در اجرای آزمایشات است بنحوی که در برخی از آزمایشات دما به حدی بالا می‌رود که کنترل آن به شدت مشکل می‌شود و باید توسط فرایندهای تبرید، دما کاهش یابد. بدین منظور از حمام آب^۱ ۲۱ لیتری مدل ۱۰۰۴ ساخت شرکت GFL استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری دما در حین عملیات از ترمومتر لیزری دیجیتال با دقت ۰/۰۱ استفاده شد. به عنوان مثال در آزمایش شماره ۲۱، نمونه با ترکیب ۸٪ اسید هیدروفلوریدریک و ۳۰ درصد HNO_3 در دمای 20°C برای ۱۰ دقیقه اسیدشویی شده است. این آزمایش در دمای محیط صورت می‌پذیرد و چون فرآیند گرمازا است، دمای فرآیند به مراتب از 20°C بالاتر می‌رود، برای کنترل دما در این آزمایش از یخ استفاده شد تا دما در محدوده 20°C ثابت بماند و فرآیند اسیدشویی کاملاً در شرایط مورد نظر انجام شود. بعد از انجام عملیات اسیدشویی با اندازه‌گیری



شکل ۴. ساختار شبکه عصبی پیشخور.

از الگوریتم پس انتشار لونیبرگ-مارکواریت^۱ برای آموزش شبکه استفاده شد. روش لونیبرگ، مقادیر وزنهای گره‌ها را با استفاده از روش بهینه‌سازی لونیبرگ-مارکواریت تغییر می‌دهد. این روش معمولاً از سریعترین روش‌های پس انتشار بوده و معمولاً به عنوان اولین انتخاب در آموزش شبکه توصیه می‌شود [۱۱]. همچنین از خطای میانگین مربع و تحلیل رگرسیون (R²) برای ارزیابی عملکرد شبکه استفاده شد و برای تعدادگره‌های لایه پنهان، سه حالت ۵، ۱۰ و ۱۵ گره بررسی شد.

بهینه‌سازی

مدل بهینه‌سازی

با توجه به تاثیر فرآیند اسیدشویی بر زبری سطح قطعه، زبری سطح کمینه، مطلوب است همچنین از آنجاکه ضخامت لایه آلفای سطحی در قطعه فورج شده، حدود ۰/۱۵mm است در طی اسیدشویی باید حداقل این مقدار باربرداری شود. از طرف دیگر باربرداری بیش از حد باعث خطای ابعادی قطعه می‌شود. بنابراین پارامترهای زمان، دما، غلظت اسیدها برای عمق باربرداری (H) حداقل ۰/۱۵mm و حداکثر ۰/۲mm و زبری سطح (Ra) کمینه بهینه‌سازی می‌شوند. با توجه به محدوده پارامترها، مدل بهینه‌سازی بصورت زیر می‌شود:

Minimize: Ra
 Constraints: Depth of cutting (mm):
 0.15 < H < 0.20

جدول ۲. طرح آزمایشات و مقادیر خروجی.

شماره آزمایش	T (min)	Temp (°C)	%HF	%HNO3	(Ra) (μm)	(H) (mm)
۱	۱	۲۰	۲	۰	۰/۹۶	۰/۰۳
۲	۱	۲۰	۵	۱۵	۱	۰/۰۶
۳	۱	۲۰	۸	۳۰	۰/۹۶	۰/۰۸
۴	۱	۳۰	۲	۱۵	۱/۰۱	۰/۰۶
۵	۱	۳۰	۵	۳۰	۱	۰/۰۸
۶	۱	۳۰	۸	۰	۰/۹۸	۰/۱۱
۷	۱	۴۰	۲	۳۰	۱/۰۳	۰/۱۵
۸	۱	۴۰	۵	۰	۱/۰۱	۰/۲۵
۹	۱	۴۰	۸	۱۵	۰/۹۹	۰/۲۴
۱۰	۵/۵	۲۰	۲	۰	۱/۰۱	۰/۰۶
۱۱	۵/۵	۲۰	۵	۱۵	۱/۰۲	۰/۰۶
۱۲	۵/۵	۲۰	۸	۳۰	۱/۰۶	۰/۱۲
۱۳	۵/۵	۳۰	۲	۱۵	۰/۹۲۵	۰/۱۳
۱۴	۵/۵	۳۰	۵	۳۰	۱	۰/۱۶
۱۵	۵/۵	۳۰	۸	۰	۰/۹۰۵	۰/۱۹
۱۶	۵/۵	۴۰	۲	۳۰	۰/۹۶۷	۰/۱۵
۱۷	۵/۵	۴۰	۵	۰	۱/۱۳	۰/۱۴
۱۸	۵/۵	۴۰	۸	۱۵	۱/۱	۰/۲
۱۹	۱۰	۲۰	۲	۰	۱/۱۲	۰/۱
۲۰	۱۰	۲۰	۵	۱۵	۰/۹۴	۰/۱۲
۲۱	۱۰	۲۰	۸	۳۰	۰/۹۸	۰/۱۷
۲۲	۱۰	۳۰	۲	۱۵	۱/۰۱	۰/۱۵
۲۳	۱۰	۳۰	۵	۳۰	۱/۰۳	۰/۲
۲۴	۱۰	۳۰	۸	۰	۰/۹۹	۰/۲۷
۲۵	۱۰	۴۰	۲	۳۰	۱/۰۱	۰/۲
۲۶	۱۰	۴۰	۵	۰	۱/۰۳	۰/۲۴
۲۷	۱۰	۴۰	۸	۱۵	۰/۹۵	۰/۲۸

ابتدا با توجه به وزن هر یک از اتصالات، مقادیر گره‌های متصل به آن گره در وزن مربوطه ضرب می‌شود سپس حاصل جمع آنها به عنوان ورودی به یک تابع به نام تابع فعالیت داده می‌شود و خروجی تابع به عنوان خروجی گره وارد اتصال بعدی می‌شود.

در این تحقیق، مطابق شکل ۴ یک شبکه عصبی پیشخور با تابع سیگموئیدی برای گره‌های لایه پنهان و تابع خطی برای گره‌های لایه خروجی بکار گرفته شد.

1. Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm (trainlm)

سازی ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشات تجربی در جدول ۲ یک شبکه عصبی مصنوعی طراحی و آموزش داده می‌شود و از این شبکه برای بدست آوردن مقادیر توابع پاسخ (زبری سطح و عمق باربرداری) در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. مطابق شکل (۵) با تعیین دامنه متغیرهای ورودی، ابتدا با اجرای اولیه الگوریتم ژنتیک، جمعیت اولیه از مقادیر پارامترهای ورودی تولید می‌شود سپس با استفاده از مدل شبکه عصبی آماده شده، مقادیر توابع پاسخ برای جمعیت اولیه استخراج می‌شود. در صورتی که الگوریتم همگرا نشود با اجرای عملگرهای انتخاب، تقاطع، جهش روی جمعیت قبلی، جمعیت جدید از پارامترهای ورودی ایجاد می‌شود و مجدد با استفاده از مدل شبکه عصبی، مقادیر توابع پاسخ برای جمعیت جدید استخراج می‌شود و همگرایی الگوریتم ژنتیک ارزیابی می‌شود. این روند آنقدر تکرار می‌شود که شرط همگرایی برقرار شود. نقش عملگر انتخاب، مضاعف ساختن جوابهای خوب و حذف جوابهای بد در یک جمعیت است که شامل مراحل مشخص کردن جوابهای خوب، کپی از جوابهای خوب و حذف جوابهای بد است. جهت اجرای این عملگر روش‌های مختلفی ابداع شده است مانند انتخاب مسابقه ای^۱، انتخاب متناسب^۲، انتخاب رتبه ای^۳، یکنواخت تصادفی^۴. عملگر تقاطع با ترکیب اعضای انتخاب شده، عضوهای جدیدی تولید می‌کند. تاکنون عملگرهای تقاطع مختلفی مانند تک نقطه ای^۵، دو نقطه ای، تقاطع خطی، تقاطع طبیعی، تقاطع آمیزش، تقاطع شبیه سازی شده دودویی و تقاطع سیمپلکس و پراکنده^۶ معرفی شده است. نقش عملگر جهش ایجاد تنوع در جمعیت است. ساده ترین عملگر جهشی یکنوع جهش تصادفی است که جهت ایجاد جوابهای تصادفی از کل فضای جستجو مورد

Subjected to: Time (minute):

$$0.5 < t < 10$$

Temperature ($^{\circ}\text{C}$):

$$20 \leq T \leq 40$$

Hydrofluoric acid:

$$0 \leq \text{HF}\% \leq 8$$

Nitric acid:

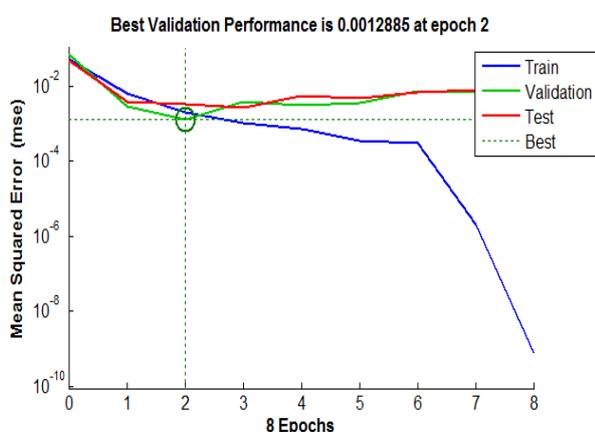
$$0 \leq \text{HNO}_3\% \leq 30$$

الگوریتم بهینه سازی

برای بهینه سازی فرآیند از یک الگوریتم فرا ابتکاری شامل مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی و بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک با استفاده از نرم افزار متلب [۱۳] استفاده می‌شود. اصول عملکرد الگوریتم ژنتیک از طبیعت گرفته شده است و براساس تکامل و ژنتیک است و مفهوم بقای سازگارتر را اعمال می‌کند. این الگوریتم با در نظر گرفتن مجموعه ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی (نسل)، با انجام عملگرهای ژنتیکی روی آنها نسل جدید را تولید می‌کند و آنرا در چرخه های متمادی می‌اندازد و به سوی نقطه بهینه سوق می‌دهد. محاسن روش الگوریتم ژنتیک عبارتند از: در روند جستجوی خود، تنها به تعیین مقدار تابع هدف در نقاط مختلف نیاز دارد و اطلاعات کمکی دیگری مثل مشتق تابع هدف را استفاده نمی‌کند، لذا می‌تواند در مسایل مختلف اعم از خطی، غیرخطی، پیوسته و گسسته استفاده شود و به سهولت با مسایل مختلف قابل تطبیق است. این روش درک و استفاده آسانی دارد. نسبت به نقطه شروع حساس نیست. چون در این روش برخلاف روش های تک مسیری، فضای جواب به طور همه جانبه جستجو می‌شود، امکان کمتری برای همگرایی به یک نقطه بهینه محلی وجود خواهد داشت. در سیستمهای هیبریدی خوب جواب می‌دهد، یعنی با روش های مدل‌سازی مانند سیستمهای فازی و شبکه های عصبی قابل ترکیب است. برای استخراج مقادیر تابع پاسخ یا ارزیابی از یک مدل شبکه عصبی که با نتایج آزمایشات تجربی آموزش داده شده است استفاده شد. برای بهینه

1. tournament selection
2. proportionate selection
3. ranking selection
4. Stochastic uniform
5. single-point crossover
6. scattered

با نتایج تستهای تجربی استفاده می‌شود. لازم است مدل شبکه عصبی بصورت مناسبی توابع پاسخ را برحسب پارامترهای ورودی پیش‌بینی کند. در شبکه عصبی پیشخور انتخاب شده، برای انتخاب تعداد گره‌ها در لایه پنهان یا میانی سه حالت ۵، ۱۰ و ۱۵ گرهی بررسی شد. مطابق جدول ۴ مشاهده می‌شود که در حالت ۱۰ گرهی خطای ارزیابی کمتر بوده و مقدار R^2 بیشتر است، لذا تعداد ۱۰ گره برای لایه پنهان مناسب است.



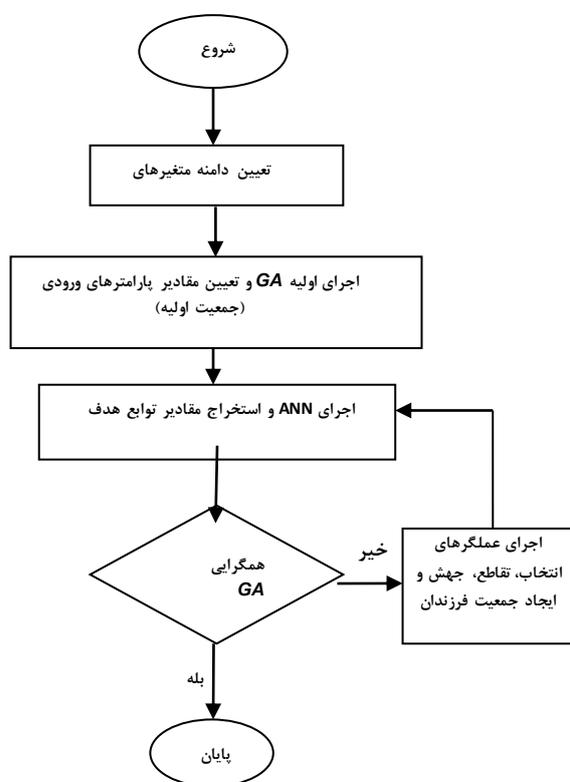
شکل ۶. نمودار عملکرد شبکه برای حالت ۱۰ گرهی در لایه پنهان.

جدول ۴. تأثیر تعداد گره‌ها در عملکرد شبکه.

تعداد گره در لایه پنهان	5	10	15
MSE	0.003	0.001	0.010
(%) R^2	99.367	99.752	99.570

نمودار عملکرد شبکه براساس خطای مربع میانگین برای حالت ۱۰ گرهی در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل شبکه عصبی بدست آمده، مطلوب است زیرا اول خطای میانگین مربع کم است دوم نمودار تغییرات خطای آزمون^۳ و خطای ارزیابی^۴ تغییرات مشابهی دارند

استفاده قرار می‌گیرد. از جمله عملگرهای جهش که در الگوریتم ژنتیک بکار گرفته می‌شوند عبارتند از جهش یکنواخت^۱، غیر یکنواخت، جهش توزیع نرمال و جهش گاوس^۲. برای اجرای الگوریتم ژنتیک، اندازه جمعیت ۵۰ و عملگر انتخاب یکنواخت و عملگر جهش گاوس و تابع تقاطع پراکنده استفاده شد. برای توقف تکرارها و همگرایی الگوریتم مقدار تکرار تابع پاسخ 10^{-6} در نظر گرفته شد.



شکل ۵. الگوریتم بهینه‌سازی

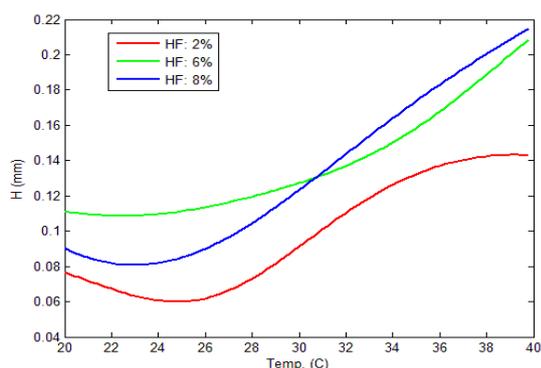
نتایج و بحث

با توجه به اینکه برای بهینه‌سازی فرآیند با استفاده از الگوریتم ژنتیک، لازم است در هر بار تکرار الگوریتم، مقدار توابع پاسخ برای جمعیت متغیرهای ورودی محاسبه شود که در این تحقیق از شبکه عصبی آموزش داده شده

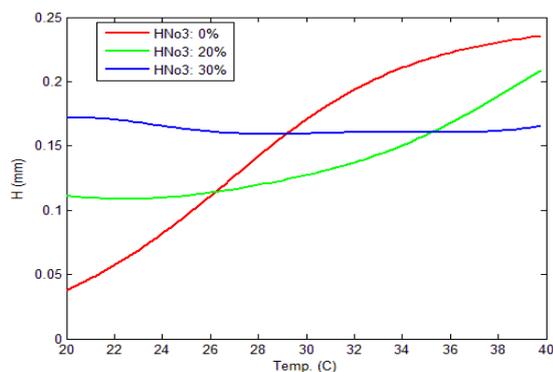
3 . test set error
4 . validation set error

1. Uniform
2 . Gaussian

صفر و ۲۰ درصد HNO_3 با افزایش دما عمق باربرداری افزایش می‌یابد. اما در اسیدنیتریک ۳۰ درصد افزایش دما در عمق باربرداری بی‌تاثیر است. تاثیر درصد اسیدنیتریک بر عمق باربرداری در دماهای مختلف متفاوت است. بنابراین درصد اسید نیتریک و دمای عملیات در تاثیر بر عمق باربرداری باهم اثر متقابل دارند.



شکل ۷. تاثیر دمای عملیات بر عمق باربرداری در درصد های مختلف HF (در ۲۰ درصد HNO_3 و مدت زمان ۵ دقیقه).



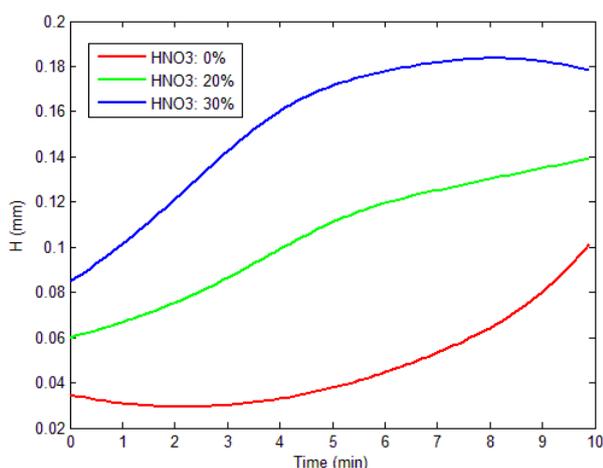
شکل ۸. تاثیر دمای عملیات بر عمق باربرداری در درصد های مختلف HNO_3 (در ۶ درصد HF و مدت زمان ۵ دقیقه).

در شکل ۹ تاثیر مدت زمان عملیات در عمق باربرداری در درصد های مختلف HF نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تا حدود مدت عملیات ۱/۵ دقیقه با افزایش درصد HF عمق باربرداری افزایش می‌یابد. اما با افزایش

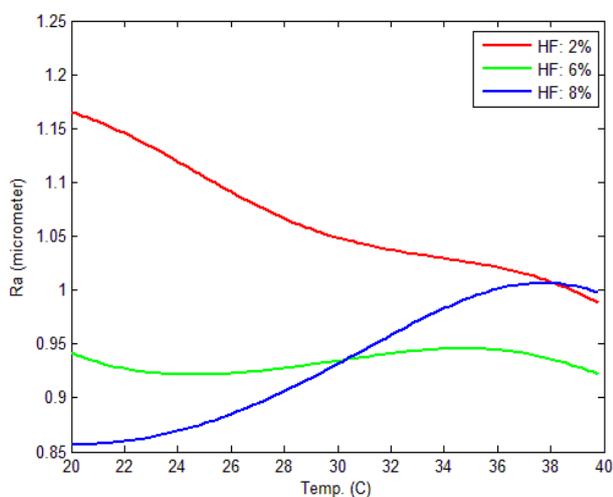
سوم برازش بیش از حد^۱ قابل توجه در تکرار دوم (که بهترین عملکرد ارزیابی وجود دارد) اتفاق نمی‌افتد. بنابراین شبکه عصبی پیش‌خور با ۱۰ گره برای لایه پنهان و الگوریتم آموزش پس‌انتشار لونبرگ-مارکواریت می‌تواند جهت بررسی تاثیر پارامترها و بهینه‌سازی فرآیند استفاده شود.

با استفاده از مدل شبکه عصبی بدست آمده، تاثیر پارامترهای ورودی بر توابع پاسخ زبری سطح و عمق باربرداری بررسی شد. در شکل ۷ تاثیر دمای عملیات بر عمق باربرداری در مدت ۵ دقیقه و ۲۰ درصد HNO_3 و درصد های مختلف HF نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای عملیات تا حدود ۲۵ درجه، عمق باربرداری تغییر قابل توجهی نمی‌کند اما بعد از آن، عمق باربرداری افزایش می‌یابد. با افزایش درصد HF، عمق باربرداری افزایش می‌یابد اما در دمای کمتر از ۳۰ درجه، عمق باربرداری در حالت ۸ درصد HF، کمتر از حالت ۶ درصد است. در مورد علت افزایش عمق باربرداری با افزایش دما می‌توان گفت در اثر برخورد مولکول‌ها با یکدیگر، تبادل انرژی صورت می‌گیرد، زمانی یک مولکول امکان عبور از سد انرژی (انرژی فعال‌سازی) و در نتیجه انجام واکنش را دارد که، حداقل انرژی لازم را کسب کرده باشد. در هر دما فقط تعداد کمی از مولکول‌ها دارای حداقل انرژی لازم برای عبور از سد انرژی هستند. با افزایش دما انرژی بین مولکول‌ها گسترده‌تر شده و تعداد مولکول‌های بیشتری حداقل انرژی سینتیک لازم برای عبور از سد انرژی را دارا هستند، لذا با افزایش دما، تعداد برخوردها با جهت‌یابی مناسب که دارای انرژی کافی برای واکنش هستند زیادتر شده، لذا سرعت اسیدشویی افزایش یافته و عمق باربرداری بیشتر می‌شود. در شکل ۸ تاثیر دمای عملیات بر عمق باربرداری در درصد های مختلف HNO_3 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش HNO_3 شیب نمودار کاهش می‌یابد طوری که در

HF زبری سطح با افزایش دما، کاهش می یابد و در دمای ۴۰ درجه در هر دو حالت به مقدار ۱ میکرون می رسد.



شکل ۱۰. تاثیر مدت زمان عملیات در عمق باربرداری در درصدهای مختلف HNO3 (در ۲۰ درصد هیدروفلوریک و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد).



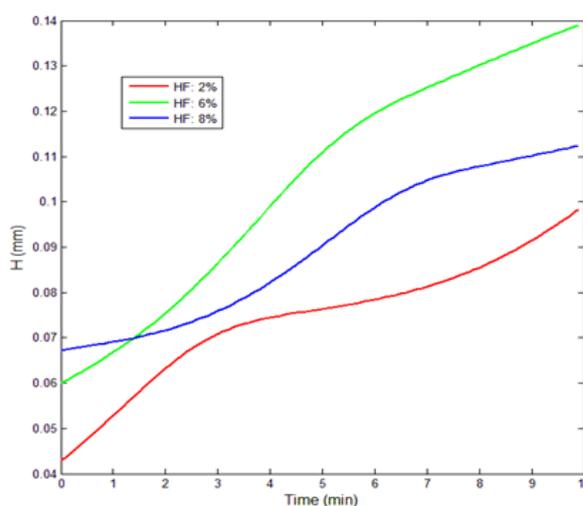
شکل ۱۱. تاثیر دمای عملیات بر زبری سطح در درصدهای مختلف HF (در مدت ۵ دقیقه و ۲۰ درصد HNO3).

در شکل ۱۲ تاثیر دمای عملیات بر زبری سطح در مدت ۵ دقیقه و ۶ درصد HF و درصدهای مختلف HNO3 نشان داده شده است. مشاهده می شود که در ۲۰ درصد HNO3 با افزایش دما زبری سطح تغییر قابل توجهی نمی کند و در

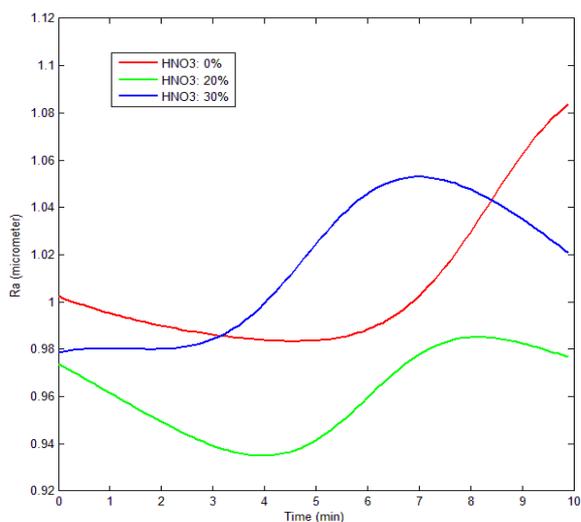
مدت عملیات، عمق باربرداری در ۶ درصد HF بیش از ۸ درصد HF می شود.

در شکل ۱۰ تاثیر مدت زمان عملیات در عمق باربرداری در درصدهای مختلف HNO3 در ۲۰ درصد HF و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش دما و درصد HNO3 عمق باربرداری افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود که شکل نمودار تغییرات عمق باربرداری بر حسب دما با افزایش HNO3 تغییر می کند طوری که در صفر درصد HNO3 انحنا نمودار به سمت بالا است و ۳۰ درصد HNO3 انحنا نمودار به سمت پایین است و در ۲۰ درصد HNO3 نمودار بدون انحنا بوده و تقریباً خطی است.

در شکل ۱۱ تاثیر دمای عملیات بر زبری سطح در مدت ۵ دقیقه و ۲۰ درصد HNO3 و درصدهای مختلف HF نشان داده شده است. مشاهده می شود که در حالت کلی تاثیر درصد HF بر زبری سطح در دماهای مختلف متفاوت است یعنی دمای عملیات و درصد HF در تاثیر بر زبری سطح با هم اثر متقابل دارند. در ۶ درصد HF با افزایش دما زبری سطح تغییر قابل توجهی نمی کند و در ۸ درصد HF زبری سطح با افزایش دما، افزایش یافته و در ۲ درصد



شکل ۹. تاثیر مدت زمان عملیات در عمق باربرداری در درصدهای مختلف HF (در ۲۰ درصد HNO3 و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد).



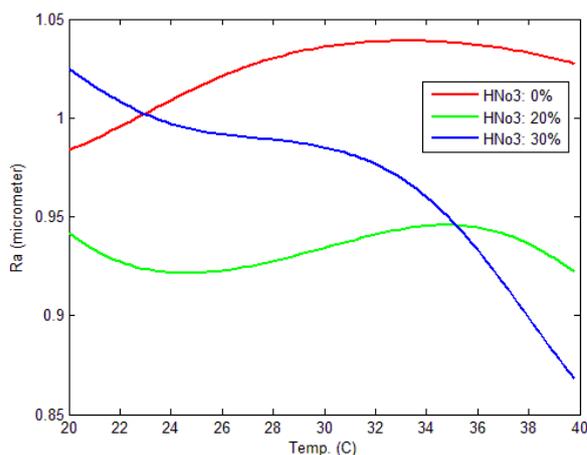
شکل ۱۴. تاثیر مدت عملیات بر زبری سطح در درصد های مختلف HNO3 (در دمای ۲۰ درجه و ۲۰ درصد HF).

در شکل ۱۴ تاثیر مدت عملیات بر زبری سطح در درصد های مختلف HNO3 در دمای ۲۰ درجه و ۲۰ درصد HF نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش مدت عملیات، در درصدهای مختلف HNO3 تغییرات زبری سطح، یکنواخت نیست. همچنین در ۲۰ درصد HNO3 کمترین زبری سطح اتفاق می افتد.

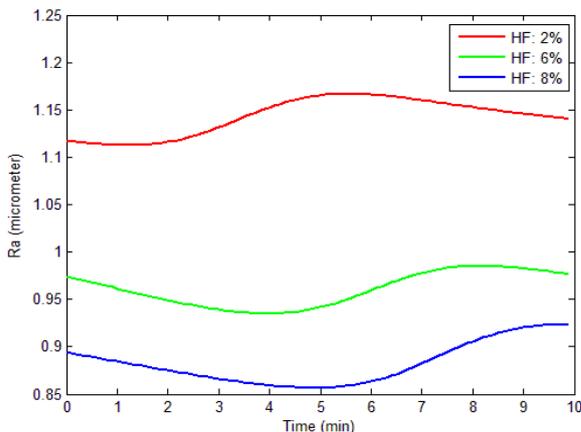
برای بهینه سازی فرآیند مطابق مدل ارائه شده در بخش ۴-۱ از روش الگوریتم ژنتیک ارایه شده در بخش ۲-۴ استفاده شد. در این الگوریتم برای ارزیابی مقدار توابع پاسخ عمق باربرداری (H) و زبری سطح (Ra) از مدل شبکه عصبی آموزش داده شده استفاده شد. با اجرای الگوریتم بهینه سازی مطابق شکل ۱۵ در تکرار ۵۱ همگرا شده و مقدار بهینه برای پارامترهای ورودی به ترتیب دما: ۴۰ درجه سانتیگراد، مدت زمان: ۰/۹۱ دقیقه، درصد HF: 80/1 و درصد HNO3: 78/1 بدست آمد. برای این مقدار از پارامترهای ورودی، مقدار زبری سطح ۰/۹۱ میکرومتر و عمق باربرداری ۰/۱۵ میلیمتر حاصل می شود.

صفر درصد HNO3 زبری سطح با افزایش دما، افزایش یافته و در ۳۰ درصد HNO3 زبری سطح با افزایش دما، کاهش می یابد و در دمای ۲۰ درجه، ۲۰ درصد HNO3 کمترین زبری سطح را دارد و در ۴۰ درجه، حالت ۳۰ درصد HNO3 کمترین زبری سطح را دارد.

در شکل ۱۳ تاثیر مدت عملیات بر زبری سطح در درصد های مختلف HF در دمای ۲۰ درجه و ۲۰ درصد HNO3 نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش مدت عملیات، در درصدهای مختلف HF زبری سطح مقدار قابل توجهی تغییر نمی کند و با افزایش درصد HF، زبری سطح کاهش می یابد.



شکل ۱۲. تاثیر دمای عملیات بر زبری سطح در درصد های مختلف HNO3 (در مدت ۵ دقیقه و ۶ درصد HF).



شکل ۱۳. تاثیر مدت عملیات بر زبری سطح در درصد های مختلف HF (دمای ۲۰ درجه و ۲۰ درصد HNO3).

(۳) با افزایش درصد HF، عمق باربرداری افزایش می‌یابد اما در دمای کمتر از ۳۰ درجه، عمق باربرداری در حالت ۸ درصد HF، کمتر از حالت ۶ درصد است.

(۴) با افزایش درصد HNO₃، شیب نمودار عمق باربرداری برحسب دمای عملیات، کاهش می‌یابد طوری که تا ۲۰ درصد HNO₃ با افزایش دما عمق باربرداری افزایش می‌یابد. اما در ۳۰ درصد HNO₃ افزایش دما در عمق باربرداری بی‌تاثیر است. بنا براین غلظت HNO₃ و دمای عملیات در تاثیر بر عمق باربرداری باهم اثر متقابل دارند.

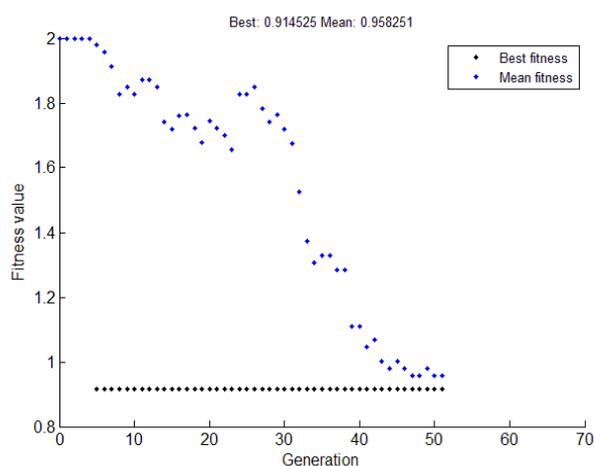
(۵) تاثیر دما بر زبری سطح در درصدهای مختلف HF متفاوت است. در درصدهای پایین با افزایش دما، زبری سطح کاهش می‌یابد اما در درصدهای بالای HF با افزایش دما، زبری سطح افزایش می‌یابد. در حالت کلی دمای عملیات و درصد HF در تاثیر بر زبری سطح با هم اثر متقابل دارند.

(۶) مدت عملیات در زبری سطح تاثیر قابل توجهی ندارد و با افزایش غلظت HF، زبری سطح کاهش می‌یابد. غلظت HNO₃ بر زبری سطح، تاثیر یکنواختی ندارد و در مدت زمانهای مختلف عملیات متفاوت است.

(۷) با بهینه‌سازی فرآیند توسط الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی ارایه شده، مقدار بهینه پارامترهای دما، مدت عملیات و غلظت اسیدها بدست آمد و با استفاده از این مقادیر بهینه، زبری سطح ۰/۹۱ میکرومتر و عمق باربرداری ۰/۱۵ میلی‌متر حاصل می‌شود.

مراجع

1. G.A. El-Awadi, T.A. Enb, S. Abdel-Samad and M.M. El-Halawany, *Chemical Machining for Stainless Steel, Aluminum and Copper Sheets at Different Etchant Conditions*, Arab Journal of Nuclear Science and Applications, 94 (2)(2016)132-139.
2. K.Takahashi, T.Yamazaki, T.Nishijima and H.Shimizu, *Effect of grain size and initial surface condition on glossiness*



شکل ۱۵. همگرایی الگوریتم ژنتیک.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر پارامترهای دما، مدت زمان، درصد اسیدهای نیتریک و هیدروفلوریک بر توابع پاسخ زبری سطح و عمق باربرداری در فرآیند اسیدشویی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V بررسی شد. بدین منظور با طراحی آزمایشات با روش تاگوچی و انجام آنها تاثیر پارامترهای مذکور بر توابع پاسخ با روش شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی و بررسی شد. سپس با روش الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه پارامترهای ورودی برای زبری سطح کمینه و عمق باربرداری مطلوب بدست آمد. نتایج حاصل را بصورت زیر می‌توان جمع بندی کرد:

(۱) شبکه عصبی پیش خور سه لایه ای با الگوریتم آموزش پس انتشار لونبرگ-مارکواریت با ۱۰ گره برای لایه پنهان با خطای ۰/۰۰۱ و ضریب R² برابر ۹۹/۷۵ دارای بهترین عملکرد بوده و برای بررسی تاثیر پارامترها و بهینه‌سازی فرآیند مورد استفاده قرار گرفت.

(۲) با افزایش دما، انرژی بین مولکول‌ها گسترده‌تر شده و تعداد مولکول‌های بیشتری حداقل انرژی سینتیک لازم برای عبور از سد انرژی را دارا هستند، لذا با افزایش دما، تعداد برخوردها زیاده‌تر شده، لذا سرعت اسیدشویی افزایش یافته و عمق باربرداری بیشتر می‌شود.

3. *and whiteness of the pickled titanium surface*, Nippon steel technical report, 85(2002) 71-76.
4. W.C. Say and Y.Y. Tsai, *Surface characterization of cast Ti-6Al-4V in hydrofluoric-nitric pickling Solutions*, Surface and Coatings Technology, 176(2004) 337-343.
5. S.Ban, Y.Iwaya, H.Kono and H.Sato, *Surface modification of titanium by etching in concentrated sulfuric acid*, dental materials 22 (2006) 1115-1120.
6. S. Ho, T. Nakahara, G.D. Hibbard, *Chemical machining of nanocrystalline Ni*, journal of materials processing technology 208 (2008) 507-513.
7. K. Mutombo, and P. Rossouw , *Effect of pickling solution on the surface morphology of Ti6Al4V alloy investment cast*, ITA Conference, San Diego California, San Diego, USA, (2011).
8. E. Vermesse, C. Mabru, L. Arurault, *Surface integrity after pickling and anodization of Ti-6Al-4V titanium alloy*, Applied Surface Science, 285(2013) 629-637.
9. V. Alimirzaloo, *Optimization of the Final Forging Process of the Compressor Blade of an Aerial Motor*, Phd thesis, Amirkabir university of technology, (2011).(In Persian)
10. H. W. Yankee, *Manufacturing processes* , Prentice-Hall, 22 (1979) 288-302.
11. D. J. Brimm, *Unistructure-A New Concept for Light Weight Integrally Stiffened Skin Structure*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 54 (4) (1982) 2-8.
12. Minitab software, V15, user's guide, technical manual (2008).
13. Matlab7.7 software, Manual Help, Mathwork Inc, (2008).