

بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر تنش‌های پسماند آلیاژ پایه نیکل با تلفیق الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی

حسین امیرآبادی و فرشید جعفریان

گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند

جواد صدری

گروه برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند

(دریافت مقاله: ۹۲/۰۹/۰۴ - پذیرش مقاله: ۹۳/۰۶/۰۸)

چکیده

تنش‌های پسماند بوجود آمده در اثر فرآیندهای ماشینکاری بطور قابل ملاحظه‌ای بر عمر خستگی مجموعه تولیدی اثرگذار است. آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با داشتن خواص منحصر به فرد از کاربرد گسترده‌ای در قطعات مختلف صنایع هوایی و قطعات دوار موتورهای توربینی برخوردار است. به همین منظور بررسی وضعیت نامطلوب تنش پسماند در فرآیند تراشکاری نهایی این آلیاژ بیش از سایر مواد و فرآیندهای ماشینکاری احساس می‌شود. متأسفانه هزینه بالا و مشکلات متعدد جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند ماشینکاری، مانع از بررسی گسترده اثر پارامترهای ماشینکاری بر میزان این تنش‌ها شده است. از این جهت تحقیق به عمل آمده با هدف مرتفع نمودن نیاز مذکور صورت پذیرفته است. در ابتدا از روش پراش اشعه ایکس جهت اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شد. در ادامه از شبکه عصبی آموزش دیده شده توسط الگوریتم ژنتیک جهت بررسی گسترده اثر پارامترهای ماشینکاری شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر میزان تنش‌های پسماند سطحی استفاده شد. نتایج بدست آمده حاکی از دقت بالای مدل ارائه شده در تخمین تنش پسماند بود که در نهایت بهترین شرایط ماشینکاری جهت کاهش تنش‌های نامطلوب کششی در فرآیند تراشکاری نهایی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: تنش پسماند، طراحی آزمایش، روش پراش اشعه ایکس، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

Investigating the effect of machining parameters on residual stresses of the nickel-based alloy using the genetic algorithm and neural network

H. Amirabadi and F. Jafarian

Mechanic Department, university of Birjand

J. Sadri

Electronic and computer Department, University of Birjand

(Received 25 November 2013, accepted 30 August 2014)

Abstract

Induced residual stress at the machining processes affects significantly fatigue life of manufactured components. Inconel718 superalloy has been used widely in the different parts of aerospace industries and in the rotary parts of turbines engines because of its unique properties. Therefore, evaluation of undesirable state of the residual stress in finish turning of Inconel718 is so needed. Unfortunately, the effect of machining parameters has not been investigated extensively on residual stress due to the high expenses and several difficulties for measuring residual stress. Thus, the present study has been conducted in order to obviate the mentioned requirement. At first, the residual stress was measured by X-Ray Diffraction (XRD) method. Then, the effect of machining parameters including cutting speed, feed rate, and depth of cut was investigated widely on residual stress using Artificial Neural Network (ANN) trained by Genetic Algorithm (GA). Obtained results showed that, the residual stresses were estimated accurately and finally the most suitable machining parameters were accessed so that the undesirable state of tensile residual stress was reduced in finish machining of Inconel718.

Keyword: Residual Stress, Design of Experiment, X-Ray Diffraction Method, Artificial Neural Networks.

E-mail of corresponding author: Farshid. jafarian@ymail.com.

مقدمه

ماشینکاری یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین فرآیندهای تولیدی است که در تولید اغلب قطعات کاربرد دارد. تنش‌های پسماند بوجود آمده در فرآیند ماشینکاری به عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها جهت ارزیابی کیفیت قطعه تولیدی بشمار می‌آید و همواره مورد توجه مهندسين بخصوص در صنایع هوایی قرار گرفته است [۱ و ۲]. تنش‌های پسماند ذخیره شده در سطح قطعه کار می‌تواند سودمند و یا مضر باشند. از یک سو تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعه کار منجر به کاهش عمر خستگی آن می‌گردد و از سوی دیگر تنش‌های پسماند فشاری با ممانعت از احتمال بروز و گسترش ترک، عمر کاری قطعه کار را افزایش می‌دهد. با توجه به آنکه پارامترهای ماشینکاری نقش قابل ملاحظه‌ای بر میزان و نوع تنش‌های پسماند ماشینکاری ایفا می‌نمایند، ضرورت مطالعه و بررسی هرچه بیشتر در این راستا احساس می‌شود. این امر بخصوص در فرآیند ماشینکاری نهایی قطعاتی که دارای کاربردهای خاص بوده و تحت اثر بارهای دینامیکی هستند، بیش‌تر احساس می‌شود [۳ و ۴].

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی همچون دمای ذوب، مقاومت به سایش، مقاومت به خوردگی و عمر خستگی بالا و همچنین قابلیت حفظ استحکام در دماهای بالا دارای کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوایی، صنایع نظامی و صنایع ساخت توربین‌های گازی است [۵]. لازم به ذکر است به دلیل سختی بالای سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ قابلیت ماشینکاری این آلیاژ از جنبه‌های مختلف پایین است. از جمله آنان می‌توان به مواردی همچون نیروهای ماشینکاری بالا، وجود تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعه کار و عمر پایین ابزار اشاره نمود [۶]. با توجه به کاربرد این آلیاژ در ساخت قطعات دواری که تحت اثر بارهای دینامیکی قرار دارند، بررسی وضعیت تنش پسماند در فرآیند تراشکاری این ماده از

اهمیت و ضرورت بسیار بالایی برخوردار است. از این رو مطالعاتی به منظور بررسی تنش پسماند در ماشینکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ صورت پذیرفته است که به بررسی آنان پرداخته می‌شود. در تحقیقی که اسپالر^۱ و همکارانش صورت دادند از ابزار سرامیکی جهت تراشکاری اینکونل ۷۱۸ بهره بردند. ایشان در تحقیق خود با ثابت نگه داشتن عمق برش، در سرعت‌های برشی و پیشروی متفاوت به بررسی تنش‌های پسماند پرداختند [۷]. بر اساس نتایج ایشان در سرعت‌های برشی پایین میزان تنش‌های پسماند کششی کمی گزارش شد که این میزان در سرعت‌های برشی بالاتر، افزایش یافت. پاواد^۲ و همکارانش با استفاده از روش‌های آماری به بررسی تنش‌های پسماند و کارسختی بوجود آمده در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ پرداختند [۸]. مطالعات ایشان نشان داد که تنش‌های پسماند فشاری در سطح قطعه ماشینکاری شده با سرعت برشی حداکثر (۴۷۵ متر بر دقیقه)، سرعت پیشروی حداقل (۰/۰۵ میلیمتر بر دور) و عمق برش متوسط (۰/۷۵-۰/۵ میلیمتر) حاصل گردید. در تحقیقی که توسط آرونچالام^۳ و همکارانش صورت پذیرفت اثر هندسه ابزار بر روی تنش پسماند در فرآیند کف تراشی مورد بررسی قرار گرفت [۹]. نتایج آنان حاکی از آن بود که کاهش شعاع نوک ابزار و استفاده از ابزار با زاویه براده منفی منجر به افزایش میزان تنش‌های پسماند فشاری می‌شود. همچنین نتایج آنان نشان داد که ابزار با لبه پخ خورده بیشترین و ابزار با لبه تیز کمترین تنش پسماند فشاری را در سطح تولید می‌کند. به تازگی دوویلز^۴ و همکارانش مطالعه‌ای را جهت بررسی اثر سرعت برشی بر روی تنش‌های پسماند بوجود آمده در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ در شرایط ماشینکاری خشک و با استفاده از مایع خنک‌کار صورت دادند [۱۰]. بررسی‌های به عمل آمده در سرعت‌های برشی ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متر بر دقیقه

1. Schlauer
2. Pawadea
3. Arunachalam
4. Devillez

بررسی تأثیر مستقل و ترکیبی پارامترهای ماشینکاری بر ذخیره تنش پسماند سطحی در ماشینکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ صورت پذیرفته است. از این رو در تحقیق حاضر به منظور رفع مشکل مذکور، با استفاده از آزمایشات تجربی متعدد و بکارگیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی به بررسی کامل اثر پارامترهای اصلی ماشینکاری شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر روی تنش‌های پسماند سطحی ذخیره شده در فرآیند تراشکاری نهایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد.

اندازه‌گیری تنش‌های پسماند توسط اشعه ایکس

امروزه از روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری تنش پسماند بهره گرفته می‌شود که بعضی از آن‌ها مخرب [۳] و بعضی غیرمخرب هستند. در سال‌های اخیر روش‌های غیر مخرب مورد توجه مهندسين قرار گرفته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش پراش اشعه ایکس^۳ و همچنین روش التراسونیک^۴ اشاره نمود [۱۴].

روش پراش اشعه ایکس که از دقت و کاربرد بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است، قادر به اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در سطح است. با توجه به آنکه تنش‌های پسماند ذخیره شده در فرآیندهای ماشینکاری بصورت سطحی هستند، تقریباً در اکثر مطالعات صورت پذیرفته از این روش بهره گرفته شده است [۱۱ و ۱۲]. از این رو در این تحقیق از روش مذکور جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در فرآیند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ استفاده شد. با استفاده از روش پراش اشعه ایکس تنها تنش پسماند ذخیره شده در مواد کریستالی قابل اندازه‌گیری است. اصول کارکرد این روش بر اساس قانون براگ است که با رابطه (۱) معرفی می‌گردد.

$$n\lambda = 2d \sin(2\theta) \quad (1)$$

حاکمی از آن بود که استفاده از مایع خنک‌کار باعث کاهش تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعات می‌گردد. البته از میزان این تأثیرپذیری در سرعت‌های برشی بالاتر کاسته شد. در تحقیق به عمل آمده توسط درین^۱ و همکارش تنش پسماند بوجود آمده در فرآیند فرزکاری سرعت بالا مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. تحقیق مذکور با استفاده از ابزار سمیتید کارباید، در شرایط ماشینکاری خشک، سرعت برشی ۲۰۰ متر بر دقیقه، سرعت پیشروی ۰/۰۴ میلیمتر بر دور و عمق برش ۰/۵ میلیمتر صورت پذیرفت [۱۱]. نتایج بدست آمده حاکمی از ذخیره تنش پسماند کششی بسیار بالا (نزدیک به ۱۵۰۰ مگاپاسکال) در سطح قطعه‌کار بود. در تحقیق مشابهی که توسط گرویل^۲ و همکارش صورت پذیرفت میزان تنش پسماند در شرایط مشابه آزمایش درین ولی با استفاده از مایع خنک‌کار و در سرعت برشی ۱۶ متر بر دقیقه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت [۱۲]. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از خنک‌کار و ماشینکاری با سرعت برشی معمولی منجر به کاهش قابل ملاحظه تنش پسماند کششی در سطح نمونه (۴۰۰ مگاپاسکال) گردید.

با توجه به موارد مذکور، لازم به ذکر است که مطالعات صورت پذیرفته به منظور بررسی وضعیت تنش پسماند در ماشینکاری پرداخت سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ کافی نبوده و در اندک مطالعات به عمل آمده اثر پارامترهای ماشینکاری بصورت جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این در تمامی مطالعات قبلی وضعیت تنش پسماند در لایه‌های سطحی و زیر سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. این در حالی است که وضعیت تنش پسماند در ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ در لایه‌های زیر سطحی مطلوب بوده ولی در سطح قطعه بصورت کششی و نامطلوب است که مستلزم مطالعه و بررسی بیشتری است. از طرف دیگر تاکنون هیچ مطالعه‌ای به منظور

3. X-Ray Diffraction method
4. Ultrasonic method

1. Derrien
2. Guerville

مورد نیاز میزان تنش‌های پسماند با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

در روابط بالا σ میزان تنش پسماند، E و ν به ترتیب مدول یانگ و ضریب پواسون قطعه‌کار، ψ زاویه چرخش قطعه‌کار نسبت به سطح مرجع، d_0 فاصله صفحات کریستالی ناحیه بدون تنش و d_ψ فاصله صفحات کریستالی ناحیه تحت تنش است. همچنین m شیب خط منحنی درونیابی شده‌ی $\sin^2 \psi$ نسبت به d_ψ است. در شکل ۱ نمای شماتیکی از چرخش قطعه‌کار جهت اندازه‌گیری تنش پسماند در این روش نشان داده شده است.

آزمایشات تجربی

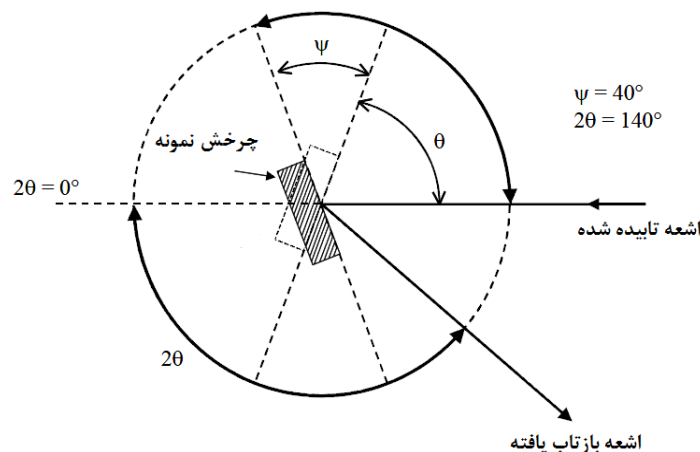
در این بخش اقدامات صورت پذیرفته جهت بررسی تنش پسماند در فرآیند تراشکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ شامل مراحل آماده‌سازی، ماشینکاری و اندازه‌گیری تنش پسماند نمونه‌ها مطرح شده است. در ابتدا با انجام آزمایش فلورسانس اشعه ایکس ترکیب شیمیایی و درصد عناصر تشکیل دهنده سوپرآلیاژ مورد نظر، مشخص شد.

در این رابطه d فاصله صفحه کریستالی، n مرتبه انعکاس، λ طول موج اشعه ایکس و Θ زاویه براگ یا همان زاویه تابش اشعه با سطح قطعه‌کار است. بر اساس قانون براگ اشعه تابیده شده به سطح نمونه، تحت زاویه خاصی منعکس می‌شود و با مشخص بودن طول موج اشعه تابیده شده، فاصله صفحه کریستالی ماده مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود [۱۵].

در این روش میزان تنش پسماند ذخیره شده در قطعه‌کار بصورت غیر مستقیم و با اندازه‌گیری فاصله صفحات کریستالی ناحیه تحت تنش صورت می‌پذیرد. روش کار به این صورت است که در ابتدا در محدوده زوایای بالای 2Θ ، زاویه پراش مناسب شناسایی می‌شود. سپس تنظیمات دستگاه در این زاویه صورت گرفته و فاصله صفحات کریستالی ناحیه تحت تنش اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری با چرخش قطعه‌کار در محدوده زاویه مورد نظر تکرار می‌شود. در نهایت بعد از ساده سازی‌های

$$\sigma = \frac{E}{\sin^2 r(1+\nu)} \left(\frac{d_\psi - d_0}{d_0} \right) \quad (۲)$$

$$\sigma = \left[\frac{E}{1+\nu} \right] m \quad (۳)$$



شکل ۱. شماتیکی از چرخش قطعه‌کار جهت اندازه‌گیری تنش پسماند در روش پراش اشعه ایکس [۱۶].

نتایج بدست آمده در این آزمایش در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی و درصد عناصر سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸.

عناصر تشکیل دهنده	درصد	عناصر تشکیل دهنده	درصد
نیکل	۵۳/۵۹	تیتانیوم	۱/۰۸
کروم	۱۷/۹۳	آلومینیوم	۰/۴۵
آهن	۱۹/۰۴	فسفر	۰/۰۲
مولیبدنوم	۲/۷۲	سیلیکون	۰/۰۵
نیوبیوم	۵/۰۷	----	---

عمق برش مورد مطالعه قرار گرفت. هر یک از پارامترها در ۴ سطح در نظر گرفته شد و بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی (بر اساس طراحی سطوح ترکیبی^۳) تعداد ۳۲ آزمایش ماشینکاری صورت پذیرفت. در جدول ۲ محدوده و سطوح پارامترهای مذکور نشان داده شده است.

جدول ۲. محدوده و سطوح پارامترهای ماشینکاری مورد بررسی.

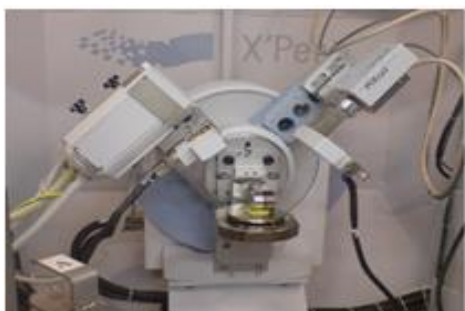
پارامترهای ماشینکاری	سطوح و محدوده
سرعت برشی (متر بر دقیقه)	۶۰ - ۸۰ - ۱۰۰ - ۱۲۰
نرخ پیشروی (میلیمتر بر دور)	۰/۰۱۵ - ۰/۰۲۵ - ۰/۰۳۵ - ۰/۰۴۵
عمق برش (میلیمتر)	۰/۱۵ - ۰/۳ - ۰/۴۵ - ۰/۶

به منظور افزایش دقت آزمایشات برخی از ملاحظات در نظر گرفته شد. با توجه عمق برش نسبتاً کم در فرآیند ماشینکاری نهایی و نیمه نهایی، لنگی قطعات می‌تواند منجر به بروز خطای قابل ملاحظه‌ای در انجام آزمایشات ماشینکاری گردد. از این رو مشابه برخی از مطالعات صورت پذیرفته [۹] به منظور برطرف نمودن لنگی احتمالی، در ابتدا تمامی نمونه‌ها با شرایط یکسان ماشینکاری شدند. همچنین به منظور افزایش دقت در تماس کردن ابزار، از دستگاه لبه‌یاب لیزری استفاده شد. در شکل ۲ نحوه استفاده از دستگاه لبه‌یاب لیزری نشان داده شده است.

بر اساس مطالعات به عمل آمده توسط محققین مشخص شده است که سایش ابزار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان تنش‌های پسماند ذخیره شده در فرآیند ماشینکاری دارد [۱۷]. با توجه به سایش بالای ابزار در ماشینکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸، به منظور حذف اثر سایش ابزار در نتایج بدست آمده از ابزارهای تازه در انجام آزمایشات ماشینکاری استفاده شد.

با توجه به محدودیت وزن و ابعاد نمونه‌ها جهت قرارگیری در دستگاه آنالیز تنش، با استفاده از عملیات برش وایرکات نمونه‌های استوانه‌های با قطر ۴۰ میلیمتر و به طول ۵۰ میلیمتر آماده شد. همچنین تعداد نمونه‌های مورد نیاز بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی تعیین شد. در ادامه تمامی نمونه‌ها تحت سیکل عملیات حرارتی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ قرار گرفتند. بدین ترتیب، در ابتدا عملیات حرارتی انحلال صورت پذیرفت و نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۹۵۰ درجه قرار گرفتند و سپس در دمای محیط خنک شدند. در ادامه نیز نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی پیر سختی قرار گرفتند. بر این اساس ابتدا نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در دمای ۷۸۰ درجه قرار گرفتند، سپس تا دمای ۶۲۰ درجه در کوره خنک شده و به مدت ۸ ساعت در این دما نگه داشته شدند. در انتها نیز در محیط باز تا دمای محیط خنک شدند [۱۰].

به منظور ماشینکاری نهایی نمونه‌ها از هلدر ساخت شرکت سندویک^۱ و از ابزار تنگستن کاربایدی^۲ استفاده شد. همچنین از دستگاه تراش کنترل عددی جهت ماشینکاری استفاده شد. در این تحقیق اثر پارامترهای اصلی ماشینکاری شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و



شکل ۴. نمایی از دستگاه پراش اشعه‌ی ایکس بکار گرفته شده.



شکل ۲. استفاده از لبه یاب لیزری جهت مماس کردن ابزار.

در ابتدا با استفاده از آزمایش آنالیز فاز در محدوده زوایای بالا، زاویه تفرق اشعه ایکس عنصر نیکل برای نمونه با و بدون تنش به ترتیب ۱۳۰ و ۱۲۸ درجه بدست آمد. علت این تغییر زاویه به دلیل قانون براگ و تغییر فاصله صفحات کریستالی در نمونه با تنش است. شکل ۵ آنالیز فاز نمونه با و بدون تنش اینکونل ۷۱۸ را نشان می‌دهد.

در ابتدا دستگاه در موقعیت زاویه 2θ ، ۱۲۸ درجه قرار داده شد، سپس از تکنیک $\sin^2\psi$ و با در نظر گرفتن ۷ زاویه ψ (زوایای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه) جهت اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شد.

اندازه‌گیری‌های مورد نیاز با استفاده از نرم افزار آنالیز تنش^۲ و با اعمال ضریب پواسون ۰/۲۹ و مدول یانگ ۲۰۸ گیگاپاسکال برای قطعات صورت پذیرفت [۹]. همچنین با استفاده از نمونه بدون تنش، نتایج بدست آمده کالیبره شد. در جدول ۳ نتایج تنش پسماند بدست آمده برای ۳۲ نمونه به همراه پارامترهای ماشینکاری متناظرشان نشان داده شده است.

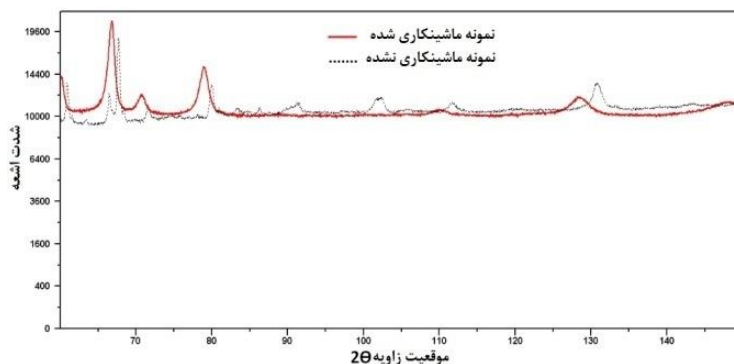
در ادامه، با بکارگیری سیستم‌های هوشمند و استفاده از نتایج بدست آمده در جدول ۳ به بررسی ارتباط بین پارامترهای ماشینکاری و تنش‌های پسماند ذخیره شده در فرآیند تراشکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد.

علاوه بر این مطالعات صورت پذیرفته توسط محققین نشان داده است که استفاده از مایع خنک‌کار در کاهش تنش‌های پسماند کششی در ماشینکاری این ماده موثر است [۱۲]. بنابراین در این تحقیق آزمایشات ماشینکاری به همراه مایع خنک‌کار و با شرایط یکسان برای تمامی نمونه‌ها صورت پذیرفت. شکل زیر نمونه‌ای از آزمایشات ماشینکاری به عمل آمده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. ماشینکاری نمونه‌ها به همراه مایع خنک‌کار.

برای اندازه‌گیری تنش پسماند میانگین ذخیره شده در سطح قطعات از دستگاه پراش اشعه‌ی ایکس فیلیپس^۱ ساخت کشور هلند استفاده شد. به منظور افزایش دقت نتایج، تیوب دستگاه از جنس کروم با طول موج ۲/۱ انگسترمت انتخاب شد. همچنین ولتاژ و جریان دستگاه به ترتیب ۴۰ کیلو ولت و ۳۵ میلی‌آمپر در نظر گرفته شد. شکل ۴ نمایی از دستگاه پراش اشعه ایکس بکار گرفته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۵. آنالیز فاز نمونه‌ی بدون و با تنش در زوایای بالا.

جدول ۳. نتایج تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند.

شماره آزمایش	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	عمق برش (میلیمتر)	نرخ پیشروی (میلیمتر بر دور)	تنش پسماند (مگاپاسکال)
۱	۶۰	۰/۱۵	۰/۰۱۵	۱۵۲/۸
۲	۶۰	۰/۳۰	۰/۰۲۵	۸۱/۰
۳	۶۰	۰/۴۵	۰/۰۳۵	۱۹۵/۹
۴	۶۰	۰/۶۰	۰/۰۴۵	۱۸۲/۳
۵	۸۰	۰/۱۵	۰/۰۱۵	۲۴۳/۰
۶	۸۰	۰/۳۰	۰/۰۲۵	۵۲۲/۶
۷	۸۰	۰/۴۵	۰/۰۳۵	۵۱۳/۹
۸	۸۰	۰/۶۰	۰/۰۴۵	۵۶۸/۲
۹	۱۰۰	۰/۱۵	۰/۰۲۵	۲۳۰/۰
۱۰	۱۰۰	۰/۳۰	۰/۰۱۵	۵۴۹/۷
۱۱	۱۰۰	۰/۴۵	۰/۰۴۵	۱۷۶/۶
۱۲	۱۰۰	۰/۶۰	۰/۰۳۵	۱۹۲/۶
۱۳	۱۲۰	۰/۱۵	۰/۰۲۵	۲۰۲/۶
۱۴	۱۲۰	۰/۳۰	۰/۰۱۵	۲۱۶/۴
۱۵	۱۲۰	۰/۴۵	۰/۰۴۵	۲۱۰/۵
۱۶	۱۲۰	۰/۶۰	۰/۰۳۵	۱۹۷/۴
۱۷	۶۰	۰/۱۵	۰/۰۴۵	۱۸۸/۲
۱۸	۶۰	۰/۳۰	۰/۰۳۵	۱۷۵/۱
۱۹	۶۰	۰/۴۵	۰/۰۲۵	۲۱۰/۴
۲۰	۶۰	۰/۶۰	۰/۰۱۵	۲۲۱/۴
۲۱	۸۰	۰/۱۵	۰/۰۴۵	۱۸۵/۹
۲۲	۸۰	۰/۳۰	۰/۰۳۵	۲۰۶/۲
۲۳	۸۰	۰/۴۵	۰/۰۲۵	۱۶۲/۱
۲۴	۸۰	۰/۶۰	۰/۰۱۵	۱۹۶/۰
۲۵	۱۰۰	۰/۱۵	۰/۰۳۵	۱۴۱/۷
۲۶	۱۰۰	۰/۳۰	۰/۰۴۵	۱۶۷/۰

۱۹۷/۸	۰/۰۱۵	۰/۴۵	۱۰۰	۲۷
۲۳۰/۸	۰/۰۲۵	۰/۶۰	۱۰۰	۲۸
۱۴۱/۹	۰/۰۳۵	۰/۱۵	۱۲۰	۲۹
۱۷۹/۲	۰/۰۴۵	۰/۳۰	۱۲۰	۳۰
۲۱۴/۹	۰/۰۱۵	۰/۴۵	۱۲۰	۳۱
۲۱۷/۴	۰/۰۲۵	۰/۶۰	۱۲۰	۳۲

کاربرد سیستم‌های هوشمند

در سال‌های اخیر سیستم‌های هوشمند مبتنی بر مدل‌های پیشگو بطور قابل ملاحظه‌ای گسترش یافته‌اند و از مزایای آنان در علوم مختلف بهره گرفته شده است. از جمله این علوم می‌توان به فرآیندهای ساخت و تولید اشاره نمود که محققین از این روش‌ها جهت پیشبرد اهداف خود در انواع فرآیندهای تولیدی بهره برده‌اند [۱۸]. مدل‌های پیشگو در صورت آموزش صحیح قادر هستند خروجی(های) فرآیندهای تولیدی را با دقت مناسبی تخمین بزنند که این امر علاوه بر کاهش هزینه‌های آزمایشات تجربی، منجر به درک جامع‌تری از فرآیند مورد نظر می‌گردد. شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های پیشگو هستند که بطور گسترده‌ای مورد استفاده محققین قرار گرفته است [۱۹]. به عنوان مثال در تحقیقی که توسط اوزل^۱ و همکارانش صورت پذیرفت، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی سایش ابزار در فرآیند ماشینکاری فولاد سخت‌کاری شده پرداخته شد [۲۰]. همچنین در تحقیقی که توسط زاین^۲ و همکارانش صورت پذیرفت، از شبکه عصبی مصنوعی با ساختارهای متفاوت جهت پیش‌بینی صافی سطح قطعه‌کار در عملیات فرزکاری بهره گرفته شد [۲۱]. در ادامه به معرفی شبکه عصبی مصنوعی، ساختار و نحوه آموزش آن پرداخته می‌شود.

شبکه‌های عصبی مصنوعی

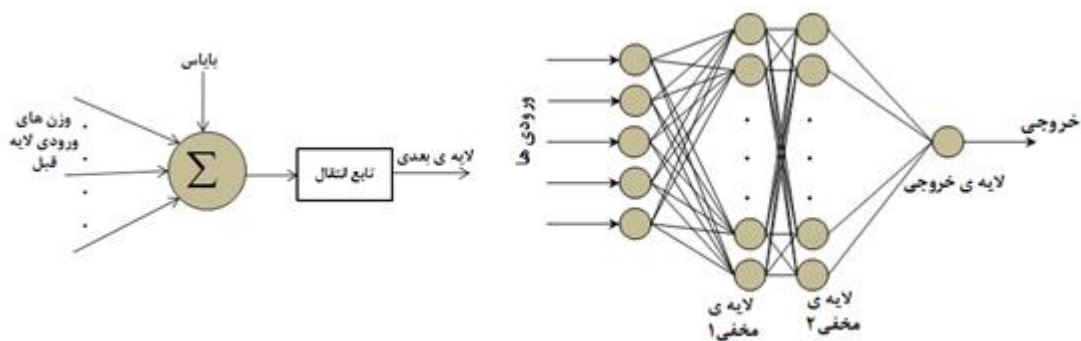
بر اساس ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی هر شبکه از سه لایه شامل لایه ورودی، لایه(های) مخفی و لایه خروجی تشکیل شده است که در داخل هر لایه (متناسب با ساختار شبکه) نرون‌های قرار گرفته است. تمامی نرون‌های هر شبکه توسط لینک‌های اتصال وزن‌داری به یکدیگر متصل می‌شوند که در اصطلاح وزن‌های شبکه نامیده می‌شوند. بدین ترتیب لایه خروجی توسط این لینک‌ها به لایه ورودی مرتبط می‌گردد. همچنین هر نرون متاثر از یک پارامتر مستقل دیگر است که بایاس^۳ نامیده می‌شود. لازم به ذکر است که نحوه اثر مقدار وزن‌ها و بایاس هر نرون به نرون لایه بعد تحت اثر تابعی با عنوان تابع انتقال^۴ قرار دارد که می‌تواند بصورت خطی و یا غیر خطی باشد. بدین ترتیب یک شبکه عصبی مصنوعی قادر است یک سری اطلاعات را در لایه ورودی دریافت کرده و در لایه خروجی اطاعاتی را تخمین بزند. این عمل تابع عواملی همچون نوع ساختار شبکه، تعداد لایه‌ها و نرون‌های هر لایه، مقادیر وزن‌ها/ بایاس‌های شبکه و تابع انتقال هر لایه است [۲۱ و ۲۲]. شکل ۶ نمایی از یک شبکه عصبی با پنج ورودی و دو لایه مخفی و همچنین نمایی از یک نرون را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، عملیات تنظیم مقادیر وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی که در اصطلاح آموزش شبکه نامیده می‌شود، نقش بسیار مهمی در عملکرد و بازدهی شبکه عصبی ایفا می‌کند. بکارگیری

¹ Ozel

² Zain

3. Bias

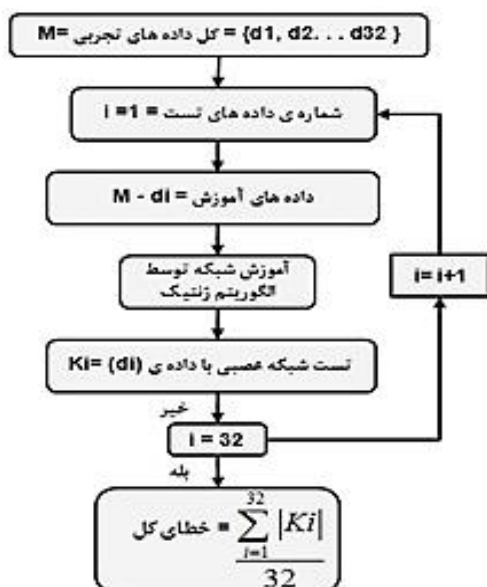
4. Transfer function



شکل ۶. نمایش ساختار یک شبکه‌ی عصبی به همراه ساختار نرون.

انتخاب می‌شود علاوه بر داشتن کمترین خطا، در تمامی محدوده داده‌های مورد بررسی خطای یکنواختی دارد. این روش بر روی ساختارهای مختلف شبکه عصبی و با تکرار ۲۰۰ نسل الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی شد. در نهایت شبکه عصبی با ساختار دو لایه پنهان شامل ۵ نرون در لایه پنهان اول و ۳ نرون در لایه پنهان دوم (۱-۳-۵) انتخاب شد. همچنین تابع انتقال لایه پنهان اول، لایه پنهان دوم و لایه خروجی به ترتیب تنسیگ^۲، لگسیگ^۳ و لگسیگ انتخاب شد.

روش مناسب جهت آموزش شبکه عصبی بخصوص در مواردی که داده‌های آموزش کم است به مراتب از ضرورت بالاتری برخوردار است. به همین منظور آموزش شبکه عصبی به منظور ارایه مدلی پیشگویانه از فرآیند ماشینکاری (که بیشتر داده‌های تجربی کمی در اختیار است) نقش بسیار حائز اهمیتی در صحت پیش‌بینی خروجی‌های ماشینکاری ایفا می‌نماید [۲۳-۲۵]. از این رو در ادامه به معرفی روش جدید و کارآمدی جهت آموزش شبکه عصبی پرداخته می‌شود.



شکل ۷. الگوریتم انتخاب بهترین ساختار شبکه‌ی عصبی [۲۳].

آموزش شبکه عصبی تنش پسماند

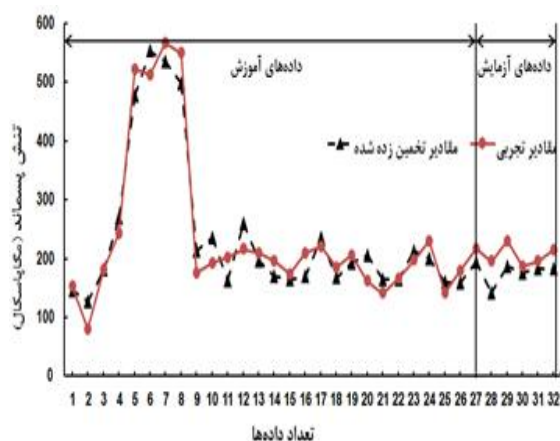
اولین قدم در آموزش شبکه عصبی، شناسایی بهترین ساختار شبکه است. در این تحقیق از ترکیب روش اعتبار سنجی تقاطعی^۱ و آموزش شبکه توسط الگوریتم ژنتیک جهت شناسایی ساختار مناسب شبکه استفاده شد. شکل ۸ نحوه پیاده‌سازی این روش نشان داده شده است [۲۳].

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، در این روش هر بار یکی از داده‌ها به عنوان داده آزمایش و بقیه به عنوان داده آموزش لحاظ می‌گردد. این روند ۳۲ بار (برابر با تعداد داده‌های کل) تکرار می‌شود و در نهایت میانگین قدرمطلق خطای تمامی ۳۲ داده به عنوان معیار ارزیابی شبکه گزارش می‌گردد. ساختار شبکه‌ای که با این روش

2. Tansig
3. Logsig

2. Leave One Out Cross Validation Method (LOOCVM)

در شکل ۹ نیز مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی و داده‌های تخمین زده شده شامل داده‌های آموزش و داده‌های آزمایش صورت پذیرفته است. همانطور که مشاهده می‌گردد، اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی در مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش نسبتاً ناچیز است که این بیانگر آموزش صحیح و به اندازه شبکه عصبی است.



شکل ۹. مقایسه‌ی بین نتایج تجربی و نتایج خروجی از شبکه عصبی.

بحث و نتایج

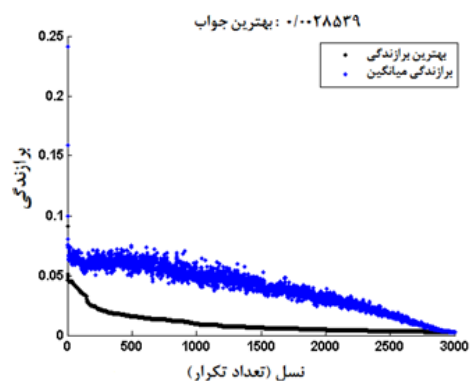
بعد از ارایه یک مدل پیشگویانه مناسب از فرآیند، با استفاده از شبکه عصبی به بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر میزان تنش پسماند ذخیره شده در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد. در فرآیند تراشکاری تغییر شکل‌های پلاستیک مکانیکی و حرارتی که در اثر شکل‌گیری براده بوجود می‌آید، به ترتیب سبب بوجود آمدن تنش‌های پسماند فشاری و کششی در سطح حاصل از ماشینکاری می‌گردد. میزان و نحوه تأثیر این تغییر شکل‌ها متأثر از عوامل متعددی از جمله جنس ماده، پارامترهای ماشینکاری و محدوده مورد بررسی این پارامترها، صلبیت ماشین ابزار، هندسه ابزار و شرایط خنک کاری است. در ادامه علاوه بر بررسی تغییرات تنش پسماند در شرایط ماشینکاری مختلف، به تحلیل نتایج پرداخته می‌شود.

بعد از انتخاب بهترین ساختار، نیاز به آموزش نهایی شبکه است. در این راستا به منظور افزایش دقت و عملکرد شبکه از الگوریتم ژنتیک جهت آموزش شبکه عصبی استفاده شد. همچنین به منظور ممانعت از آموزش بیش از حد شبکه^۱ و آموزش شبکه با دقت کافی و خطای کم، روند آموزش شبکه چندین بار و در تعداد تکرارهای مختلف صورت پذیرفت. در این مرحله، آموزش شبکه با ۲۷ داده و تست شبکه با ۵ داده صورت پذیرفت. همچنین شبکه با معیار مجموع مربعات خطا توسط الگوریتم ژنتیک آموزش داده شد. در جدول ۴ نتایج بدست آمده جهت آموزش نهایی شبکه عصبی گزارش شده است.

جدول ۴. آموزش شبکه‌ی عصبی منتخب توسط الگوریتم ژنتیک.

مقادیر	شاخصه‌های آموزش
۳۰۰۰	تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک
۰/۰۰۲۹	مجموع مربعات خطای آموزش
٪۴/۷	در صد میانگین خطای آموزش
٪۷/۶ - ٪۲/۲ - ٪۹/۳	قدر مطلق در صد خطای آزمایش
٪۵/۶ - ٪۲/۱	در صد میانگین خطای آموزش

در شکل ۸ نیز منحنی همگرایی آموزش شبکه عصبی توسط الگوریتم ژنتیک قابل مشاهده است.



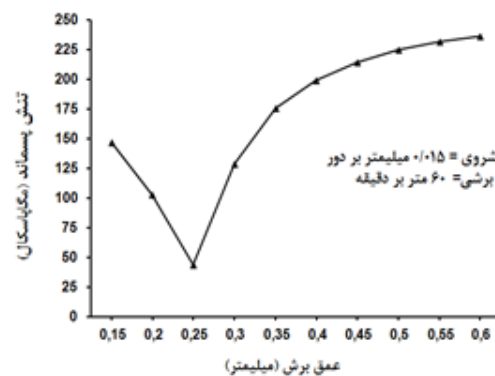
شکل ۸. منحنی همگرایی الگوریتم ژنتیک جهت آموزش شبکه.

برشی ۰/۱۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده در شکل ۱۱ گزارش شد

همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش سرعت برشی منجر به افزایش تنش پسماند می‌شود که البته در سرعت‌های برشی بیشتر از ۱۰۰ دور بر دقیقه میزان تنش پسماند تقریباً ثابت مانده و بصورت جزئی کاهش می‌یابد. در اثر تماس فیزیکی ابزار و قطعه کار در فرآیند تراشکاری از طرف صفحه براده و شعاع لبه برنده ابزار سطح ماشینکاری تحت فشار قرار می‌گیرد که این امر منجر به تغییر شکل‌های پلاستیک مکانیکی و بوجود آمدن تنش پسماند فشاری می‌شود. البته این نوع از تغییر شکل‌ها در سرعت‌های برشی پایین محسوس است. لازم به ذکر است که افزایش سرعت برشی منجر شکل‌گیری براده در مدت زمان کمتر شده و سبب افزایش سرعت لغزش صفحات کریستالی در صفحه برش (ناحیه تغییر شکل اولیه واقع در جلوی ابزار) می‌گردد. این امر با افزایش موضعی حرارت در ناحیه مذکور همراه است و سبب سهولت در شکل‌گیری براده می‌گردد [۳]. این بارهای حرارتی با افزایش سرعت برشی افزایش می‌یابند بگونه‌ای که بسته به جنس ماده و محدوده پارامترهای مورد بررسی می‌توانند بر بارهای مکانیکی غلبه کرده و در نهایت سبب ذخیره تنش پسماند کششی در سطح پس از ماشینکاری گردد. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است میزان تغییرات تنش پسماند در سرعت‌های برشی بالا ناچیز است. زیرا در سرعت‌های برشی بالا فرصت کافی جهت توزیع حرارت در سطح ماشینکاری شده کمتر است و حرارت تولیدی در ناحیه جلوی ابزار با شکل‌گیری سریعتر براده از محل برش دفع می‌گردد.

همچنین تأثیر تغییرات نرخ پیشروی ابزار در میزان تنش پسماند ذخیره شده در سرعت برشی ۶۰ متر بر دقیقه و عمق برشی ۰/۱۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

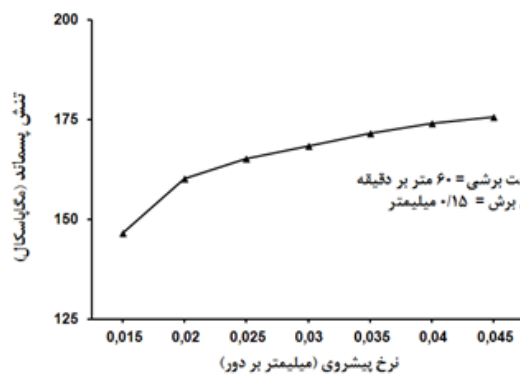
در ابتدا اثر تغییرات عمق برشی در محدوده ۰/۱۵-۰/۶ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۰ اثر تغییرات عمق برش را بر میزان تنش‌های پسماند ذخیره شده با سرعت برشی ثابت ۶۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ثابت ۰/۱۵ میلی‌متر بر دور نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، افزایش عمق برش تا عمق ۰/۲۵ میلی‌متر منجر به کاهش تنش پسماند می‌شود و بعد از آن با افزایش عمق برش میزان تنش پسماند ذخیره شده افزایش می‌یابد. این تغییرات متأثر از نقش عمق برش بر روی حرارت بوجود آمده در ناحیه تغییر شکل اولیه (مکان لغزش صفحات کریستالی و شکل‌گیری براده) است. از طرفی افزایش عمق برش منجر به تولید حرارت بیشتر در این ناحیه می‌شود. این امر سبب افزایش بارهای حرارتی و در نهایت افزایش تنش پسماند کششی در قطعه کار می‌گردد. از طرفی دیگر با افزایش عمق برش بخصوص در ماشینکاری مواد سخت همچون سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸، احتمال وقوع پدیده چتر^۱ یا همان ابزار لرزه افزایش می‌یابد و بصورت موقت از درگیری ابزار کاسته شده می‌شود [۴]. این پدیده می‌تواند علت کاهش تنش پسماند در عمق برشی ۰/۲۵ میلی‌متر باشد.



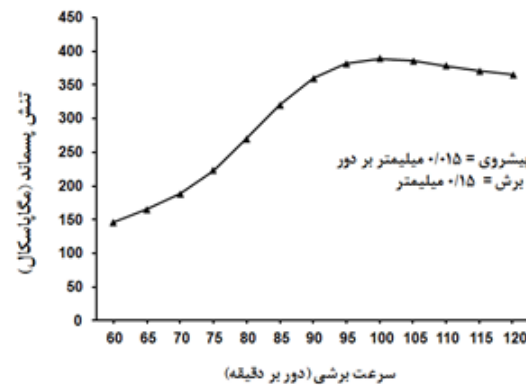
شکل ۱۰. تأثیر عمق برش بر میزان تنش پسماند.

در ادامه اثر تغییرات سرعت برشی در محدوده ۱۲۰-۶۰ متر بر دقیقه با نرخ پیشروی ۰/۱۵ میلی‌متر بر دور و عمق

¹ Chatter



شکل ۱۲. تأثیر نرخ پیشروی ابزار بر میزان تنش پسماند.



شکل ۱۱. تأثیر سرعت برشی بر میزان تنش پسماند.

نتایج بدست آمده در شکل ۱۳ گزارش شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سرعت برشی از ۸۰ تا ۱۲۰ متر بر دقیقه تنش‌های پسماند بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش سرعت پیشروی، محدوده حداکثر تنش پسماند (از ۴۰۰ تا ۵۵۰ مگا پاسکال) در عمق‌های برشی بالاتری بوجود می‌آید. همانگونه که مشاهده شد تغییرات سرعت برشی، عمق برش و نرخ پیشروی ابزار بر میزان تنش‌های پسماند در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. میزان تنش پسماند ذخیره شده به دلیل بارهای مکانیکی و بارهای حرارتی بوجود آمده در اثر فرآیند ماشینکاری است.

در فرآیندهای ماشینکاری تغییر شکل‌های پلاستیکی مکانیکی که به دلیل تماس ابزار با قطعه کار رخ می‌دهد، منجر به ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعه‌کار می‌شود. همچنین افزایش ناگهانی دما در لایه‌های سطحی و زیر سطحی قطعه در حال ماشینکاری بارهای حرارتی را به دنبال دارد. این امر در نهایت با سرد شدن ناحیه تغییر شکل یافته متأثر از حرارت منجر به ذخیره تنش پسماند کششی در سطح قطعه ماشینکاری شده می‌گردد. در نهایت برآیند این بارها میزان و نوع تنش‌های پسماند ماشینکاری را مشخص می‌کند.

بر اساس نتیجه بدست آمده، افزایش نرخ پیشروی در محدوده مورد بررسی منجر به افزایش میزان تنش پسماند سطحی در فرآیند تراشکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ می‌گردد. لازم به ذکر است که حرارت بوجود آمده در ناحیه جلوی ابزار در اثر انتقال حرارت با محیط اطراف، ابزار، سطوح زیرین قطعه کار و براده توزیع می‌گردد. از آنجا که با افزایش نرخ پیشروی ضخامت براده تغییر شکل یافته نیز افزایش می‌یابد، سهم بیشتری از حرارت بوجود آمده به براده انتقال داده می‌شود. در واقع تغییر نرخ پیشروی ابزار سبب تغییر در فاکتور بخش‌بندی حرارت در ناحیه برشی می‌گردد [۲۶]. از طرف دیگر با افزایش میزان پیشروی، نرخ نفوذ ابزار به قطعه کار افزایش می‌یابد که این امر سبب افزایش بارهای حرارتی در ناحیه جلوی ابزار می‌گردد. در نهایت برآیند عوامل مذکور بسته به محدوده نرخ پیشروی مورد بررسی و سایر پارامترهای ماشینکاری از جمله سرعت برشی و عمق برش می‌تواند سبب افزایش بارهای حرارتی و تنش‌های پسماند کششی در سطح ماشینکاری گردد.

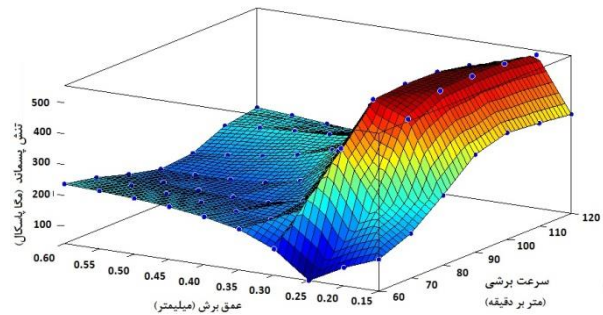
در ادامه به منظور بررسی بهتر اثر پارامترهای ماشینکاری، در هر مرحله پیشروی ابزار در وضعیت ثابتی در نظر گرفته شد و بطور همزمان تأثیر عمق برش و سرعت برشی بر میزان تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه گیری

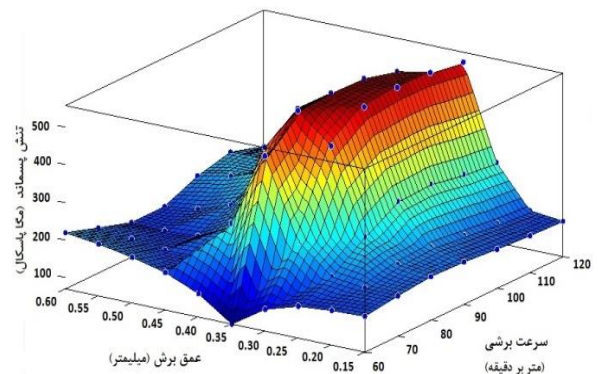
در این تحقیق با استفاده از مطالعات تجربی به بررسی میزان تنش پسماند سطحی در فرآیند تراشکاری نهایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد. برای این منظور با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به تخمین میزان تنش پسماند پرداخته شد. نتایج بدست آمده در این تحقیق به شرح زیر مطرح می‌گردد:

- آزمایشات تجربی بر روی ۳۲ نمونه در شرایط مختلف سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برشی ماشینکاری صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که وضعیت تنش پسماند سطحی در تمامی شرایط نامطلوب بوده و از نوع کششی است.
- به منظور افزایش دقت و کارایی شبکه عصبی از روش جدیدی که شامل ترکیبی از روش اعتبار سنجی تقاطعی و الگوریتم تکاملی جهت انتخاب بهترین ساختار شبکه استفاده شد. همچنین در ادامه شبکه عصبی با ساختار منتخب، توسط الگوریتم ژنتیک آموزش داده شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که بر خلاف پیچیدگی بالای تابع تنش پسماند، روش بکار گرفته شده از دقت و کارایی بالایی برخوردار است و میزان خطای آموزش و آزمایش شبکه پایین گزارش شد. این امر نشان دهنده‌ی آموزش صحیح و به اندازه شبکه عصبی است.
- نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که افزایش سرعت برشی تا حدود ۱۰۰ متر بر دقیقه منجر به افزایش میزان تنش پسماند می‌شود و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین افزایش عمق برش تا حدود ۰/۲۵ میلی‌متر منجر به کاهش تنش پسماند شد و بعد از آن با افزایش عمق برش میزان تنش پسماند افزایش یافت. افزایش نرخ پیشروی ابزار نیز منجر به افزایش میزان تنش پسماند سطحی گردید.

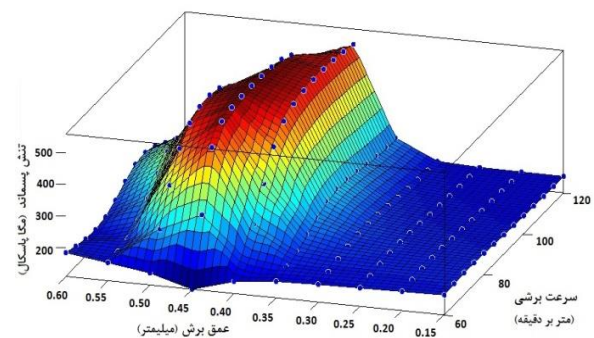
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۱۳. تأثیر سرعت برشی و عمق برش بر میزان تنش پسماند در سرعت‌های پیشروی (الف) ۰/۱۵ (ب) ۰/۲۵ (ج) ۰/۳۵ متر بر دقیقه.

بارهای مذکور بسته به شرایط ماشینکاری و جنس قطعه‌کار متفاوت است و همان گونه که در این تحقیق گزارش شد منجر به تغییرات خطی و یا غیر خطی در میزان تنش پسماند می‌گردد.

خروجی(های) سایر فرآیندهای ماشینکاری نیز توصیه می‌گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله صمیمانه از حمایت مالی (به ارزش ۲۰ میلیون تومان) مسئولین محترم صنعت هوایی کشور (صنعت ساخت موتوها و قطعات توربینی-صنعت سمت) تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین از راهنمایی علمی جناب آقای دکتر کاشانی بزرگ دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تهران جهت اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش اشعه ایکس که بعد از مدت‌ها در داخل کشور تحقق پذیرفت، کمال تشکر و احترام را دارند. همچنین از مسئولین محترم شرکت خصوصی نانو کفا جهت استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس نهایت تشکر را دارند.

- نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش سرعت برشی از ۸۰ تا ۱۲۰ متر بر دقیقه در برخی از عمق‌های برشی و سرعت‌های پیشروی، تنش‌های پسماند بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در واقع مشاهده شد که با افزایش همزمان سرعت پیشروی و عمق برش، حداکثر تنش پسماند در محدوده سرعت‌های برشی مزبور بوجود می‌آید.
- مقایسه بین پارامترهای ماشینکاری مورد بررسی نشان داد که تغییرات سرعت برشی بالاترین تأثیر را در میزان تنش پسماند سطحی دارد. همچنین عمق برش نیز تأثیر بیشتری از نرخ پیشروی ابزار در بوجود آمدن تنش پسماند دارد.
- کمترین مقدار تنش پسماند در آزمایشات تجربی به میزان ۸۱ مگاپاسکال و در سرعت برشی ۶۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۲۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰/۳ میلی‌متر بدست آمد. در حالی که کمترین مقدار تنش پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی در حدود ۴۵ مگاپاسکال و در محدوده سرعت برشی ۶۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۱۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰/۲۵ میلی‌متر گزارش شد. این امر نشان می‌دهد با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی علاوه بر بررسی اثر پارامترهای ماشینکاری، شرایط ماشینکاری بهتری جهت کاهش تنش پسماند بدست آمد که در آزمایشات تجربی وجود نداشت. به منظور اطمینان از نتیجه مطلوب بدست آمده، یک آزمایش جدیدی مطابق با شرایط بهینه بدست آمده صورت پذیرفت و در نهایت میزان ۵۳ مگاپاسکال تنش پسماند گزارش شد.
- همخوانی مناسب بین کمترین میزان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و آزمایش جدید صورت پذیرفته، حاکی از کارآمدی مدل استفاده شده در این تحقیق است. لذا روش مذکور برای تخمین

12. L. Guerville, J. Vigneau, *Influence of machining conditions on residual stresses, Metal Cutting and High Speed Machining*, Kluwer Academic Plenum Publishers, (2002) 201–210.
۱۳. جلالی عزیز پور مهدی، نوروزی سلمان و سلیمی جزئی حمید رضا، ارزیابی تنش‌های پسماند در پوشش‌های حرارتی WC-Co با استفاده از سوراخکاری با تخلیه الکتریکی، علوم و مهندسی سطح، ۱۶ (۱۳۹۱) ۴۵–۵۳.
14. S. P. Paul, *X-ray Diffraction Residual Stress Techniques*, Metals Handbook, Metals Park: American Society for Metals, (1986) 380-392.
15. O. Anderroglu, *Residual stress measurement using X-ray diffraction*, [Master thesis], Texas A&M University, December, (2004).
16. M. E. Fitzpatrick, A. T. Fry, P. Holdway, F. A. Kandil, J. Shackleton, L. Suominen, *Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction, Issue 2*, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, United Kingdom, December, (2005).
17. A. R. C. Sharman, J. I. Hughes, K. Ridgway, *An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718 when turning*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 173, 2006, pp. 359–367.
18. A. M. Zain, H. Haron, S. Sharif *Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process*, Expert Systems with Applications 37 (2010) 4650–4659.
۱۹. امیرآبادی حسین، خلیلی خلیل، فورگی نژاد ابوالفضل و عاشوری جواد، مدل‌سازی برش شیشه با جت آب همراه با ذرات ساینده توسط شبکه عصبی و بهینه سازی زیری سطح با الگوریتم کرم شب تاب، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۳ (۱۳۹۲) ۱۲۳–۱۳۴.
20. T. Ozel, Y. Karpat, L. Figueira, P. J. Davim, *Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts*, Journal
- مراجع
1. J. P. Davim, *Machining of Hard Material*, First Ed, New York, Springer, (2011).
2. F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert, *Capability profile of hard cutting and grinding processes*, Ann CIRP, 54 (2005) 557–580.
3. J. P. Davim, *Surface Integrity in Machining*, First Ed, New York, Springer, (2010).
4. J. P. Davim, *Machining Fundamental and Recent Advances*, New York, Springer, (2008) 57-124.
5. D. Ulutan, T. Ozel, *Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51(2011) 250–280.
6. D. Dudzinski, A. Devillez, A. Moufki, D. Larrouque`re, V. Zerrouki, J. Vigneau, *A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel718 alloy*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44 (2004)439–456.
7. C. Schlauer, R. L. Peng, M. Ode`n, *Residual stresses in a nickel based super alloy introduced by turning*, Materials Science Forum, 404 (2002) 173–178.
8. R. S. Pawadea, S. Suhas, P. K. Joshia, *Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48 (2008) 15–28.
9. R. Arunachalam, M. A. Mannan, *Machinability of nickel-based high temperature alloys*, Journal of Machining Science and Technology, (2000) 127–168.
10. A. Devillez, G. Le Coz, S. Dominiak, D. Dudzinski, *Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity*, Journal of Materials Processing Technology, 211(2011) 1590–1598.
11. S. Derrien, J. Vigneau, *High speed milling of difficult to machine alloys, Proceedings of the First French and German Conference on High Speed Machining*, University of Metz, France, (1997).

- of Materials Processing Technology, 189(2007)192–198.
21. A. M. Zain, H. Haron, S. Sharif, *Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network*, journal of Expert Systems with Applications, 37(2010) 1755–1768.
 ۲۲. امیرآبادی حسین، عاشوری جواد و جعفریان فرشید،
بهینه سازی برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده
با استفاده از روش شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک،
مدلسازی در مهندسی، ۲۳(۱۳۸۹) ۲۵–۳۵.
 23. F. Jafarian, M. Taghipour, H. Amirabadi, *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, 27(2013) 1469-1477.
 24. F. Jafarian, H. Amirabadi, J. Sadri, *Integration of finite element simulation and intelligent methods for evaluation of thermo-mechanical loads during hard turning process*, Journal of Engineering Manufacture Part B, 227(2) (2013) 235–248.
 25. F. Jafarian, H. Amirabadi, J. Sadri, *Application of Multi-Objective optimization algorithm and Artificial Neural Networks at machining process*, The First Iranian International Conferences on Pattern Recognition and Image Analysis, Birjand, (2013).
 26. D. Umbrello, L. Filice, S. Rizzuti, F. Micari, *On the evaluation of the global heat transfer coefficient in cutting*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47 (2007) 1738–1743.