

The Correlation between Microstructure Features and Tensile Properties of Ti-6Al-4V Alloy Using Artificial Neuron Networks

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Fallahi Arezoodar A.*¹ PhD,
Asemani M.¹ MSc

How to cite this article

Fallahi Arezoodar A, Asemani M. The Correlation between Microstructure Features and Tensile Properties of Ti-6Al-4V Alloy Using Artificial Neuron Networks. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(8):2017-2027.

ABSTRACT

The present study investigates the influence of three different microstructure features including volume fraction of α phase (A), thickness of α phase (B), and aspect ratio of primary α (C) on tensile properties of Ti-6Al-4V alloy, by response surface methodology with central composite design (CCD). The experimental data required for the design of experiment (DOE) and analysis of variance (ANOVA) is predicted using the artificial neural network (ANN). First using the experimental data of other researchers, the ANN with two hidden layers by the error propagation algorithm was trained. The main objective of this study is to compare the two feedforward and feedback neural networks in as well as examine the influence of microstructure on the mechanical properties of the Ti-6Al-4V alloy. The results showed that the feedback neural network has higher accuracy than the feedforward neural network to predict the values of yield strength and elongation. Besides, according to ANOVA and response surface method, C, B2, AB2, and A2C factors and A, C, B2, BC, and A2B factors have more significant effects on yield strength and elongation in Ti-6Al-4V alloy, respectively.

Keywords Ti-6Al-4V Alloys; Artificial Neural Network; Error Propagation Algorithm; Central Composite Design; Response Surface Method

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, No. 350, Hafez Ave., Valiasr Square, Tehran, Iran. Postal Code: 1591634311
Phone: +98 (21) 64543453
Fax: -
afallahi@aut.ac.ir

Article History

Received: December 18, 2019

Accepted: May 3, 2020

ePublished: August 15, 2020

CITATION LINKS

[1] Titanium [2] The effect of microstructure on the deformation modes and mechanical properties of Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8 Mo: Part I [3] Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications [4] Microstructure-tensile properties correlation for the Ti-6Al-4V titanium alloy [5] Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti-6Al-4V alloy based on an artificial neural network [6] Prediction of mechanical properties of Ti-6Al-4V using neural network [7] A back-propagation programmed network that simulates response properties of a subset of posterior parietal neurons [8] Application of back-propagation neural network for controlling the front end bending phenomenon in plate rolling [9] Fundamentals of neural networks computational intelligence vol [10] Process and product optimization using designed experiments [11] Modeling the tensile properties in β -processed α/β Ti alloys [12] The physical metallurgy of titanium alloys [13] Property optimization through microstructural control in titanium and aluminum alloys [14] Structure and properties of engineering alloys [15] Titanium: A technical guide [16] The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys [17] Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha + \beta$) titanium alloys [18] Influence of grain size and age-hardening on dislocation pile-ups and tensile fracture for a Ti-Al alloy [19] Modification of alpha morphology in Ti-6Al-4V by thermo mechanical processing

ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص کششی در آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

علیرضا فلاحي آرزودار* PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

مصطفی آسمانی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر، تأثیر سه پارامتر ریزساختاری از جمله کسر حجمی فاز α (A)، ضخامت لایه α (B) و نسبت ابعادی فاز α اولیه (C) بر روی استحکام تسلیم و ازدیاد طول در آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از روش رویه پاسخ با طرح مرکب مرکزی مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مورد نیاز برای طراحی آزمایش و تحلیل واریانس از طریق شبکه عصبی مصنوعی، پیش‌بینی شدند. به این منظور ابتدا با استفاده از داده‌های تجربی سایر محققین شبکه عصبی مصنوعی با دو لایه پنهان توسط الگوریتم پس انتشار خطا تعلیم داده شد. هدف اصلی این مطالعه مقایسه قابلیت پیش‌بینی دو شبکه پیش‌خور و پس‌خور و همچنین بررسی چگونگی تأثیر ویژگی‌های ریزساختاری بر خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V است. نتایج نشان داد که شبکه عصبی پس‌خور نسبت به شبکه پیش‌خور به‌زای پارامترهای ورودی توانایی پیش‌بینی مناسب و دقیق‌تری از مقادیر استحکام تسلیم و ازدیاد طول آلیاژ Ti-6Al-4V دارد. همچنین از تحلیل واریانس و تکنیک رویه پاسخ مشخص شد، عناصر مرتبه اول و دوم C، B²، AB² و A²C به‌علاوه عناصر C، A، B² و BC به ترتیب از موثرترین فاکتورهای تأثیرگذار بر تعریف رفتار استحکام تسلیم و ازدیاد طول آلیاژ Ti-6Al-4V هستند. **کلیدواژه‌ها:** آلیاژ Ti-6Al-4V، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم پس انتشار خطا، طرح مرکب مرکزی، تکنیک رویه پاسخ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴

* نویسنده مسئول: afallahi@aut.ac.ir

مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم براساس عناصر آلیاژی و تأثیر این عناصر بر پایداری فازها در دمای محیط به سه دسته آلیاژی α ، $\alpha+\beta$ و β تقسیم می‌شوند^[1]. آلیاژهای دوفازی $\alpha+\beta$ تیتانیوم می‌تواند با توجه به پروسه تولید اولیه، تنوع زیادی در ریزساختار داشته باشند و خواص مکانیکی این آلیاژها کاملاً وابسته به این تغییرات ریزساختاری است^[2]. از میان آلیاژهای دوفازی، Ti-6Al-4V به‌دلیل خواص مکانیکی مطلوب از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت عملیات حرارتی خوب، چگالی پایین، زیست‌سازگاری خوب، قابلیت کار گرم و مقاومت در برابر خوردگی، به‌طور گسترده در صنایع هوافضا و پزشکی کاربرد دارد^[3]. آلیاژ دوفازی Ti-6Al-4V شامل کسر حجمی فاز α و مقداری فاز β است. خواص مکانیکی این آلیاژ کاملاً تحت تأثیر مورفولوژی، کسر حجمی و توزیع این فازها قرار دارد^[3].

بنابراین به‌منظور بهینه‌نمودن خواص مکانیکی، پیدانمودن ارتباط بین ریزساختار و خواص مکانیکی امری ضروری به نظر می‌رسد. مطالعات انجام‌شده در تأثیر عوامل موثر بر خواص مکانیکی را می‌توان به‌طور کلی به دو عامل پارامترهای فرآیند و ویژگی‌های ریزساختاری تقسیم نمود. علی‌رغم اهمیت موضوع، مطالعات انجام‌شده در زمینه ارتباط ویژگی‌های ریزساختاری نسبت به ارتباط پارامترهای فرآیند تولید با خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V، به‌مراتب کمتر و محدودتر است. از تکنیک‌های مورد استفاده جهت ایجاد ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی اشاره نمود. شی و همکاران^[4]، به ایجاد ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختار لایه‌لایه آلیاژ Ti-6Al-4V و خواص مکانیکی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. آنها ضخامت لایه α ، اندازه کلونی و اندازه دانه‌های β را به‌عنوان ویژگی‌های ریزساختاری در نظر گرفتند. نتایج مطالعه نشان داد که استحکام تسلیم با افزایش ضخامت لایه α ، کاهش می‌یابد. همچنین استحکام تسلیم و ازدیاد طول هر دو با کاهش اندازه دانه‌های β و اندازه کلونی، افزایش می‌یابند. سان و همکاران^[5]، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تأثیر ویژگی‌های ریزساختاری بر خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با استفاده از داده‌های تجربی حاصل از فرآیند فورج و عملیات حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها کسر حجمی فاز β ، ضخامت فاز α و نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک فاز α اولیه را به‌عنوان ویژگی‌های ریزساختاری انتخاب کردند. آنها نشان دادند، نسبت ابعادی فاز α اولیه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر استحکام تسلیم و ازدیاد طول ندارد. از سوی دیگر، با افزایش ضخامت لایه‌های α ، به‌ترتیب استحکام تسلیم و ازدیاد طول کاهش می‌یابند. به‌علاوه با افزایش کسر حجمی فاز α به‌ترتیب کاهش ازدیاد طول و افزایش استحکام تسلیم را خواهیم داشت. دتاک و همکاران^[6]، از شبکه عصبی مصنوعی مورد تعلیم با داده‌های حاصل از تحقیق سایرین، ارتباط بین ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V و خواص مکانیکی این آلیاژ (سختی سنجی راکول، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول) را مورد بررسی قرار دادند.

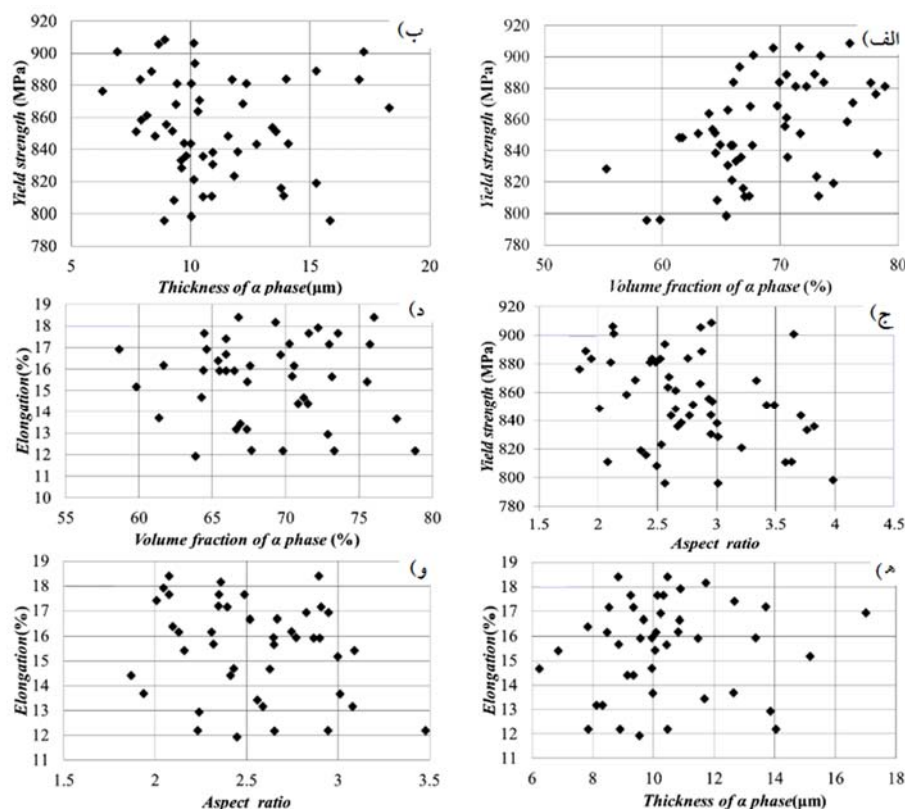
در این مقاله تأثیر ویژگی‌های ریزساختاری بر خواص مکانیکی توسط تکنیک طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. انجام و کنترل آزمایش‌ها به‌صورت تجربی و آزمایشگاهی در سطوح مختلف به‌علت تقابل اثر داخلی بین ویژگی‌های ریزساختاری بسیار مشکل و حتی می‌توان گفت غیرممکن است. این دلیل را می‌توان به‌عنوان عامل اصلی عدم استفاده از این تکنیک (طراحی آزمایش) در بررسی تأثیر ویژگی‌های ریزساختاری مواد بر خواص کششی دانست. با توجه به این موضوع و همچنین جهت حذف هزینه‌های آزمایش، در این مقاله داده‌ها از مطالعه سان و همکاران^[5]، اتخاذ و به‌منظور بررسی دقیق‌تر نسبت به این مطالعه، از مدل رویه پاسخ مرتبه دوم استفاده شد. این در حالی است که در سایر کارهای تحقیقاتی (خصوصاً تحقیقات مبتنی بر آزمون تجربی) بررسی تأثیر

ضخامت لایه α و نسبت ابعادی فاز α اولیه به‌عنوان متغیرهای ورودی و استحکام تسلیم و ازدیاد طول به‌عنوان متغیر پاسخ در طراحی آزمایش لحاظ شد. جهت بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی در تکنیک طراحی آزمایش، نیاز به یک سری آزمایش‌ها در سطوح مختلف خواهیم بود. به‌منظور حذف هزینه‌های آزمایش و همچنین به‌دلیل عدم کنترل در انجام آزمایش‌ها در سطوح مختلف، پروسه تحلیل و بررسی تأثیر فاکتورهای ریزساختاری بر خواص مکانیکی در آلیاژ Ti-6Al-4V با داده‌های اتخاذ شده از مطالعه سان و همکاران^[5] صورت گرفت. نمودار ۱ داده‌های مربوط به متغیر پاسخ (استحکام تسلیم و ازدیاد طول) و به‌ازای ویژگی‌های ریزساختاری (کسر حجمی فاز α ، ضخامت لایه α و نسبت ابعادی فاز α اولیه) را نشان می‌دهد. نمودارهای ۱-الف و ۱-ب ج مربوط به استحکام تسلیم و نمودارهای ۱-د و ۱-و مربوط به ازدیاد طول و به‌ازای فاکتورهای ریزساختاری است. با توجه به نمودار ۱، به‌علت پراکندگی بالای داده‌ها و عدم مشاهده روند خطی و یا مشخصی در داده‌ها امکان برقراری ارتباط با روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. شبکه‌های عصبی به‌عنوان ابزاری جهت حل مسایل غیرخطی و پیچیده کاربرد دارد. به همین جهت برای برقراری ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. بعد از ایجاد ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی، داده‌های لازم برای طراحی آزمایش در سطوح مختلف توسط شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی شد.

ویژگی‌های ریزساختاری بر روی خواص کششی به‌صورت تک مؤلفه (بدون در نظر گرفتن تقابل اثر بین ویژگی‌ها) و یا در صورت در نظر گرفتن تقابل اثر (در مرجع^[11])، به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است. در این صورت مدل‌سازی به این شکل باعث کاهش دقت در بررسی رفتار کششی مواد نسبت به ویژگی‌های ساختاری می‌شود. داده‌های لازم برای تحلیل واریانس و طراحی آزمایش به‌واسطه ایجاد ارتباط بین داده‌های حاصل از مرجع^[5]، پیش‌بینی شد. ایجاد ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی به‌دلیل غیرخطی بودن و همچنین تقابل اثر بین ویژگی‌های ریزساختاری، با روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. در این بررسی جهت برقراری ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V از شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم تعلیم پس انتشار خطا استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش با سایر منابع صحت‌سنجی و همچنین با نتایج حاصل از مرجع^[5] مقایسه و برتری تکنیک در نظر گرفته شده نشان داده شد. به‌علاوه، قابلیت دو شبکه عصبی پیش‌خور و پس‌خور در پیش‌بینی خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V مورد ارزیابی و واکاوی قرار گرفت.

روش پژوهش

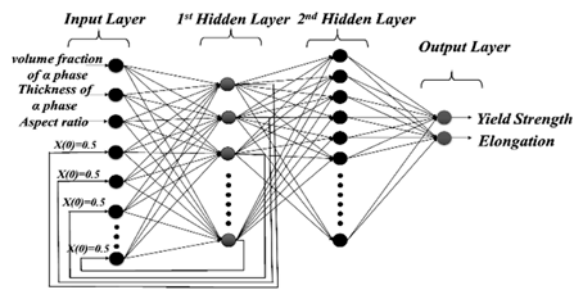
بررسی تأثیر ویژگی‌های ریزساختاری بر خواص مکانیکی با استفاده از روش طراحی آزمایش، تکنیک رویه پاسخ و طرح مرکب مرکزی صورت گرفت. فاکتورهای ریزساختاری از جمله کسر حجمی فاز α ،



نمودار ۱) ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی در آلیاژ Ti-6Al-4V^[5]

مدل شبکه عصبی

ضخامت لایه α ، نسبت ابعادی α_p و کسر حجمی فاز α به عنوان عنصرهای ورودی و استحکام تسلیم و ازدیاد طول آلیاژ Ti-6Al-4V به عنوان فاکتورهای خروجی تعیین شد. شکل ۲ به طور شماتیک شبکه طراحی شده جهت تخمین خواص کششی با توجه به پارامترهای ورودی در آلیاژ Ti-6Al-4V را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود خروجی نرون‌های لایه پنهان اول به عنوان پس‌خور و هر خروجی به یک نرون در لایه ورودی وصل شده است، بنابراین تعداد نرون‌ها در لایه ورودی شامل تعداد پارامترهای ورودی به علاوه تعداد نرون لایه پنهان اول است.



شکل ۲) شماتیک شبکه عصبی پس‌خور

تعلیم شبکه

شبکه عصبی مصنوعی دو نوع داده آزمون و تعلیم نیاز دارد؛ این داده‌ها از مطالعه سان و همکاران [5] اتخاذ شد. از مجموع ۵۴ داده ۸۰٪ آن در تعلیم شبکه و مابقی به عنوان صحت‌سنجی و آزمون شبکه استفاده شد. قبل از تعلیم شبکه باید داده‌ها در بازه صفر تا ۱/۹ هنجارسازی شوند. هنجارسازی ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی توسط معادله ۱ صورت گرفت.

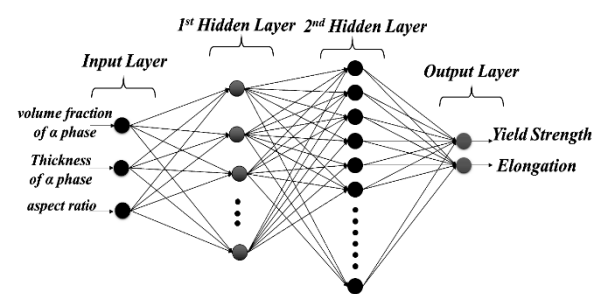
$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

که در آن $X_{\min}$ و $X_{\max}$ به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه متغیر X و X' مقدار نرمال شده متناظر با متغیر X است. از تابع نرم تک قطبی (سیگموئید) به عنوان تابع انتقال در لایه‌های پنهان اول، پنهان دوم و خروجی در هر دو شبکه عصبی استفاده شد و همچنین مقادیر اولیه هر یک از بازخوردها در شبکه پس‌خور ۰/۵ در نظر گرفته شد. در حفاصل لایه ورودی و لایه خروجی لایه یا لایه‌های پنهان قرار دارد. تعداد نرون‌های لایه پنهان با توجه به پیچیدگی مساله و میزان خطای پیش‌بینی مورد انتظار از شبکه تعیین می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱ و ۲، به منظور افزایش ظرفیت شبکه ANN-BP از دولایه پنهان جهت ایجاد ارتباط بین متغیرهای ریزساختاری آلیاژ Ti-6Al-4V و خواص کششی این آلیاژ استفاده شده است. تعداد نرون‌های لایه‌های پنهان تأثیر به‌سزایی بر دقت پیش‌بینی شبکه دارد. در صورت ناکافی بودن تعداد نرون‌ها در لایه پنهان، شبکه توانایی پیش‌بینی مناسبی از مساله را نخواهد داشت. از سوی دیگر، نرون اضافی در لایه پنهان باعث کندی تعلیم شبکه و عدم همگرایی آن می‌شود. تعداد نرون‌های بهینه لایه پنهان اول و دوم از طریق سعی و خطا و بر

در حال حاضر مدل‌های مختلفی از شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است. شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم تعلیم پس انتشار خطا (ANN-BP) از پرکاربردترین شبکه‌های عصبی مورد استفاده برای اهداف مهندسی است [7,8]. شبکه ANN-BP با توجه به داشتن یک یا چندلایه پنهان و توانایی مدل‌کردن هر معادله غیرخطی، برای کاربردهای مهندسی مناسب و همچنین این شبکه نسبت به سایر مدل‌ها کمتر با مشکل کمینه موضعی مواجه است [4]. دو شبکه عصبی پیش‌خور و پس‌خور جهت پیش‌بینی و ایجاد ارتباط بین ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V با الگوریتم پس انتشار خطا تعلیم یافتند و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. به علاوه فرآیند طراحی و تعلیم شبکه عصبی از طریق کدنویسی در بسته نرم‌افزاری MATLAB R2013B صورت گرفت.

شبکه پیش‌خور

شبکه عصبی پیش‌خور شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و شامل یک یا چندلایه پنهان است. تعداد نرون‌های لایه ورودی توسط تعداد پارامترهای ورودی و تعداد نرون‌های لایه خروجی توسط تعداد پارامترهای خروجی تعیین می‌شود. ویژگی‌های ریزساختاری آلیاژ Ti-6Al-4V به عنوان عنصرهای ورودی و خواص مکانیکی این آلیاژ به عنوان فاکتورهای خروجی لحاظ شد. بنابراین سه نرون در ورودی و دو نرون در خروجی برای شبکه طراحی شده، در نظر گرفته شد. شکل ۱ به طور شماتیک شبکه پیش‌خور طراحی شده جهت تخمین خواص کششی با توجه به پارامترهای ورودی در آلیاژ Ti-6Al-4V را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ ویژگی‌های ریزساختاری شامل کسر حجمی فاز α ، ضخامت لایه α و نسبت ابعادی فاز α اولیه به عنوان ورودی شبکه و استحکام تسلیم و ازدیاد طول به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد.



شکل ۱) شماتیک شبکه عصبی پیش‌خور

شبکه پس‌خور

تفاوت بین شبکه‌های پس‌خور با شبکه‌های پیش‌خور این است که در شبکه‌های پس‌خور، حداقل یک سیگنال برگشتی از یک نرون به همان نرون یا نرون‌های همان لایه و یا لایه قبل وجود دارد [9]. تعداد نرون‌های لایه ورودی توسط تعداد پارامترهای ورودی و تعداد نرون‌های لایه خروجی توسط تعداد پارامترهای خروجی تعیین می‌شود. در این بخش ویژگی‌های ریزساختاری

است. جدول ۲ ارتباط بین مقادیر گذشته و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. در این جدول $X_{\max}$ و $X_{\min}$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر متغیر ورودی است. جدول ۳ تعداد آزمایش‌های طرح مرکب مرکزی و سطوح عاملی گذشته مربوط به پارامترهای ورودی و همچنین نتایج حاصل از شبکه عصبی برای متغیر خروجی را نشان می‌دهد. فرآیند طراحی آزمایش با استفاده از نتایج پیش‌بینی‌شده از شبکه عصبی و با نرم‌افزار طراحی آزمایش Design-Expert 7 صورت گرفت.

جدول ۱) مقادیر پارامترهای ورودی و سطوح عاملی آنها

متغیر ورودی	کسر حجمی فاز α (%)	ضخامت لایه α (μm)	نسبت ابعادی α_p
نماد	A	B	C
$-\lambda$	۵۸/۶۰	۶/۲۰	۱/۸۰
سطوح	۶۲/۷۰	۸/۴۰	۲/۱۵
	۶۸/۷۰	۱۱/۶۰	۲/۶۰
	۷۴/۷۰	۱۴/۸۰	۳/۱۴
λ	۷۸/۸۰	۱۷/۰۰	۳/۵۰

جدول ۲) ارتباط بین مقادیر واقعی و گذشته متغیرهای ورودی

مقادیر واقعی متغیر ورودی	کد
$X_{\min}$	$-\lambda$
$((X_{\max}+X_{\min})/2)-((X_{\max}-X_{\min})/2\alpha)$	-۱
$(X_{\max}+X_{\min})/2$	۰
$((X_{\max}+X_{\min})/2)+((X_{\max}-X_{\min})/2\alpha)$	+۱
$X_{\max}$	$+\lambda$

جدول ۳) مقادیر گذشته از سه پارامتر ریزساختاری و مقادیر پیش‌بینی‌شده استحکام تسلیم و ازدیاد طول توسط شبکه عصبی

شماره آزمایش	ازدیاد طول (%)	استحکام تسلیم (MPa)	نسبت ابعادی α_p	ضخامت فاز α	کسر حجمی فاز α
۱	۱۵/۳۴	۷۹۶/۷۴	۱	-۱	-۱
۲	۱۶/۵۵	۸۵۷/۳۰	-۱	-۱	۱
۳	۱۴/۶۸	۹۳۵/۱۸	-۱/۶۸	۰	۰
۴	۱۱/۹۵	۸۱۶/۳۹	-۱	۱	۱
۵	۱۲/۰۷	۹۳۳/۴۰	۱	-۱	۱
۶	۱۸/۴۰	۸۲۵/۸۲	-۱	-۱	-۱
۷	۱۱/۹۳	۸۱۳/۹۰	۰	۰	۱/۶۸
۸	۱۲/۹۰	۹۴۰/۰۰	۱	۱	-۱
۹	۱۵/۳۰	۸۵۱/۷۶	۰	۰	۰
۱۰	۱۵/۳۰	۸۵۱/۷۶	۰	۰	۰
۱۱	۱۵/۳۰	۸۵۱/۷۶	۰	۰	۰
۱۲	۱۲/۴۲	۸۰۰/۰۸	۱/۶۸	۰	۰
۱۳	۱۵/۳۰	۸۵۱/۷۶	۰	۰	۰
۱۴	۱۵/۳۰	۸۵۱/۷۶	۰	۰	۰
۱۵	۱۱/۹۸	۷۹۶/۱۴	-۱	۱	-۱
۱۶	۱۲/۶۰	۹۳۸/۹۹	۰	-۱/۶۸	۰
۱۷	۱۵/۳۰	۸۵۱/۷۶	۰	۰	۰
۱۸	۱۱/۹۳	۸۹۰/۲۸	۱	۱	۱
۱۹	۱۷/۵۷	۸۹۸/۵۴	۰	۰	-۱/۶۸
۲۰	۱۲/۳۲	۹۳۸/۱۷	۰	۱/۶۸	۰

مبنای مجذور مربع میانگین خطا (RMSE) انتخاب شد. بر این اساس، ۱۴ نرون برای لایه پنهان اول و ۲۱ نرون برای لایه پنهان دوم برای هر دو شبکه در نظر گرفته شد. با توجه به شکل‌های ۱ و ۲، هر یک از نرون‌ها در هر لایه توسط وزن مشخصی به کلیه نرون‌های لایه بعدی متصل می‌شود. عبارت تعلیم در بحث شبکه‌های عصبی به اصلاح این وزن‌ها اشاره دارد.

به‌طور کلی ابتدا شبکه با وزن‌های کوچک و کاملاً تصادفی طراحی و سپس داده‌های تعلیم، به‌منظور جلوگیری از کمینه موضعی و بهبود در همگرایی، به‌صورت کاملاً تصادفی به شبکه داده می‌شود. خروجی حاصل از شبکه با مقادیر هدف (نتایج آزمایشگاهی) مقایسه و بعد از محاسبه میزان انحراف، در صورت تجاوز از مقدار مطلوب، خطا به لایه‌های قبلی تا لایه ورودی انتشار و وزن هر لایه اصلاح می‌شود. این فرآیند تا زمانی که خطای محاسبه‌شده در خروجی از خطای مطلوب تجاوز کند، ادامه خواهد داشت. دقت شبکه در پیش‌بینی نتایج در خروجی توسط مجذور میانگین مربع خطا و توسط معادله ۲ تعیین می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^k (d_{ij} - Z_{ij})^2} \quad (2)$$

که در آن p و k به ترتیب تعداد نمونه‌های تعلیم و تعداد متغیر خروجی (خواص مکانیکی) و همچنین متغیر d مقدار حاصل از شبکه، متناظر با مقدار تجربی Z و به‌ازای p مین داده است. در این کار خطای مطلوب در خروجی شبکه ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد. بعد از تعلیم شبکه، ۲۰٪ از داده‌های حاصل از نتایج تجربی به‌عنوان داده آزمون و صحت‌سنجی نتایج به شبکه داده شد. به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از شبکه با نتایج تجربی، این داده‌ها با استفاده از معادله ۳ غیرنرمال شد؛ که در آن $X_{\min}$ و $X_{\max}$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر متغیر X و X' مقدار نرمال‌شده متناظر با متغیر X است.

$$X = X' \left(\frac{1}{0.5 X_{\max} - X_{\min}} \right) + 0.5 X_{\min} \quad (3)$$

طراحی آزمایش

تکنیک رویه پاسخ

روش رویه پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که جهت طراحی آزمایش و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند به‌کار گرفته می‌شود [10]. از روش رویه پاسخ با طرح مرکب مرکزی (CCD) جهت بررسی تأثیر ویژگی‌های ریزساختاری بر روی استحکام تسلیم و ازدیاد طول آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده شد. داده‌های مورد استفاده در تکنیک رویه پاسخ توسط شبکه عصبی تعلیم‌یافته از داده‌های تجربی تحقیق دیگران، پیش‌بینی شد. در طرح مرکب مرکزی ویژگی‌های ریزساختاری به‌عنوان متغیر ورودی و خواص مکانیکی به‌عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شد. جدول ۱ متغیرهای ورودی و سطوح گذشته در طراحی آزمایش و مقادیر مربوط به هر یک از این سطوح را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، سطوح متغیرهای ورودی برای نقاط فاکتوریل به‌صورت ۱ و برای نقاط مرکزی صفر و نقاط محوری با $\pm \lambda$ کدگذاری شده

نتایج و بحث

مدل شبکه عصبی

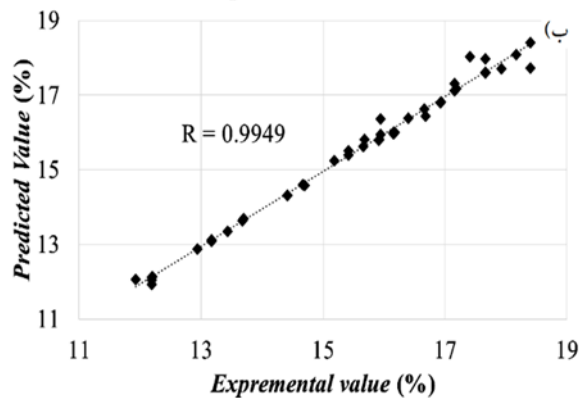
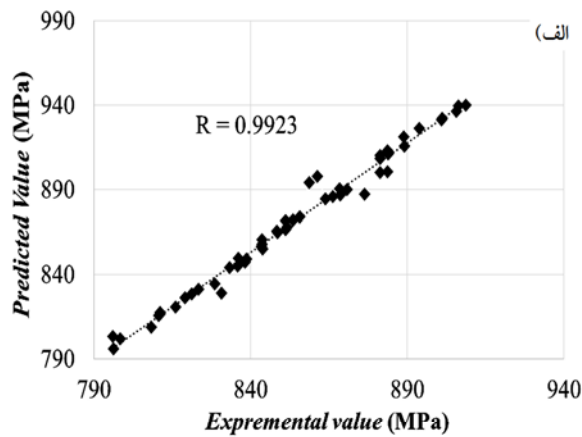
ارزیابی عملکرد آماری استاندارد سیستم شامل نرخ خطای متوسط (AER) و ضریب همبستگی (R) است. معادلات مربوط به نرخ خطای متوسط و ضریب همبستگی به صورت معادلات ۴ و ۵ بیان می‌شوند:

$$AER = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|E_i - P_i|}{E_i} \quad (4)$$

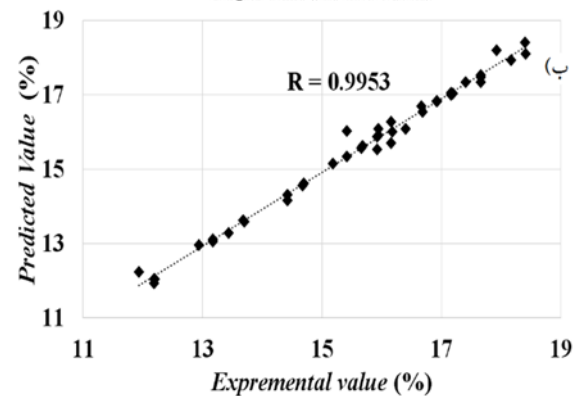
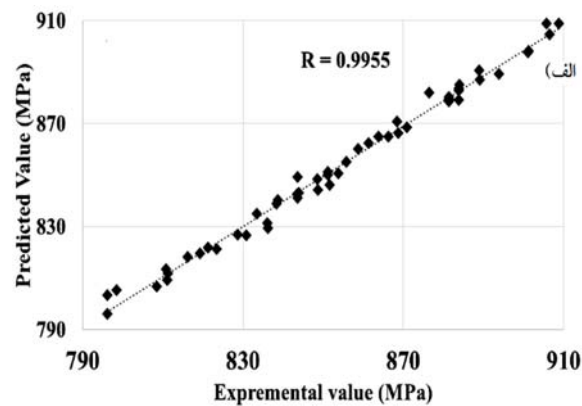
$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (5)$$

که E و P در معادله ۴ و ۵ به ترتیب، داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از شبکه عصبی مصنوعی است. در این دو معادله $\bar{E}$ و $\bar{P}$ به ترتیب میانگین E و P را بیان می‌کند. اساساً وقتی AER به سمت صفر و R به سمت ۱ میل کند، نشان‌دهنده تطابق بالا بین نتایج قابل پیش‌بینی از شبکه عصبی با نتایج تجربی و در نتیجه نشان از قابل قبول و مطلوب بودن مدل شبکه عصبی است. مقایسه بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبکه عصبی پیش‌خور برای داده‌های تعلیم جهت ایجاد ارتباط بین ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V به صورت نمودار ۲ است. ضریب همبستگی برای داده‌ها با توجه به نمودار ۲ و معادله ۵ بیشتر از ۰/۹۵ حاصل گشت. با توجه به نمودار ۲ به خوبی ارتباط و تطابق بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده از شبکه عصبی پیش‌خور برای داده‌های تعلیم قابل مشاهده است.

مقایسه بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبکه عصبی پیش‌خور برای داده‌های تعلیم جهت ایجاد ارتباط بین ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V، در نمودار ۳ نشان داده شده است. ضریب همبستگی برای داده‌های حاصل از شبکه عصبی پیش‌خور با نتایج تجربی با توجه به نمودار ۳ و معادله ۵ بیشتر از ۰/۹۵ حاصل گشت. با توجه به نمودار ۳ به خوبی ارتباط و تطابق بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده از شبکه عصبی پیش‌خور برای داده‌های تعلیم قابل مشاهده است؛ بنابراین، هر دو شبکه پیش‌خور و پیش‌خور در ایجاد ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی در داده‌های تعلیم از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. قابلیت پیش‌بینی دو شبکه پیش‌خور و پس‌خور با استفاده از داده‌های آزمون مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. داده‌های آزمون، داده‌هایی هستند که قبلاً به هیچ یک از شبکه‌ها تعلیم داده نشده‌اند. جدول ۴ مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده از داده‌های آزمون توسط دو شبکه عصبی پیش‌خور و پس‌خور و همچنین میزان خطای نسبی مطلق مقادیر پیش‌بینی شده از این دو شبکه نسبت به نتایج تجربی را نشان می‌دهد.



نمودار ۲) ارتباط بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده از شبکه پس‌خور به‌ازای داده‌های تعلیم؛ الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول



نمودار ۳) ارتباط بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده از شبکه پیش‌خور به‌ازای داده‌های تعلیم؛ الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول

استحکام تسلیم و ازدیاد طول آلیاژ Ti-6Al-4V مدلی موثر است. درصد تأثیر فاکتورهای موثر بر استحکام تسلیم و ازدیاد طول به‌ترتیب در نمودارهای α -۴ و α -۴ ب نشان داده شده است. پارامترهایی که مقدار p آنها در جدول‌های ۵ و ۶ بزرگ‌تر از ۰/۰۵ هستند، از عوامل غیر موثر و با در نظر گرفتن اصل سلسله مراتبی از جدول واریانس حذف شدند. با توجه به نمودار ۴ و جدول‌های ۵ و ۶، کسر حجمی فاز α (A) و نسبت ابعادی α_p (C) از عوامل تأثیرگذار بر استحکام تسلیم و ازدیاد طول هستند؛ اما تأثیر ضخامت لایه α (B) بر استحکام تسلیم و ازدیاد طول به‌صورت مرتبه دوم است. نمودارهای ۵ و ۶ رویه پاسخ مربوط به استحکام تسلیم و ازدیاد طول را به‌ازای متغیرهای ورودی نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۴، شبکه FFNN برخلاف استحکام تسلیم، توانایی پیش‌بینی مناسبی از ازدیاد طول ندارد؛ برعکس، شبکه عصبی FBNN، استحکام تسلیم و ازدیاد طول را نسبت به شبکه FFNN با دقت بالاتری پیش‌بینی می‌کند؛ بنابراین با توجه به دقت بالای شبکه پس‌خور در پیش‌بینی خواص مکانیکی به‌ازای ویژگی‌های ریزساختاری، نتایج لازم برای طراحی آزمایش توسط این شبکه پیش‌بینی شد (جدول ۳).

تحلیل خواص کششی

جدول تحلیل واریانس مربوط به استحکام تسلیم و ازدیاد طول آلیاژ Ti-6Al-4V با توجه به نتایج حاصل از شبکه عصبی و ویژگی‌های ریزساختاری به‌صورت جدول‌های ۵ و ۶ است. با توجه به جدول‌های ۵ و ۶، مدل در نظر گرفته شده جهت پیش‌بینی رفتار

جدول ۴) مقایسه نتایج تجربی با نتایج پیش‌بینی شده از شبکه عصبی

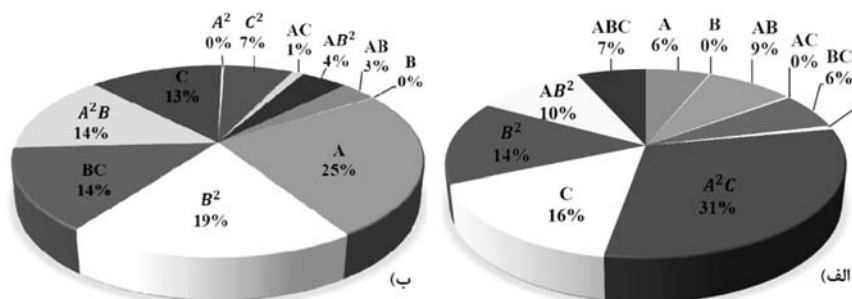
پارامتر					مقدار
ازدیاد طول (%)	میزان خطا	نتایج تجربی در مرجع [۱۵]	مقادیر پیش‌بینی شده شبکه	میزان خطا (%)	۲/۲۲ و ۳۲/۹۱
					۹/۵۵ و ۵/۵۲
					۱۸/۰۰ و ۳۲/۹۱
استحکام تسلیم (MPa)	میزان خطا (%)	نتایج تجربی در مرجع [۱۵]	مقادیر پیش‌بینی شده شبکه	میزان خطا (%)	۱۷/۵۰ و ۱۸/۴۰
					۱۶/۹۸ و ۱۴/۶۴
					۱۶/۹۸ و ۱۴/۶۴
نسبت ابعادی	میزان خطا (%)	نتایج تجربی در مرجع [۱۵]	مقادیر پیش‌بینی شده شبکه	میزان خطا (%)	۱/۲۰ و ۰/۰۳
					۱/۲۰ و ۰/۰۳
					۱/۲۰ و ۰/۰۳
ضخامت فاز α (μm)	میزان خطا (%)	نتایج تجربی در مرجع [۱۵]	مقادیر پیش‌بینی شده شبکه	میزان خطا (%)	۱۸۹/۰۰ و ۸۹۰/۰۰
					۱۸۹/۰۰ و ۸۹۰/۰۰
					۱۸۹/۰۰ و ۸۹۰/۰۰
کسر حجمی فاز α (%)	میزان خطا (%)	نتایج تجربی در مرجع [۱۵]	مقادیر پیش‌بینی شده شبکه	میزان خطا (%)	۲/۰۸ و ۱/۸۹
					۲/۰۸ و ۱/۸۹
					۲/۰۸ و ۱/۸۹

جدول ۵) تحلیل واریانس استحکام تسلیم به‌ازای ویژگی‌های ریزساختاری آلیاژ Ti-6Al-4V

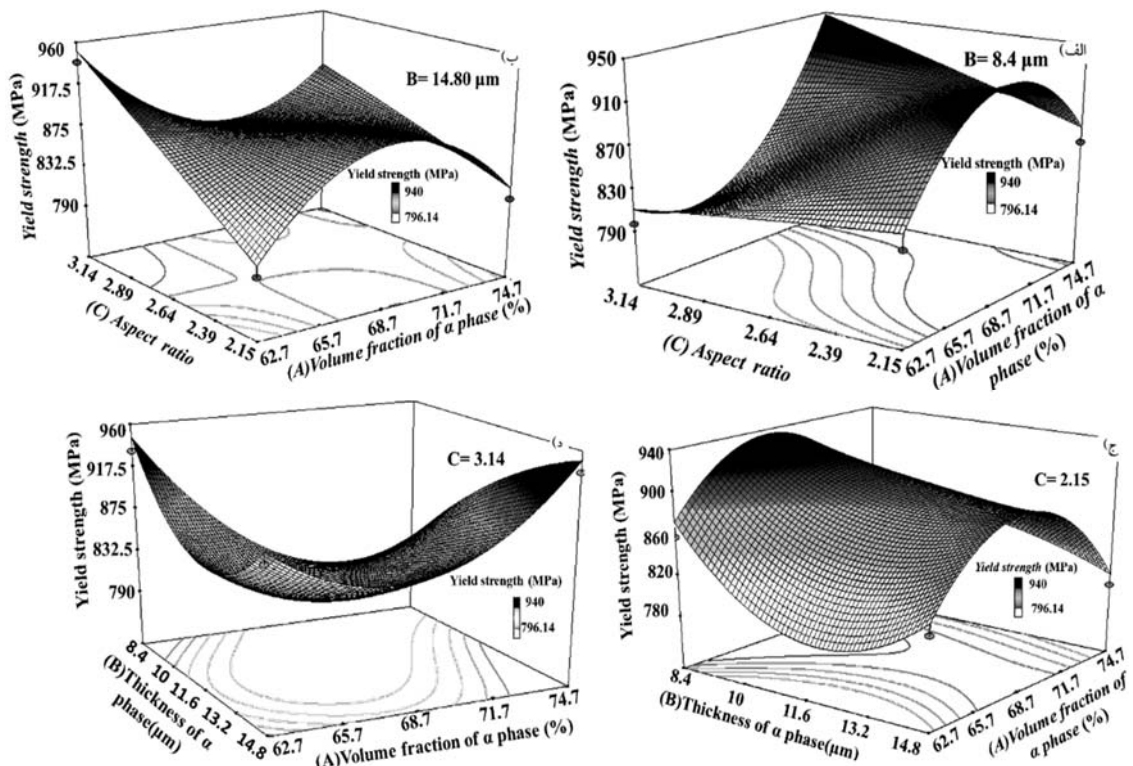
p-value Prob > F	F-Value	Mean Square	DF	Sum of Squares	Source
۰/۰۰۶۰	۷/۷۰	۳۸۰۰/۰۲	۱۲	۴۵۶۰۰/۳۵	Model
۰/۰۳۰۹	۷/۲۶	۳۵۸۲/۳۳	۱	۳۵۸۲/۳۴	A
۰/۷۴۱۷	۰/۱۳	۵۸/۰۳	۱	۵۸/۰۳	B
۰/۰۰۳۶	۱۸/۵۰	۹۱۲۵/۸۵	۱	۹۱۲۵/۸۵	C
۰/۰۱۶۲	۹/۹۰	۴۸۸۰/۸۳	۱	۴۸۸۰/۸۳	AB
۰/۵۹۲۶	۰/۳۱	۱۵۴/۹۴	۱	۱۵۴/۹۵	AC
۰/۰۲۹۹	۷/۳۹	۳۶۴۳/۳۴	۱	۳۶۴۳/۳۴	BC
۰/۳۹۴۱	۰/۸۲	۴۰۶/۵۶	۱	۴۰۶/۵۶	A ²
۰/۰۰۴۸	۱۶/۵۷	۸۱۶۸/۴۷	۱	۸۱۶۸/۴۷	B ²
۰/۰۲۷۰	۷/۷۷	۳۸۳۴/۸۷	۱	۳۸۳۴/۸۷	ABC
۰/۰۰۰۵	۳۶/۰۶	۱۷۷۸۵/۴۰	۱	۱۷۷۸۵/۴۰	A ² C
۰/۰۱۰۲	۱۲/۱۳	۵۹۸۵/۲۳	۱	۵۹۸۵/۲۳	AB ²
-	-	۴۹۳/۲۳	۷	۳۴۵۲/۶۲	Residual
-	-	۱۷۲۶/۳۱	۲	۳۴۵۲/۶۲	Lack of Fit
-	-	۰	۵	۰	Pure Error
-	-	-	۱۹	۴۹۰۵۲/۹۷	Cor Total

جدول ۶) تحلیل واریانس ازدیاد طول به‌ازای ویژگی‌های ریزساختاری آلیاژ Ti-6Al-4V

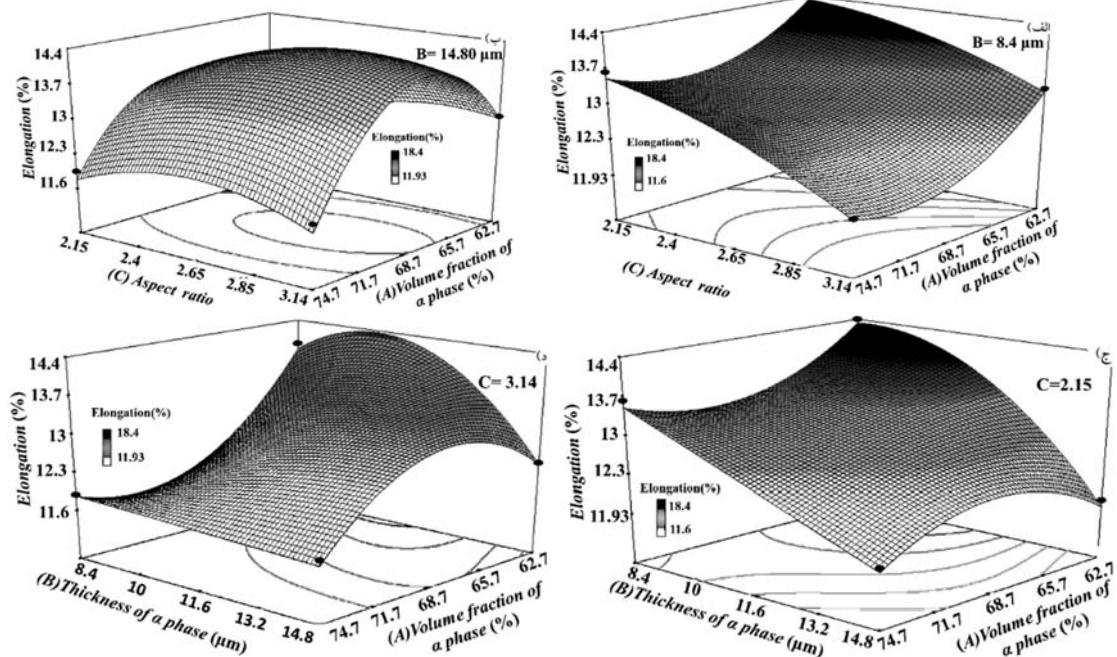
F Prob > F	Mean Value	Square	DF	Sum of Squares	Source
<۰/۰۰۰۱	۸۷/۳۱	۷/۱۳	۱۱	۷۸/۴۸	Model
<۰/۰۰۰۱	۱۹۴/۴۸	۱۵/۸۹	۱	۱۵/۸۹	A
۰/۵۱۹۱	۰/۴۵	۰/۰۴	۱	۰/۰۴	B
<۰/۰۰۰۱	۹۷/۵۶	۷/۹۷	۱	۷/۹۷	C
۰/۰۰۰۹	۲۶/۳۴	۲/۱۵	۱	۲/۱۵	AB
۰/۰۱۸۶	۸/۶۷	۰/۷۱	۱	۰/۷۱	AC
<۰/۰۰۰۱	۱۰۸/۰۴	۸/۸۳	۱	۸/۸۳	BC
۰/۱۸۴۳	۲/۱۱	۰/۱۷	۱	۰/۱۷	A ²
<۰/۰۰۰۱	۱۴۸/۹۰	۱۲/۱۷	۱	۱۲/۱۷	B ²
۰/۰۰۰۱	۵۰/۲۵	۴/۱۱	۱	۴/۱۱	C ²
<۰/۰۰۰۱	۱۰۶/۵۵	۸/۷۱	۱	۸/۷۱	A ² B
<۰/۰۰۰۴	۳۳/۶۶	۲/۷۵	۱	۲/۷۵	AB ²
-	-	۰/۰۸	۸	۰/۶۵	Residual
-	-	۰/۲۲	۳	۰/۶۵	Lack of Fit
-	-	۰	۵	-	Pure Error
-	-	-	۱۹	۷۹/۱۳	Cor Total



نمودار ۴) درصد تأثیر فاکتورهای معنی‌دار در خواص مکانیکی: (الف) استحکام تسلیم، (ب) ازدیاد طول



نمودار ۵) رویه پاسخ استحکام تسلیم به‌ازای پارامترهای ورودی



نمودار ۶) رویه پاسخ ازدیاد طول به‌ازای پارامترهای ورودی

تمامی لایه‌های α موجود در یک کلونی دارای جهت‌گیری یکسانی هستند؛ لغزش در داخل کلونی از فاز β عبور کرده و با رسیدن به مرز کلونی‌ها متوقف می‌شود [2, 16]. به‌علاوه کلونی‌های α مجاور با جهت‌گیری‌های مختلف، مانع اشاعه ترک می‌شوند [16]. بنابراین شکل‌پذیری متناسب با افزایش کسر حجمی فاز α اولیه، در ابتدا با کاهش طول لغزش (کوچک‌تر شدن اندازه کلونی)، افزایش می‌یابد اما بعد از رسیدن به مقدار بیشینه خود به‌دلیل تغییر مکانیسم شکست به مکانیسم شکست بین‌دانه‌ای، کاهش می‌یابد [1, 16, 17].

براساس نتایج لوجریتم [17] با افزایش کسر حجمی فاز α_p (در مقادیر کمتر از ۲۰٪) استحکام تسلیم افزایش می‌یابد. لوجریتم و همکاران [1]، گزارش کردند با افزایش کسر حجمی فاز α_p ، عناصر آلیاژی خصوصاً عناصر پایدارکننده فاز β در زمینه لایه‌لایه افزایش و افزایش این عناصر باعث آشفته‌گی شبکه و کاهش استحکام اتصالات شبکه می‌شود. بنابراین زمانی که کسر حجمی α_p کم باشد (کمتر از ۲۰٪)، اندازه کلونی α استحکام تسلیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و برعکس زمانی که کسر حجمی α_p قابل توجه باشد، این اثر ذرات عناصر آلیاژی است که بر رفتار استحکام تسلیم غالب است [1]. بنابراین با توجه به نتایج لوجریتم و همکاران [1] و لوجریتم [17] در قسمتی از نمودار که افزایش استحکام تسلیم دیده می‌شود (نمودار ۵)، اثر اندازه کلونی α حاکم و برعکس قسمتی از نمودار که در آن استحکام تسلیم کاهش می‌یابد، اثر عناصر آلیاژی حاکم است.

این در حالی است که شی و همکاران [4] گزارش کردند با افزایش کسر حجمی فاز α ، اندازه کلونی و اندازه دانه β ازدیاد طول در آلیاژ Ti-6Al-4V کاهش می‌یابد و همچنین سان و همکاران [5] نیز بیان کردند زمانی که کسر حجمی فاز α از مقدار ۵۵/۲۶ به ۷۸/۸۳٪ افزایش یابد، تقریباً مقدار تنش تسلیم ۶۰ مگاپاسکال

با توجه به نمودارهای ۵ و ۶، استحکام تسلیم و ازدیاد طول با افزایش کسر حجمی فاز α تا رسیدن به مقدار بیشینه خود روندی صعودی دارند؛ اما بعد از آن، متناسب با افزایش کسر حجمی فاز α ، مقادیر استحکام تسلیم و ازدیاد طول کاهش می‌یابد. بنابراین این نمودارها را می‌توان به دو بخش افزایش و کاهش استحکام کششی، متناسب با افزایش کسر حجمی فاز α ، تقسیم نمود. براساس مطالعات کار و همکاران [11]، و جفی [12] به‌طور معمول فاز β بسیار مستحکم‌تر از فاز α است، اما با افزودن عنصر آلومینیوم یا عناصر بین‌نشینی دیگر فاز α مستحکم‌تر و در مقابل با افزایش عنصر وانادیم و یا سایر عناصر پایدارکننده ایزومورف، فاز β نرم‌تر می‌شود. بنابراین مستحکم‌بودن فاز α نسبت به فاز β را می‌توان به‌عنوان عامل موثر در افزایش استحکام تسلیم به‌ازای افزایش فاز α دانست. این مستحکم‌بودن فاز α نسبت به فاز β و تأثیر مثبت آن در افزایش استحکام تسلیم توسط شی و همکاران [4] نیز گزارش شده است.

همچنین با توجه به اینکه فاز α انتخاب‌شده به‌عنوان ورودی، ترکیبی از فاز α لایه‌ای و α اولیه است (براساس اطلاعات مندرج در مطالعه شی و همکاران [4]) در این صورت با افزایش کسر حجمی فاز α ، متقابلاً شاهد افزایش فاز α_p می‌باشیم. افزایش کسر حجمی فاز α_p منجر به کاهش اندازه دانه β و این کاهش باعث محدود شدن اندازه کلونی و ضخامت لایه‌های α و همچنین طول موثر لایه α مرز دانه‌ای می‌شود [1, 13]. فاز α مرز دانه‌ای، خصوصاً وقتی به شکل یک فیلم پیوسته باشد، به‌دلیل کرنش موضعی در فاز α نرم و در نتیجه جوانه‌زنی ترک و شکست در مرز دانه و همچنین این فاز به‌عنوان محلی مناسب جهت جوانه‌زنی ترک و گسترش ترک و در نهایت شکست پیش از موعد، باعث کاهش انعطاف‌پذیری و استحکام می‌شود [3, 14, 15]. همچنین به‌دلیل اینکه

قابل توجهی بر روی روند تأثیرگذاری نسبت ابعادی فاز α مرزدهای به‌ترتیب بر روی تنش تسلیم و ازدیاد طول را دارد. این در حالی است که به‌دلیل در نظر گرفتن مدل خطی در مطالعه سان و همکاران [5] این تأثیرگذاری قابل‌مشاهده نیست. بنابراین به‌طور کلی براساس نتایج می‌توان بیان کرد، زمانی که α_p به شکل سوزنی یا به‌صورت کشیده است، به‌ترتیب کاهش و افزایش در ازدیاد طول و استحکام تسلیم رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری

دو شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور و پس‌خور با دولایه پنهان جهت ایجاد ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V با الگوریتم پس انتشار خطا مورد تعلیم و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. به‌علاوه با استفاده از روش طراحی آزمایش و طرح مرکب مرکزی اثر ویژگی‌های ریزساختاری در ساختار دوگانه Ti-6Al-4V بررسی شد. نتایج مقایسه بین دو شبکه و تکنیک رویه پاسخ نشان داد:

۱- شبکه عصبی پس‌خور نسبت به شبکه پیش‌خور در پیش‌بینی خواص مکانیکی، خصوصاً ازدیاد طول، در آلیاژ Ti-6Al-4V بهتر و دقیق‌تر عمل می‌کند.

۲- ویژگی‌های ریزساختاری از جمله کسر حجمی فاز α (A)، ضخامت لایه α (B) و نسبت ابعادی فاز α اولیه (C)، می‌تواند رفتار استحکام تسلیم و ازدیاد طول آلیاژ Ti-6Al-4V با ساختار دوگانه را به‌خوبی پیش‌بینی نماید.

۳- با توجه به تحلیل واریانس، عناصر C، B²، AB² و A²C به‌علاوه عناصر A، C، B²، BC و A²B به‌ترتیب از موثرترین فاکتورهای تأثیرگذار بر استحکام تسلیم و ازدیاد طول آلیاژ Ti-6Al-4V هستند.

۴- از میان دلایل ارایه‌شده در بحث چگونگی تأثیر سه پارامتر ریزساختاری، طول لغزش موثر را می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر خواص مکانیکی این آلیاژ دانست. به‌طوری که با افزایش طول لغزش، کاهش تنش تسلیم و ازدیاد طول را خواهیم داشت.

۵- اندازه کلونی و مرز کلونی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر رفتار تغییر شکل آلیاژهای دوفازی تیتانیوم هستند.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

سهم نویسندگان: علیرضا فلاحي آرزودار (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ مصطفی آسمانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

افزایش و ازدیاد طول ۵٪ کاهش می‌یابد. در نتایج این دو پژوهش فقط روند افزایشی مشاهده می‌شود اما روند کاهشی بعد از رسیدن به مقدار بیشینه که توسط نتایج تجربی مطالعات دیگر گزارش شده، مشاهده نمی‌شود [1, 16, 17]. این در حالی است که در پژوهش حاضر این روند به‌خوبی برای استحکام تسلیم و ازدیاد طول قابل‌مشاهده است. بنابراین می‌توان این مهم را برتری مدل در نظر گرفته‌شده در این مقاله نسبت به مدل در نظر گرفته‌شده در مراجع مطالعات دیگر [4, 5] دانست.

همان‌طور که در نمودارهای ۵-ج و ۵-د و ۶-ج و ۶-د به‌وضوح مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لایه‌های α استحکام تسلیم و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد، این نتایج توسط کار و همکاران [11]، ویس و همکاران [19] و شی و همکاران [49] نیز گزارش شده است. براساس نتایج شی و همکاران [4]، با افزایش اندازه کلونی، ضخامت لایه‌های α و افزایش اندازه دانه β ، استحکام تسلیم در آلیاژ Ti-6Al-4V کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط سان و همکاران [5] مبنی بر موثر بودن تأثیر ضخامت لایه‌های فاز α بر خواص کششی ارایه شد. آنها گزارش کردند، با افزایش ضخامت لایه‌های فاز α ازدیاد طول و تنش تسلیم کاهش می‌یابند. طبق گزارش شی و همکاران [4]، با کاهش سطح تماس α/β در اثر افزایش ضخامت لایه‌های α (در بازه ۳/۳-۲ میکرون‌متر) این سطوح مقاومت کمتری در مقابل حرکت نابجایی‌ها دارند. این بازه از ضخامت بهترین حالت جهت حصول بیشینه مقدار شکل‌پذیری برای این آلیاژ است. همچنین آنها گزارش کردند، با افزایش ضخامت لایه‌های فاز α (در بازه بزرگ‌تر از ۳/۵ میکرون‌متر)، اثر مسدودکنندگی حرکت نابجایی‌های لایه‌ها بیش از اثر موثر کاهش سطح تماس α/β بر روی ازدیاد طول این آلیاژ است. بنابراین با افزایش ضخامت لایه‌های α در این بازه، ازدیاد طول کاهش می‌یابد. بنابراین براساس نتایج شی و همکاران [4] و کار و همکاران [11] می‌توان بیان نمود، با کاهش ضخامت لایه‌های α در بازه مقادیر بزرگ‌تر از ۳/۵ میکرون به‌دلیل کاهش طول لغزش موثر و براساس طول تجمع نابجایی‌ها، استحکام تسلیم با معکوس ضخامت لایه‌های α متناسب است (نمودارهای ۵-ج و ۵-د).

طبق مطالعه سان و همکاران [5]، ویژگی نسبت ابعادی فاز α اولیه تأثیر قابل توجهی بر روی استحکام تسلیم و ازدیاد طول ندارند. تأثیر این پارامتر به‌طوری است که طبق گزارش آنها زمانی که کسر حجمی فاز α در سطح پایین (۵۵/۲۶٪) قرار دارد، به‌ترتیب تنش تسلیم از مقدار ۸۲۵/۴ به ۸۴۰/۲ مگاپاسکال و ازدیاد طول از مقدار ۱۷/۴ به ۱۷/۲٪ افزایش و کاهش می‌یابد. این نتایج دقیقاً در نمودارهای ۵-الف و ۶-الف زمانی که کسر حجمی فاز α در سطح پایین (۶۲/۷٪) قرار دارد، نشان داده شده است. با مقایسه نتایج نمودارهای ۵-الف و ۶-الف مشاهده می‌شود که تطابق بین نتایج مدل پیش‌رو و مدل مرجع [5] است. با مقایسه نمودارهای ۵-الف با ۵-ب و همچنین نمودارهای ۶-الف با ۶-ب همان‌طور که ملاحظه می‌شود ویژگی ریزساختاری ضخامت لایه‌های α تأثیر

properties of Ti-6Al-4V using neural network. Advanced Materials Research. 2010;89-91:443-448.

7- Zipser D, Andersen RA. A back-propagation programmed network that simulates response properties of a subset of posterior parietal neurons. Nature. 1988;331:679-684.

8- Chen B, Cheng XR, Hu YS, Ren Y. Application of back-propagation neural network for controlling the front end bending phenomenon in plate rolling. International Journal of Materials and Product Technology. 2013;46(2-3):166-174.

9- Menhaj MB. Fundamentals of neural networks computational intelligence vol. 1 [dissertation]. Tehran: Amirkabir university of technology publication; 2013. [Persian]

10- Montgomery DC, Myers RH, Anderson-Cook CM. Process and product optimization using designed experiments. New York: Wiley; 2009.

11- Kar S, Searles T, Lee E, Viswanathan G, Fraser H, Tiley J, et al. Modeling the tensile properties in β -processed α/β Ti alloys. Metallurgical and Materials Transactions A. 2006;37(3):559-566.

12- Jaffee RI. The physical metallurgy of titanium alloys. Progress in Metal Physics. 1958;7:65-106.

13- Lutjering G. Property optimization through microstructural control in titanium and aluminum alloys. Materials Science and Engineering: A. 1999;263(2):117-126.

14- Smith WF. Structure and properties of engineering alloys. New York: McGraw-Hill; 1994.

15- Donachie MJ. Titanium: A technical guide. Geauga: ASM international; 2000.

16- Filip R, Kubiak K, Ziaja W, Sieniawski J. The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2003;133(1-2):84-89.

17- Lutjering G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α + β) titanium alloys. Materials Science and Engineering: A. 1998;243(1-2):32-45.

18- Terlinde G, Luetjering G. Influence of grain size and age-hardening on dislocation pile-ups and tensile fracture for a Ti-Al alloy. Metallurgical and Materials Transactions A. 1982;13(7):1283-1292.

19- Weiss I, Froes FH, Eylon D, Welsch GE. Modification of alpha morphology in Ti-6Al-4V by thermo mechanical processing. Metallurgical Transactions A. 1986;17:1935-1947.

فهرست علائم

A	کسر حجمی فاز مؤثر α (%)
B	ضخامت لایه α (μm)
C	نسبت ابعادی α اولیه
d	مقدار حاصل از شبکه متناظر با مقدار تجربی Z و به‌ازای P مین داده
E	داده‌های تجربی
FBNN	شبکه عصبی پس‌خور
FFNN	شبکه عصبی پیش‌خور
k	تعداد متغیر خروجی
p	تعداد نمونه‌های تعلیم
P	داده‌های حاصل از شبکه عصبی مصنوعی
X'	مقدار نرمال شده متناظر با متغیر X
$X_{\max}$	مقدار بیشینه متغیر X
$X_{\min}$	مقدار کمینه متغیر X

علائم یونانی

α	فاز با ساختار HCP
α_p	فاز α اولیه
β	فاز با ساختار BCC
λ	نقاط محوری در طراحی آزمایش

منابع

- 1- Lutjering G, Williams JC, Gysler A. Titanium. Humburg: Springer; 2000.
- 2- Lin FS, Starke EA, Chakraborty S, Gysler A. The effect of microstructure on the deformation modes and mechanical properties of Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8 Mo: Part I. Widmanstätten structures. Metallurgical Transactions A. 1984;15:1873-1881.
- 3- Leyens C, Manfred P. Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications. Weinheim: Wiley-VCH; 2003.
- 4- Shi X, Zeng W, Sun Y, Han Y, Zhao Y, Guo P. Microstructure-tensile properties correlation for the Ti-6Al-4V titanium alloy. Journal of Materials Engineering and Performance. 2015;24(4):1754-1762.
- 5- Sun Y, Zeng W, Han Y, Zhao Y, Wang G, Dargusch MS, et al. Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti-6Al-4V alloy based on an artificial neural network. Materials Science and Engineering: A. 2011;528(29-30):8757-8764.
- 6- Detak YP, Syarif J, Ramli R. Prediction of mechanical