

پیش‌بینی پدیده چتر در فرایند داخل تراشی با استفاده از نتایج آزمون‌های عملی و شبکه عصبی مصنوعی

مریم خلیلی گشنیگانی^۱، منصور رفیعیان^{۲*} و محمد مهدی ابوترابی^۳

^۱ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرکرد، شهرکرد، ایران.

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

^۳ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶

چکیده

ماشین‌کاری فرایند پیچیده‌ای است که متغیرهای زیادی بر آن اثرگذار هستند. در میان آن‌ها، ارتعاش ابزار پدیده‌ای بحرانی است، چون باعث ایجاد خطاهای ابعادی غیرقابل قبول در قطعه‌کار و کاهش شدید عمر ابزار می‌شود. از آنجا که دینامیک ابزار و قطعه‌کار به پارامترهای زیادی وابسته است، پیش‌بینی ارتعاش ابزار با استفاده از روابط و فرمول‌ها مشکل است. در این تحقیق، ابتدا آزمون‌های داخل تراشی با پارامترهای مختلف انجام می‌شود که با استفاده از شکل سطح نهایی و تبدیل فوریه سریع و چگالی طیفی سیگنال شتاب، وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر مشخص شده است. سپس با نوشتن برنامه‌ای با نرم‌افزار متلب، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مختلف روی این نتایج، پردازش‌های مختلفی انجام شده تا پردازشی با بالاترین راندمان در بین آن‌ها، انتخاب و با استفاده از آن به پیش‌بینی پدیده چتر در این مجموعه آزمایشی خاص پرداخته شود. در نهایت، برای اعتبارسنجی نتایج، آزمون‌هایی طرح‌ریزی و انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پیش‌بینی پدیده چتر با درصد قابل قبولی به صورت صحیح انجام شده است.

کلمات کلیدی: پدیده چتر؛ شبکه عصبی مصنوعی؛ داخل تراشی؛ پیش‌بینی.

Prediction of Chatter Phenomenon in the Internal Turning Process Using the Results of Experimental Tests and Artificial Neural Network

M. Khalili¹, M. Rafeeyan^{2,*}, M. M. Abootorabi³

¹ Assis. Prof., Mech. Eng., Shahrekord Branch, Islamic Azad Univ., Shahrekord, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Yazd University, Yazd, Iran.

³ Assis. Prof., Mech. Eng., Yazd University, Yazd, Iran.

Abstract

Machining is a complex process that many variables affect it. The vibration of the tool is a critical phenomenon because it causes unacceptable dimensional errors on the segment and a drastic reduction in the life of the machine and its components. Because the dynamic of the tool and the work piece depends on many parameters, it is very difficult to predict the vibration of the tool by using relationships and formulas. In this research, at first, we performed internal tuning experiments with various parameters and shown the occurrence or non-occurrence of a chatter phenomenon using finishing surface shape, fast Fourier transform and spectral density of acceleration signal. Then, by writing a program in Matlab and using various artificial neural networks, we performed various processes to select the processing with the highest efficiency and used it to predict chatter phenomenon on this particular machine. Finally, the tests were designed and validated to confirm the results. The results show that the prediction of the chatter phenomenon, with acceptable percentages, is done correctly.

Keywords: First Word; Artificial Neural Network, Chatter Phenomena, Internal Turning, Prediction.

۱- مقدمه

فرایند براده‌برداری فلزات اغلب با ارتعاش بین قطعه‌کار و ابزار براده‌برداری همراه است. ارتعاشات در فرایند براده‌برداری می‌تواند از نوع آزاد، اجباری یا خودتحریک باشد. ارتعاشات خودتحریک که عامل اصلی در به‌وجود آمدن پدیده چتر است، انرژی خود را از اثر متقابل بین قطعه‌کار و ابزار براده‌برداری در طول فرایند ماشین‌کاری دریافت می‌کند. این نوع ارتعاشات باعث ناپایداری سیستم می‌شود و اغلب نامطلوب و کمتر کنترل‌پذیر است.

پدیده چتر، ارتعاش خودتحریکی است که در طی فرایندهای ماشین‌کاری اتفاق می‌افتد و موجب ناپایداری فرایند برش می‌شود. کاهش کیفیت سطح قطعه‌کار یا پرداخت نامطلوب سطح، دقت براده‌برداری غیر قابل قبول، سر و صدای بیش از حد، سایش شدید ابزار براده‌برداری و کاهش طول عمر ابزارها، آسیب دیدن ماشین‌ابزار، کاهش نرخ براده‌برداری، افزایش هزینه‌های تولید، هدر رفتن مواد اولیه و انرژی و کاهش شدید بازده برخی از آثار مخرب پدیده چتر هستند [۱].

تشخیص زود هنگام پدیده چتر به صورت عملی و برخط در فرایندهای ماشین‌کاری، از دیرباز مورد توجه محققان این علم بوده است. برای تشخیص پدیده چتر، روش‌های پردازش سیگنال، روش‌های تحلیل براده و روش‌های هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲].

روش‌های هوش مصنوعی امروزه در همه حوزه‌ها کاربرد دارد. هدف اصلی این ایده، ایجاد ساختارهایی جدید برای سامانه پردازش اطلاعات است. در این روش یک سری اطلاعات اولیه از سیستم گرفته و سپس پردازش لازم بر روی این اطلاعات در لایه‌های مختلف انجام می‌شود و در نهایت می‌توان با دادن داده‌های جدید نتایج را پیش‌بینی کرد [۱]. تانسل و همکاران [۳ و ۴]، سیگنال جابجایی ابزار را اندازه‌گیری کردند و با استفاده از دو شبکه عصبی برگشتی سه لایه، فرکانس طبیعی و فرکانس اختلاف فاز موج جابجایی را پیش‌بینی کرده و با مقایسه آن‌ها وقوع پدیده چتر را مشخص کردند. لی و همکاران [۵]، با تعیین نیروی برشی با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی برگشتی ۴-۱۱-۷-۲ و تعیین مقادیر بحرانی به پیش‌بینی پدیده چتر پرداختند. محمد حسین اسدیان و محمد رضا رازفر [۶]، برای پیش‌بینی

پدیده چتر از یک شبکه عصبی FFBP با الگوریتم آموزشی LM، به صورت چهار لایه ۲-۱۵-۸-۳ استفاده کردند. ورودی‌های این شبکه سرعت و عمق برش بودند و خروجی آن پایداری، مرز پایداری و عدم پایداری بودند. ابوزهرا و لانگ [۷]، برای فیلتر کردن سیگنال‌های صوت خروجی از میکروفن در فرایند تراش‌کاری از تحلیل موجک استفاده کردند، سپس با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی از نوع MLP که ورودی‌های آن سرعت، عمق و سیگنال صوت بود و خروجی آن جذر میانگین سیگنال صوت بود، به پیش‌بینی پدیده چتر پرداختند. کوتاهی و همکاران [۸]، با استفاده از یک شبکه عصبی RBF با ورودی‌هایی شامل پارامترهای برش و خروجی‌هایی شامل نیروها در سه جهت و زبری سطح به بررسی پایداری یا ناپایداری سیستم پرداختند. سالم و همکاران [۹]، برای بهینه‌سازی پارامترهای تراش، از یک شبکه عصبی مصنوعی با دو لایه مخفی ۴-۱۰-۱-۱ استفاده کردند که خروجی‌های آن مقدار نیرو و دمای برش بود. یومنتی و همکاران [۱۰]، برای تعیین زبری سطح از شبکه عصبی MLP با یک لایه مخفی ۱۲-۱۳-۱ استفاده کردند که ورودی‌های آن پارامترهای برش به همراه نیرو در سه جهت و خروجی آن زبری سطح است. شریواستاوا و همکاران [۱۱]-۱۳ در فرایند تراش‌کاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، ناحیه برش پایدار را به دست آوردند و با اعمال شبکه عصبی مصنوعی برگشتی با دو لایه مخفی ۳-۱۰-۵-۱ بر نتایج نمودارهای EEMD پدیده چتر را بررسی کردند؛ اما با اینکه شبکه عصبی به قدرتمندترین ابزار شبیه‌سازی برای بررسی ویژگی‌های دینامیک برش با توجه به دقت، انعطاف‌پذیری و سرعت محاسبه هنگام سنتز با الگوریتم‌های پیچیده تبدیل شده است، تنها اشاره‌ای کوتاه به آشکارسازی چتر با استفاده از شبکه‌های عصبی شده و آشکارسازی چتر با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی به طور مستقیم در منابع منتشر شده کم است. اغلب سیستم‌های نظارت بر شرایط ابزار بر اساس این شبکه‌ها در پیشینه تحقیقات به صورت برون‌خط بوده‌اند، به صورت برخط تست و یا اجرا نشده‌اند [۳].

در این تحقیق، آزمون‌های زیادی انجام شده است تا در آن‌ها پدیده چتر بررسی شود. در این آزمون‌ها دو حسگر شتاب عمود بر هم روی ابزار در راستای شعاعی نصب شده تا

احیاکننده شناخته می‌شود و مهمترین علت در ایجاد پدیده چتر به‌شمار می‌رود [۲].

۳- آزمون‌های عملی

۳-۱- تجهیزات مورد استفاده در آزمون‌ها

حسگر شتاب‌سنج مدل AP2037 No:5111 ساخت شرکت AP tech آمریکاست که شتاب را در راستای عمودی اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۱). دستگاه پالس، مدل 3560-B-020 ساخت شرکت B&K دانمارک، رابط بین حسگرها و محیط نرم‌افزار است (شکل ۲).



شکل ۱- حسگر شتاب‌سنج



شکل ۲- دستگاه پالس

نرم افزار دریافت داده‌ها، نرم‌افزار Time Data Recorder است که برای دریافت و ذخیره‌سازی سیگنال به شکل‌های مختلف می‌توان از آن استفاده کرد. ماشین تراش CNC مدل

با استفاده از سیگنال خروجی حسگرها و روش‌های مختلف پردازش سیگنال در حوزه فرکانس، پدیده چتر تشخیص داده شود. با داشتن نتایج آزمون‌های انجام شده با پارامترهای مختلف که خروجی آن‌ها وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر است و با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مختلف، روی این نتایج پردازش‌های مختلف انجام شده تا در نهایت پردازشی با بالاترین راندمان از بین آن‌ها انتخاب شود و با استفاده از آن به پیش‌بینی پدیده چتر پرداخته شود. سپس برای اعتبارسنجی نتایج، آزمون‌هایی طرح‌ریزی و انجام شده تا نتایج حاصل از برنامه شبکه عصبی راستی آزمایی شود که نشان می‌دهد پیش‌بینی‌های پدیده چتر با درصد قابل قبولی صحیح هستند.

با استفاده از نتایج این برنامه، می‌توان پارامترهای فرایند را قبل از شروع فرایند، به‌گونه‌ای انتخاب کرد که در طی فرایند، پدیده چتر رخ ندهد و قطعه کار معیوب نشود.

۲- پدیده چتر در فرایند داخل تراشی

در فرایند داخل تراشی، یک ابزار تک لبه، از سطح داخلی قطعه کار براده‌برداری کرده تا قطر داخلی آن افزایش یابد. در این حالت، قطر و طول سوراخ اولیه تعیین کننده اندازه ابزار داخل تراشی است. از جمله کارهایی که متخصصان به صورت تجربی برای کاهش ارتعاش در این فرایند انجام می‌دهند، می‌توان به مواردی همچون، انتخاب سرعت پایین، استفاده از ابزار با شعاع نوک کوچک‌تر، طول کوتاه‌تر و قطر بزرگ‌تر، قرار دادن یک وزنه روی قلم و تنظیم نوک ابزار کمی پایین‌تر از مرکز قطعه کار اشاره کرد.

ترکیب ماشین‌ابزار و قطعه کار سیستمی است که دینامیک پیچیده‌ای دارد و در شرایطی مشخص دچار ارتعاش می‌شود؛ بنابراین همه ماشین ابزارها در طول عمر خود، ارتعاش آزاد، ارتعاش اجباری و ارتعاش خود تحریک را تجربه می‌کنند [۱].

پدیده چتر در ماشین‌ابزارها به دو دسته اصلی، چتر اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود؛ چتر اولیه به‌خودی‌خود در فرایند براده‌برداری و به دلایلی همچون، اصطکاک بین ابزار و قطعه کار، اثر ترمومکانیکی در شکل‌گیری براده و یا به‌وسیله جفت شدگی مودها ایجاد می‌شود. چتر ثانویه در اثر احیاء سطح موجدار قطعه کار به‌وجود می‌آید که به‌عنوان چتر

روی دستگاه تراش نصب می‌شود (شکل ۴)؛ همچنین برای کم کردن اثر ارتعاش قطعه بر نتایج، قطعه‌ای به طول ۸ سانتی‌متر جدا شده که کاملاً داخل فک‌های سه‌نظام که از نوع نرم هستند، قرار می‌گیرد. برنامه لازم در نرم‌افزار دستگاه نوشته و پارامترهای متغیر در هر آزمون برای دستگاه تعریف می‌شود. از طرفی حسگرها به ورودی‌های شماره ۲ و ۳ دستگاه پالس متصل می‌شوند و خروجی دستگاه نیز به رایانه‌ای متصل می‌شود که نرم‌افزار Time Data Recorder روی آن نصب است. در هر مرحله چند آزمون با متغیرهای مختلف انجام و با شروع هر مرحله، دکمه شروع داده‌برداری در نرم‌افزار نیز زده شده تا به طور اتوماتیک داده‌ها ثبت شوند.



شکل ۳- ماشین تراش CNC

TCN 10 که ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز است، برای انجام فرایندهای داخل‌تراشی استفاده شده است (شکل ۳). در این تحقیق هر کدام از ابزارها با یک شماره نشان داده می‌شود که این شماره به همراه مشخصات ابزارهای استفاده شده در جدول ۱ ذکر شده‌اند. مشخصات عمومی قطعه‌کارهای استفاده شده که به شکل استوانه هستند، در جدول ۲ ذکر شده است. ابزار از دو قسمت بدنه ابزار و تیغچه تشکیل شده است. خواص مکانیکی مربوط به این دو قسمت در جدول ۳ ارائه شده است.

۳-۲- طرح‌ریزی آزمون‌های اصلی

۲۶۴ آزمون داخل‌تراشی با ابزارهای جدول ۱، پارامترهای متغیر جدول ۴ و در حالت خشک برای تراش متعامد انجام شده است.

۳-۳- مراحل انجام آزمون

پس از نصب دو حسگر اندازه‌گیری شتاب روی ابزار داخل‌تراشی که یکی در راستای نوک ابزار و دیگری عمود بر آن در جهت شعاعی هستند، ابزار روی ابزارگیر و ابزارگیر

جدول ۱- مشخصات ابزارها

شماره	۱	۲	۳
مدل ابزارگیر	VORGEN-S12K SDUCL 07	VORGEN-S16Q SDUCL 11	VORGEN-S20R SDUCL 11
طول کل ابزار (mm)	125	180	190
قطر بدنه ابزار (mm)	12	16	20
فاصله نوک ابزار تا ابزارگیر (mm)	93	135	146
فاصله حسگرها تا ابزارگیر، s (mm)	23	31.5	42
مدل تیغچه	STORM DCGT070202-H01	STORM DCGT11T304 AL H01	STORM DCGT11T304 AL H01
هندسه تیغچه	لوزی شکل	لوزی شکل	لوزی شکل
شعاع نوک تیغچه (mm)	0.2	0.4	0.8

جدول ۵- خواص ارتعاشی ابزارها

شماره ابزار	فرکانس عرضی طبیعی با میرایی اول (Hz)	نرخ میرایی
۱	۱۰۱۸	۰٫۴۵
۲	۵۸۴	۰٫۲۹
۳	۵۶۰	۰٫۳۴

شتاب‌سنج‌ها ذخیره می‌شود. با استفاده از تبدیل فوریه این سیگنال، می‌توان فرکانس طبیعی با میرایی مجموعه ماشین و ابزار را به دست آورد [۱۴].

همچنین با داشتن کاهش لگاریتمی دامنه، با استفاده از رابطه (۱) می‌توان نرخ میرایی را برای این ابزارها محاسبه کرد [۱۴].

$$\ln\left(\frac{x_{i+1}}{x_i}\right) = -\zeta\omega_n(t_{i+1} - t_i) = -\zeta\frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}}(t_{i+1} - t_i) \quad (1)$$

x_i : دامنه قله موج i ام

ζ : ضریب میرایی

t_i : زمان قله موج i ام

برای کاهش خطاهای اندازه‌گیری، هر آزمون بیش از ده بار تکرار شده است. نتایج حاصل از این آزمون‌ها، در جدول ۵ ارائه شده‌اند و نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافتی برای ابزار شماره ۳، در شکل ۵ در حوزه زمان و فرکانس نشان داده شده است.

۳-۵- تشخیص وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر

معمولاً در عمل مرز بین وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر و زمان وقوع آن به وضوح قابل تشخیص نیست، اما از آنجایی که در این مقاله وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر مهم است، لذا برای تشخیص بهتر آن، در هر آزمون سه روش استفاده شده است؛ ۱- از ظاهر سطح قطعه‌کار ۲- از تبدیل فوریه سیگنال شتاب ۳- از تابع چگالی طیفی سیگنال شتاب [۱۵].

در پدیده‌هایی مانند ارتعاش و چتر، اطلاعات سیگنال‌ها در محتوای فرکانسی سیگنال‌ها اطلاعات مفیدتری را نسبت به محتوای زمان دارد؛ بنابراین روش‌های تبدیل سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس مورد توجه قرار می‌گیرد. دو روش پرکاربرد در حوزه فرکانس، تبدیل فوریه و چگالی طیفی

جدول ۲- مشخصات قطعه‌کار

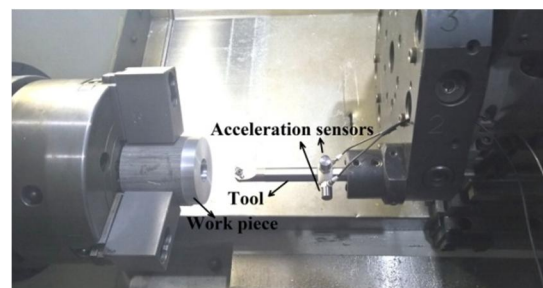
جنس	قطر خارجی (mm)	طول (mm)
آلومینیم 7075	۸۰	۸۰

جدول ۳- خواص مکانیکی ابزار [۱۴]

نوع	جنس	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (N/mm ²)	ضریب پواسون
ابزارگیر	Alloy Steel	۷۸۵۰	2.1×10^5	۰٫۳
تیغچه	Tungsten carbide	۱۵۸۰۰	5.343×10^5	۰٫۲۸

جدول ۴- مقادیر پارامترهای متغیر آزمون‌ها

پارامتر	مقادیر
سرعت اسپیندل (rpm)	۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰
نرخ پیشروی (mm/rev)	۰٫۲۵، ۰٫۳۵، ۰٫۴۵، ۰٫۵۵، ۰٫۶۵، ۰٫۷۵، ۰٫۸۵، ۰٫۹۵، ۱٫۰۵
عمق برش (mm)	۰٫۲۵، ۰٫۳۵، ۰٫۴۵، ۰٫۵۵، ۰٫۶۵، ۰٫۷۵، ۰٫۸۵، ۰٫۹۵، ۱٫۰۵



شکل ۴- موقعیت شتاب‌سنج و ابزار بر روی ماشین تراش

۳-۴- آزمون‌های عملی برای محاسبه خواص دینامیکی ابزار

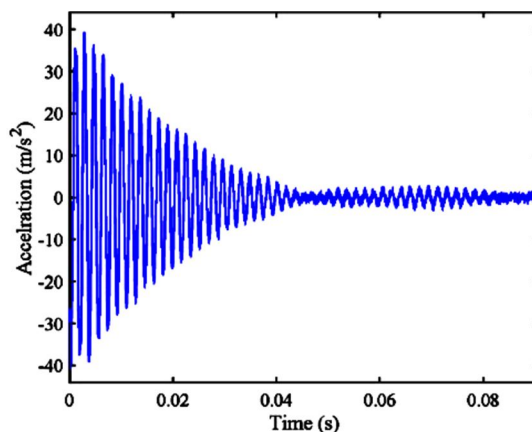
ابتدا آزمون‌هایی برای تعیین ضریب سختی و نرخ میرایی ابزارها انجام می‌شود. برای این کار، حسگر شتاب روی ابزار نصب و پس از نصب ابزار روی ابزارگیر، در چند مرحله، ضربه‌هایی به ابزار وارد و سیگنال‌های شتاب دریافتی از

آزمون با مشخصات جدول ۶ برای نمایش در این بخش انتخاب شده‌اند.

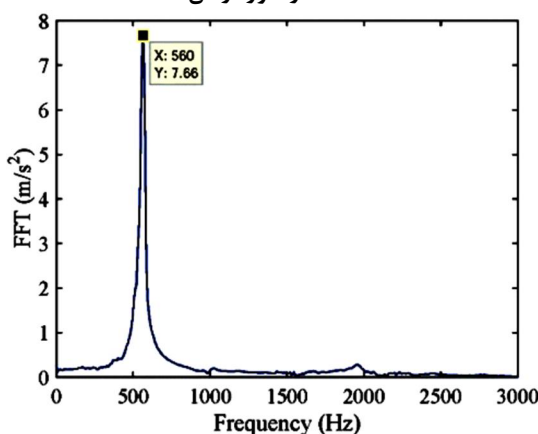
در شکل ۶ سطح مقطع قطعه‌کار برای دو آزمون انتخاب شده نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ مشخص است، زمانی که پدیده چتر رخ نمی‌دهد، سطح قطعه‌کار کاملاً صاف و صیقلی است؛ اما زمانی که پدیده چتر رخ می‌دهد، روی سطح موج‌های منظمی ایجاد می‌شود.

شکل ۷، نمونه‌ای از نتایج آزمون‌هایی است که در آن‌ها پدیده چتر رخ نداده و شکل ۸، نمونه‌ای از آزمون‌هایی است که پدیده چتر در آن‌ها اتفاق افتاده است.

در قسمت الف شکل‌های ۷ و ۸، تاریخچه زمانی سیگنال (خروجی حسگر بر حسب زمان) برای دو آزمون نشان داده شده است؛ همچنین این شکل‌ها نشان می‌دهد که دامنه سیگنال شتاب، زمانی افزایش می‌یابد که پدیده چتر رخ می‌دهد. این سیگنال‌ها در پردازش‌های بعدی به عنوان ورودی استفاده شده‌اند. قسمت ب شکل‌های ۷ و ۸، تبدیل فوریه سریع سیگنال شتاب بر حسب زمان را برای دو آزمون نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، در حالتی که پدیده چتر رخ نداده است، تمام فرکانس‌ها با دامنه‌های تقریباً یکسانی در سیگنال وجود دارند، اما زمانی که پدیده چتر رخ می‌دهد، دامنه در یک فرکانس خاص افزایش چشمگیری پیدا می‌کند که این فرکانس بسیار نزدیک به فرکانس طبیعی اول مجموعه ماشین و ابزار است. قسمت پ از شکل‌های ۷ و ۸، نمودار چگالی طیفی را برای دو آزمون



(الف) در حوزه زمان



(ب) در حوزه فرکانس

شکل ۵- سیگنال شتاب آزمون ضربه برای ابزار شماره ۳

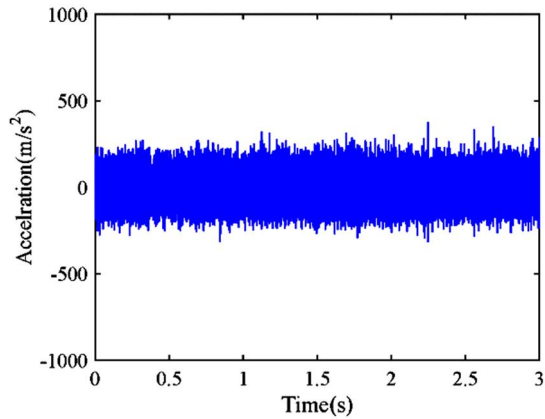
هستند. تبدیل فوریه یک تبدیل انتگرالی است که سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل می‌کند. چگالی طیفی، روشی برای تحلیل تابع در حوزه فرکانس است که از تابع خودهمبستگی، تبدیل فوریه پیوسته می‌گیرد. از آنجا که در پدیده چتر دامنه در فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی مجموعه ماشین و ابزار افزایش می‌یابد، لذا این دو روش برای تشخیص آن مفید هستند [۱۵].

سیگنال شتاب حسگر نصب شده در راستای نوک ابزار که در هر آزمون ثبت شده، برای روش‌های مختلف پردازش سیگنال مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیگنال‌های شتاب حسگر دوم نیز همین نتایج را تصدیق می‌کند [۱۶]. در همه آزمون‌ها از این روش‌ها استفاده شده است، اما از آنجا که نتایج مشابه است، نتایج دو

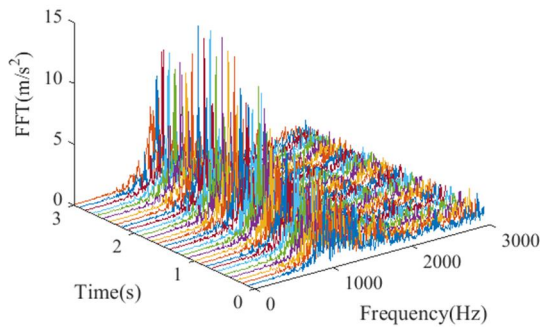
جدول ۶- پارامترهای متغیر دو آزمون انتخاب شده

شماره آزمون	۱	۲
سرعت برشی (m/s)	۱,۰۶۵۵	۲,۱۴۴۱
نرخ پیشروی (mm/rev)	۰,۰۷۵	۰,۰۵
عمق برش (mm)	۰,۲۵	۰,۵۰
قطر داخلی قطعه‌کار (mm)	۱۸,۵	۳۱,۵
شماره ابزار	۳	۳
حالت	عدم وقوع پدیده چتر	وقوع پدیده چتر

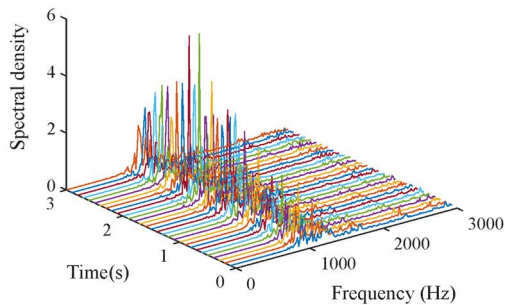
در جدولی مشابه جدول ۷ ثبت شدند. در جدول ۷ نتایج برای ۱۰ آزمون از آزمون‌های انجام شده، برای نمونه نشان داده شده است. در این جدول عدد صفر، نشان‌دهنده عدم وقوع پدیده چتر و عدد یک، نشان‌دهنده وقوع پدیده چتر است.



(الف) سیگنال اصلی در حوزه زمان

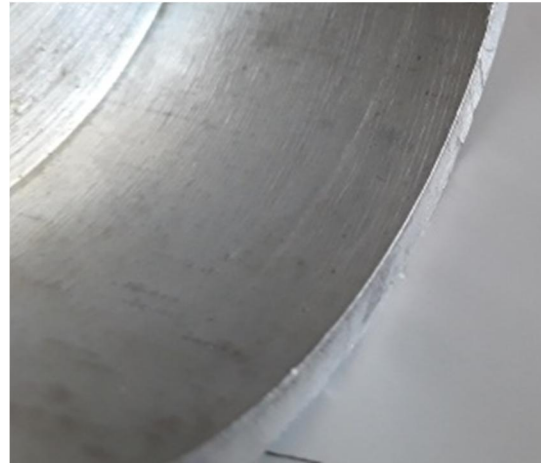


(ب) تبدیل فوریبه سریع سیگنال در حوزه فرکانس

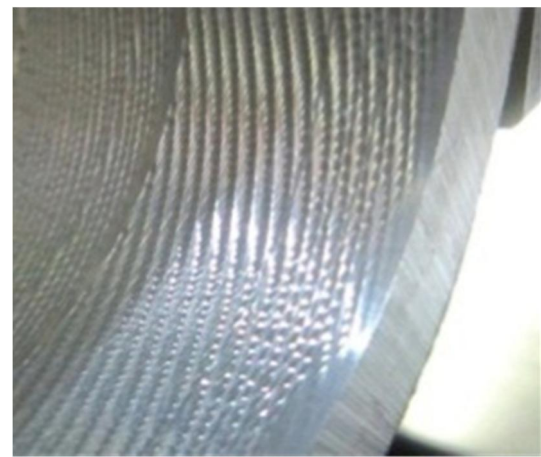


(پ) تابع چگالی طیفی سیگنال در حوزه فرکانس

شکل ۷- سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده در آزمون شماره ۱



(الف)



(ب)

شکل ۶- سطح قطعه‌کار در دو آزمون الف- عدم وقوع پدیده چتر ب- وقوع پدیده چتر

نشان می‌دهد که همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، نمودار چگالی طیفی نیز مانند تبدیل فوریبه به خوبی شروع پدیده چتر و فرکانس تشدید را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از پردازش سیگنال در همه آزمون‌هایی که پدیده چتر رخ نداده، مشابه شکل ۷ و نتایج حاصل از پردازش سیگنال در همه آزمون‌هایی که پدیده چتر اتفاق افتاده، مشابه شکل ۸ است.

۳-۶- نتایج حاصل از آزمون‌ها

پس از انجام همه آزمون‌ها، مشخص شد که در چه آزمون‌هایی پدیده چتر رخ داده و در چه آزمون‌هایی پدیده چتر رخ نداده است. این نتایج که مربوط به ۲۶۴ آزمون بود،

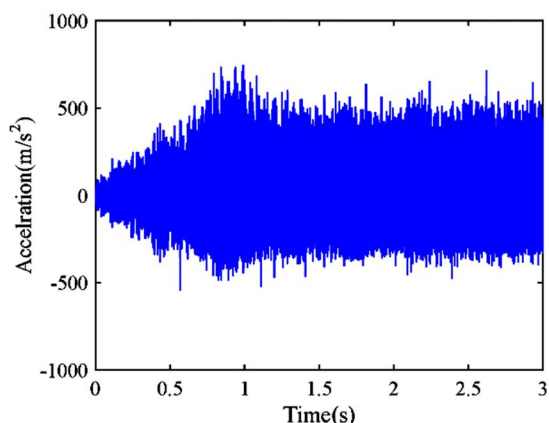
جدول ۷- مقادیر پارامترهای متغیر در آزمون‌ها

شماره آزمون	شماره ابزار	قطر داخلی قطعه‌کار (mm)	پیشروی (mm/rev)	سرعت (rpm)	عمق (mm)	حالت
۱	۱	۱۸٫۵	۰٫۲۵	۵۰۰	۰٫۲۵۰	۰
۲۷	۱	۲۳٫۵	۰٫۱۷۵	۹۰۰	۰٫۷۵۰	۱
۵۰	۱	۳۳٫۰	۰٫۲۰۰	۱۰۰۰	۱٫۲۵۰	۱
۱۰۳	۲	۳۰٫۰	۰٫۱۷۵	۸۰۰	۰٫۵۰۰	۰
۱۴۳	۲	۴۵٫۰	۰٫۰۷۵	۱۵۰۰	۱٫۲۵۰	۱
۱۶۵	۲	۵۹٫۵	۰٫۱۲۵	۱۵۰۰	۱٫۷۵۰	۱
۱۷۶	۲	۶۸٫۵	۰٫۱۵۰	۱۵۰۰	۲٫۰۰۰	۱
۱۹۰	۳	۳۰٫۰	۰٫۲۰۰	۷۰۰	۰٫۵۰۰	۱
۲۰۹	۳	۳۴٫۰	۰٫۲۵	۱۵۰۰	۰٫۷۵۰	۱
۲۲۶	۳	۳۹٫۵	۰٫۲۰۰	۱۰۰۰	۱٫۲۵۰	۱

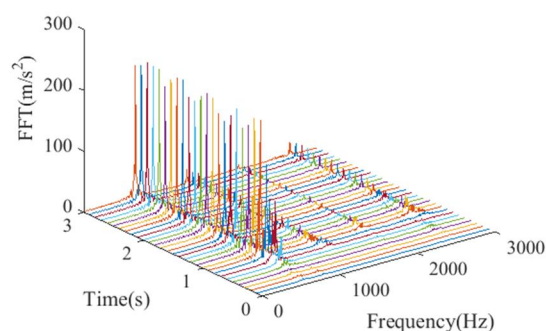
انتخاب بهینه تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی، این شبکه‌ها می‌توانند یک مدل غیر خطی با دقت زیاد را تخمین بزنند [۱۷]. در این تحقیق، برای ایجاد معماری شبکه MLP، برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب با استفاده از تابع newff نوشته شده است.

۴-۲- آموزش و تست شبکه

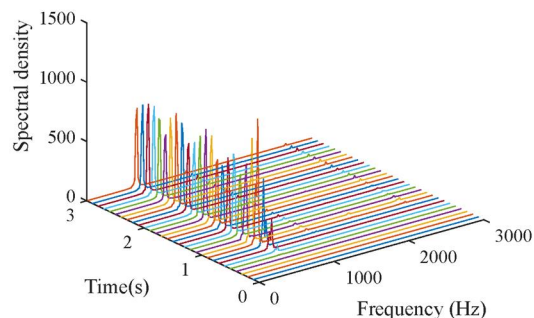
اولین گام در آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی، ارائه زوج‌های آموزشی (مجموعه ورودی‌ها و مجموعه هدف) مناسب است که با استفاده از آن بتوان شبکه عصبی مصنوعی را آموزش داد. در این تحقیق، طول ابزار، قطر ابزار، سرعت دورانی، نسبت پیشروی به عرض تیغچه، نسبت عمق به شعاع تیغچه و قطر داخلی قطعه‌کار ورودی‌های شبکه هستند. وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر، خروجی‌های برنامه هستند. این خروجی‌ها در برنامه، وقوع پدیده چتر با عدد یک و عدم وقوع پدیده چتر با عدد صفر نشان داده شده است. در توسعه شبکه‌های عصبی تعداد نرون در لایه ورودی معمولاً برابر با تعداد ورودی‌های شبکه است، اما تعداد نرون‌های لایه خروجی همواره برابر با تعداد خروجی‌های شبکه است.



الف) سیگنال اصلی در حوزه زمان



ب- تبدیل فوریبه سریع سیگنال در حوزه فرکانس



پ- تابع چگالی طیفی سیگنال در حوزه فرکانس

شکل ۸- سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده در آزمون شماره ۲

۴- شبکه عصبی مصنوعی

۴-۱- مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی

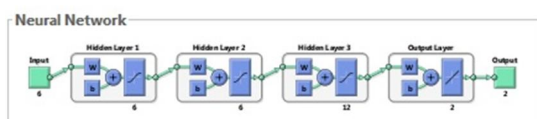
انواع مختلف شبکه‌های عصبی بر اساس آرایش نرون‌ها و معماری شبکه معرفی شده‌اند و روش‌های یادگیری و توابع تبدیل طبقه‌بندی‌های زیادی بیان شده‌اند، اما شبکه‌های MLP، یکی از کاربردی‌ترین شبکه‌های عصبی است. پس از

تشخیص داد که شبکه عصبی مصنوعی توسعه یافته می‌تواند به خوبی وقوع پدیده چتر را پیش‌بینی کند یا نه.

۵- نتایج و بحث

از آنجا که وقوع پدیده چتر در زمان کوتاهی اتفاق می‌افتد، لذا روش‌های شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص پدیده چتر مناسب نیستند، اما روشی بسیار کارآمد برای پیش‌بینی پدیده چتر هستند. روش بیان شده برای این دستگاه خاص، قبل از شروع فرایند مشخص می‌کند که فرایند پایدار خواهد بود یا نه. از ۲۱۰ آزمون مربوط به آموزش شبکه، نتایج ۲ آزمون نادرست بوده است. این بررسی نشان می‌دهد که در نتایج مربوط به آموزش شبکه ۹۹٪ و در آزمون‌های مربوط به تست شبکه (۵۴ آزمون) ۹۴/۴٪ نتایج به صورت صحیح پیش‌بینی شده است.

مشخصات آزمایش‌ها برای ۵۴ آزمون مربوط به تست شبکه در جدول ۸ نشان داده شده است. مشخص است که از ۵۴ آزمونی که برای آزمایش شبکه استفاده شده، فقط جواب سه آزمایش اشتباه پیش‌بینی شده است که نتیجه بسیار خوبی است.



شکل ۹- معماری شبکه عصبی

معماری‌های متعدد برای شبکه به روش سعی و خطا آزمایش شد که در نهایت شبکه‌ای با معماری ۲-۱۲-۶-۶ که دارای کمترین خطا بود، در نظر گرفته شده است. تعداد نرون لایه ورودی و خروجی از روی تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها تعیین می‌شود و تعداد نرون لایه پنهان با توجه به حداقل مقدار خطا مشخص شده است. لازم به ذکر است، طبق تئوری شبکه عصبی MLP تعداد نود در لایه خروجی باید با تعداد کلاس‌ها یکی باشد. در حالت دو کلاسی می‌توان یک نود یا دو نود در نظر گرفت که هر نود معادل یک کلاس است. در این تحقیق از حالت دو نود استفاده شده که دقت بالاتری دارد و به همین دلیل تعداد خروجی‌ها دو در نظر گرفته شده است. خروجی این دو نود به صورت اعداد حقیقی است که با توجه به اینکه مقدار کدام نود خروجی عدد بزرگتری است، وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر در برنامه تشخیص داده می‌شود (شکل ۹).

تابع تحریک مورد استفاده در لایه‌های میانی از نوع سیگموئید و تابع تحریک لایه خارجی از نوع purelin است. برای ایجاد شبکه، ۲۶۴ آزمون انجام شده است که نتایج ۲۱۰ آزمون برای آموزش شبکه و نتایج ۵۴ آزمون از آن‌ها برای آزمایش شبکه استفاده شده است.

پس از آموزش شبکه عصبی، برای اطمینان از کارایی آن، شبکه آزمایش می‌شود. برای این منظور، ۵۴ نمونه متفاوت از ۲۱۰ نمونه اولیه برای آزمایش شبکه به کار برده شد تا بتوان

جدول ۸- مقایسه نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبکه عصبی برای نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش شبکه عصبی

شماره	شماره ابزار	عمق براده‌برداری بر شعاع تیغچه	سرعت براده برداری	قطر داخلی قطعه کار	پیشروی بر عرض تیغچه	نتیجه آزمون‌های عملی	نتیجه شبکه عصبی
۱	۲	۰٫۱۶	۰٫۸	۰٫۲۹	۰٫۱۳	۱	۱
۲	۲	۰٫۴۸	۰٫۳	۰٫۹۱	۰٫۲۷	۰	۱
۳	۲	۰٫۲۹	۰٫۰	۰٫۴۹	۰٫۲۷	۰	۱
۴	۲	۰٫۱۶	۰٫۹	۰٫۳۲	۰٫۰۷	۱	۱
۵	۲	۰٫۲۳	۰٫۳	۰٫۳۹	۰٫۰۰	۱	۱
۶	۳	۰٫۱۶	۰٫۵	۰٫۵۵	۰٫۰۰	۱	۱

۱	۱	۰/۴۰	۰/۱۹	۱/۰	۰/۰۳	۲	۷
۱	۱	۰/۲۰	۰/۴۱	۰/۸	۰/۱۰	۳	۸
۱	۱	۰/۱۳	۰/۴۸	۱/۰	۰/۱۳	۳	۹
۰	۰	۰/۷۳	۰/۰۰	۰/۳	۰/۱۰	۱	۱۰
۱	۱	۰/۱۳	۰/۴۲	۰/۲	۰/۱۳	۳	۱۱
۱	۱	۰/۰۷	۰/۱۴	۱/۰	۰/۳۵	۱	۱۲
۱	۱	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۷	۰/۱۰	۲	۱۳
۱	۱	۰/۳۳	۰/۴۹	۰/۷	۰/۲۹	۲	۱۴
۱	۱	۰/۳۳	۱/۰۰	۱/۰	۰/۴۸	۲	۱۵
۱	۱	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۶	۰/۱۹	۳	۱۶
۱	۱	۰/۴۰	۰/۵۵	۰/۷	۰/۱۶	۳	۱۷
۱	۱	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۳	۰/۴۲	۲	۱۸
۱	۱	۰/۲۰	۰/۴۹	۰/۴	۰/۲۹	۲	۱۹
۱	۱	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۱	۰/۱۰	۲	۲۰
۰	۰	۰/۲۰	۰/۴۹	۰/۱	۰/۲۹	۲	۲۱
۱	۱	۰/۱۳	۰/۷۰	۰/۴	۰/۱۹	۳	۲۲
۱	۱	۰/۴۷	۰/۹۶	۰/۸	۰/۲۳	۳	۲۳
۱	۱	۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۴	۰/۰۰	۳	۲۴
۱	۰	۰/۳۳	۰/۶۰	۰/۰	۰/۳۵	۲	۲۵
۰	۰	۰/۲۰	۰/۶۰	۰/۲	۰/۳۵	۲	۲۶
۱	۱	۰/۴۷	۰/۲۹	۰/۱	۰/۶۱	۱	۲۷
۰	۰	۰/۴۰	۰/۲۳	۰/۳	۰/۱۰	۲	۲۸
۰	۰	۰/۶۰	۰/۴۸	۰/۹	۰/۷۴	۱	۲۹
۱	۱	۰/۰۷	۰/۳۶	۰/۲	۰/۱۰	۳	۳۰
۱	۱	۰/۰۷	۰/۷۴	۰/۵	۰/۴۲	۲	۳۱
۰	۰	۰/۴۷	۰/۲۴	۰/۸	۰/۴۸	۱	۳۲

۰	۰	۰,۳۳	۰,۱۸	۰,۳	۰,۰۳	۲	۳۳
۱	۱	۰,۰۷	۰,۲۶	۰,۸	۰,۰۳	۳	۳۴
۰	۰	۰,۶۰	۰,۳۵	۰,۸	۰,۶۱	۱	۳۵
۱	۱	۰,۱۳	۰,۳۶	۰,۱	۰,۱۰	۳	۳۶
۱	۱	۰,۱۳	۰,۱۸	۰,۶	۰,۰۳	۲	۳۷
۰	۰	۰,۰۷	۰,۲۹	۰,۴	۰,۶۱	۱	۳۸
۰	۰	۰,۴۷	۰,۵۵	۰,۳	۰,۸۷	۱	۳۹
۱	۱	۰,۸۷	۰,۷۱	۰,۱	۱,۰۰	۱	۴۰
۱	۱	۰,۲۰	۰,۹۱	۰,۴	۰,۴۸	۲	۴۱
۱	۱	۰,۲۷	۰,۲۳	۰,۵	۰,۱۰	۲	۴۲
۱	۱	۰,۴۰	۰,۷۰	۰,۰	۰,۱۹	۳	۴۳
۱	۱	۰,۱۳	۰,۶۰	۰,۳	۰,۳۵	۲	۴۴
۱	۱	۰,۰۰	۰,۳۲	۱,۰	۰,۱۶	۲	۴۵
۰	۰	۰,۳۳	۰,۰۰	۰,۶	۰,۱۰	۱	۴۶
۱	۰	۰,۲۰	۰,۱۸	۰,۵	۰,۰۳	۲	۴۷
۰	۰	۱,۰۰	۰,۷۹	۰,۸	۱,۰۰	۱	۴۸
۱	۱	۰,۴۷	۰,۲۶	۱,۰	۰,۰۳	۳	۴۹
۱	۱	۰,۲۷	۰,۵۵	۰,۱	۰,۱۶	۳	۵۰
۰	۰	۰,۸۷	۰,۴۸	۰,۷	۰,۷۴	۱	۵۱
۰	۰	۰,۴۰	۰,۹۱	۰,۱	۰,۴۸	۲	۵۲
۱	۱	۰,۲۷	۰,۳۱	۰,۶	۰,۰۶	۳	۵۳
۱	۱	۰,۳۳	۰,۷۰	۰,۱	۰,۱۹	۳	۵۴

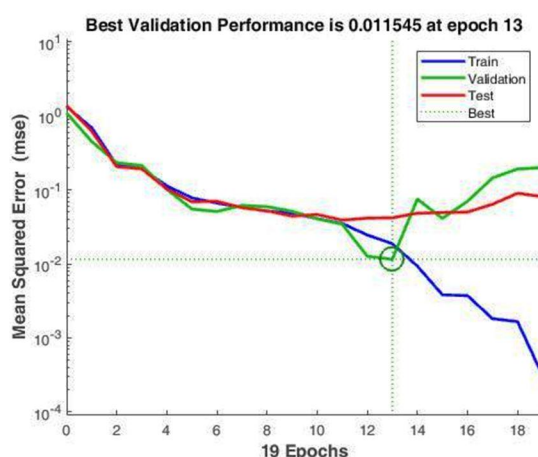
مجموعه دیگر در حال افزایش است. به همین دلیل برای پیشگیری از وقوع پدید overfitting برنامه متوقف شده است. این شکل مربوط به ۲۱۰ آزمون است که برای آموزش شبکه استفاده شده است که در آن ۱۴۷ آزمون یعنی ۷۰٪ نمونه‌ها برای آموزش، حدود ۳۲ آزمون یعنی ۱۵٪ نمونه‌ها برای

در این شبکه ۶ تکرار بدون بهبود اجرای برنامه را متوقف می‌کند. شکل ۱۰ عملکرد شبکه را به صورت میانگین مربعات خطا بر حسب تعداد تکرار نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، دلیل قطع برنامه این است که در طی ۶ تکرار مختلف خطای مجموعه آموزشی در حال کاهش بوده، اما خطای دو

که پدیده چتر، پدیده‌ای مخرب است و باید توجه کرد که استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده در این پژوهش قبل از وقوع، پدیده چتر را پیش‌بینی می‌کند، بسیار مناسب است. با گذشت زمان و توسعه بانک اطلاعاتی دقت این روش قابل افزایش است.

۷- مراجع

- [1] Quintana G, Ciurana J (2011) Chatter in machining processes: A review. *Int J Mach Tools Manuf* 51(5): 363-376.
- [2] Siddhpura M, Paurobally R (2012) A review of chatter vibration research in turning. *Int J Mach Tools Manuf* 61: 27-47.
- [3] Tansel IN, Wagiman A, Tziranis A (1991) Recognition of chatter with neural networks. *Int J Mach Tools Manuf* 31(4): 539-552.
- [4] Tansel IN (1992) Modelling 3-D cutting dynamics with neural networks. *Int J Mach Tools Manuf* 32(6): 829-853.
- [5] BY Tarnq YS, Ma SC (1995) Modeling of the process damping force in chatter vibration. *Int J Mach Tools Manuf* 35(7): 951-962.
- [6] اسدیان اردکانی م ح، رازفر م ر (۱۳۸۸) پیش‌بینی وقوع پدیده چتر در فرایند فرزکاری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، بابل.
- [7] Abu-Zahra NH, Lange JH (2002) Tool chatter monitoring in turning operations using wavelet analysis of ultrasound waves. *Int J Adv Manuf Tech* 20: 248-254.
- [8] Kotaiah KR, Srinivas J, Babu K, Srinivas K (2010) Prediction of optimal cutting states during inward turning: An experimental approach. *Mater Manuf Process* 25: 432-441.
- [9] Saleem W, Zain-ul-abdein M, Ijaz H, Salmeen Bin Mahfouz A, Ahmed A, Asad M, Mabrouki T (2017) Computational analysis and artificial neural network optimization of dry turning parameters—AA2024-T351. *Appl Sci* 7(6): 642-663.
- [10] Umetne EZIM, Ali ZUOSK, Prevleko K (2014) Experimental design and artificial neural network model for turning the 50CrV4 (SAE 6150) alloy using coated carbide/cermet cutting tools. *Mater Tech* 48(2): 227-236.
- [11] Shrivastava Y, Singh B (2019) Stable cutting zone prediction in computer numerical control turning based on empirical mode decomposition and artificial neural network approach. *T I Meas Control* 41(1): 193-209.



شکل ۱۰- عملکرد شبکه عصبی برای ۲۱۰ نمونه

آزمایش شبکه و حدود ۳۱ آزمون یعنی ۱۵٪ نمونه‌ها برای اعتبار سنجی استفاده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدل شبکه عصبی مصنوعی از نوع MLP سه لایه انتشار برگشتی برای پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر در داخل تراشی آلایز آلومینیم ۷۰۷۵ در محدوده پرکاربرد پارامترهای تراش توسعه داده شده است. ورودی‌ها شامل طول ابزار، قطر ابزار، سرعت دورانی، نسبت پیشروی به عرض تیغچه، نسبت عمق به شعاع تیغچه و قطر داخلی قطعه کار هستند. بعد از آزمایش‌های زیاد و بر اساس سعی و خطا، مشخص شد معماری بهینه شبکه با سه لایه مخفی متشکل از ۶، ۶ و ۱۲ نرون برای پیش‌بینی پدیده چتر مناسب است. با توجه به صفر و یک بودن نتایج نهایی، فقط می‌توان خطای کل را اندازه‌گیری کرد که برای مجموعه تست ۹۴/۴٪ و برای مجموعه آموزش ۹۹٪ پیش‌بینی صحیح، نشان دهنده توانایی بالای شبکه در پیش‌بینی پدیده چتر است؛ همچنین مقایسه نتایج تجربی و نتایج شبکه عصبی مصنوعی توسعه داده شده، نشان دهنده قابلیت خوب پیش‌بینی شبکه عصبی مصنوعی توسعه یافته در طیف گسترده‌ای از داده‌ها با دستگاه CNC موجود در آزمایش‌ها است. نتایج به دست آمده از روش شبکه عصبی می‌تواند ابزار مناسب جهت ارزیابی پارامترهای تراش و یا تدابیر احتمالی جهت تغییر این پارامترها به گونه‌ای باشد که پدیده چتر اتفاق نیفتد. از آنجا

- [15] Khalili M, Rafeeyan M, Abootorabi MM (2019) The new approach to practical predicting and controlling the chatter phenomenon in the internal turning. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 5(4): 56-73. (in Persian)
- [۱۶] خلیلی م، رفیعیان م، ابوترابی م م (۱۳۹۴) بررسی تجربی اثر سرعت برشی بر ارتعاش چتر در فرایند داخل تراشی. نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش ۵۲-۳۹: ۴(۸).
- [۱۷] نگارستانی ا، ابوالبشیری م ح (۱۳۹۶) بهینه‌سازی فرایند فرزکاری انگشتی برای رسیدن به زبری سطح مینیمم با ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۹۱-۸۱: ۷(۲).
- [12] Shrivastava Y, Singh B (2018) Stable cutting zone prediction in CNC turning using adaptive signal processing technique merged with artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *Eur J Mech A-Solid* 70: 238-248.
- [13] Shrivastava Y, Singh B (2017) Application of EEMD in Determining Tool Chatter Behavior using ANN Approach. *Proceeding of 10th International conference on precision, Meso, Micro and Nano Engineering, December 07-09, Indian institute of technology madras, Chennai-600 036, India.*
- [14] Khalili M, Rafeeyan M, Abootorabi MM (2018) Quantitative analysis of forces in boring process and providing a new formula for calculation of tool-tip force. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 4(2): 10-23. (in Persian)