



استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک در بدست آوردن ماکزیمم پاسخ سیستم نامیزان

احسان رئیسی استبرق^{۱*}، سعید ضیایی راد^۲، حسین دهقان^۳

^۱ مربی، عضو هیات علمی دانشگاه جیرفت

آستاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

دیسک و پره سیستمی است که از تعداد مشخصی قطاع با خصوصیات هندسی و ماده یکسان تشکیل شده است. اما در عمل همواره اختلافات کوچکی در خصوصیات فیزیکی سیستم وجود دارد. این اختلافات می تواند ناشی از تولرانس های ساخت باشد. همچنین کارکرد زیاد سیستم و استهلاک ناشی از آن از دیگر عوامل بوجود آمدن نامیزانی در سیستم هستند. در اثر این پدیده، تفاوت های بسیار زیادی در پاسخ دینامیکی سیستم نسبت به حالت میزان ملاحظه می شود. در تحقیق حاضر از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک به عنوان روشی کارآمد، سریع و دقیق برای بدست آوردن ماکزیمم پاسخ فرکانسی سیستم دیسک و پره استفاده شده است. برای این کار، ابتدا مدل اجزاء محدود سیستم دیسک و پره در محیط نرم افزار انسیس ایجاد شد. پاسخ فرکانسی پره ها در حالت میزان بدست آمد. سپس طی دویست مرحله آزمایش برای دانسیته های متفاوت، ماکزیمم پاسخ سیستم نامیزان برای هر آزمایش استخراج گردید. در ادامه با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک ماکزیمم پاسخ فرکانسی محاسبه شد. همچنین با زده های بدست آمده برای حالت ماکزیمم پاسخ، مدل جدید در نرم افزار انسیس ایجاد شد و ماکزیمم پاسخ فرکانسی بتعیین گردید. مطابقت قابل قبول پاسخ بدست آمده از نرم افزار با پاسخ بدست آمده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، کارایی روش به کار رفته را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: شبکه عصبی؛ الگوریتم ژنتیک؛ ماکزیمم پاسخ فرکانسی؛ نامیزانی.

۱- مقدمه

و پره می شود. نامیزانی های کوچک در سیستم دیسک و پره می تواند پاسخ ارتعاشات سیستم را تا حد زیادی تغییر دهد. پره ای که در این حالت بیشترین دامنه پاسخ را متحمل می شود بدترین پره نام دارد. در بدترین پره، دامنه پاسخ دینامیکی سر پره نسبت به نقطه مشابه بقیه پره ها به مراتب

دیسک و پره سیستمی است که از تعداد مشخصی قطاع با خصوصیات هندسی و ماده یکسان تشکیل شده است. انحراف پارامترهای ماده تشکیل دهنده دیسک و پره، کارکرد زیاد و استهلاک باعث ایجاد نامیزانی های کوچک در سیستم دیسک

می‌باشد. ناپیوسته بودن بعضی از توابع و افتادن در نقاط بهینه محلی به جای مطلق، از دیگر ایرادات این روش‌ها می‌باشد. اصول روش‌های جستجوگر، محاسبه مقدار تابع به ازای مقدار عددی متغیرهاست. در این روش‌ها، ارزیابی با مقایسه مقدار عددی تابع هدف و یافتن سمت جستجو در راستای یافتن مقدار بهینه صورت می‌گیرد. با توجه به افزایش ابعاد مسائل و پیچیدگی آن‌ها، نمی‌توان از روش‌های بهینه‌سازی معمولی استفاده نمود. به همین دلیل علاقه در جهت استفاده از روش‌های ابتکاری مانند شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک، روش فازی و یا تلفیقی از آنها می‌باشد.

درمقایسه بین روش‌های مشتق‌گریز، الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر روش‌ها عملکرد مناسب‌تری دارد. برخی از مزایای الگوریتم ژنتیک عبارتند از:

- (الف) در هر مرحله از کار می‌توانیم الگوریتم را متوقف-کنیم، در این حالت نیز یک جواب مناسب خواهیم داشت.
- (ب) به راحتی می‌توانیم این الگوریتم‌ها را به صورت موازی بر روی چند پردازنده اجرا کنیم.
- (ج) فهم آسان و مجزا بودن.
- (د) پشتیبانی از بهینه‌سازی چندتابعی.
- (ه) همیشه یک جواب داریم که با گذشت زمان بهتر می‌شود.

(و) بهره‌برداری ساده از جواب قبلی.

(ز) انعطاف‌پذیر برای کاربردهای ترکیبی.



شکل ۱- سیستم دیسک و پره در یک توربین گازی

با توجه به مزایای الگوریتم ژنتیک، مسئله پیش رو، متغیرهای زیاد و فضای جستجوی گسترده در سیستم دیسک

بیشتر است. مطالعه حاضر، به تحلیل سیستم دیسک و پره همراه با وجود نامیزانی‌های کوچک در پره‌ها می‌پردازد.

شکل ۱ سیستم دیسک و پره در یک توربین گازی را نشان می‌دهد. این سیستم در موتور جت‌ها، هواپیماها، کمپرسورها و توربین‌های بخار و گاز نیروگاه‌ها کاربرد دارد.

در عمل تقارن دایره‌ای سیستم به دلیل وجود نامیزانی می‌تواند شکسته شود. نامیزانی موجود در سیستم دیسک و پره باعث شکست پره‌ها در اثر ارتعاشات، نقص کارکرد بهینه، برخورد پره‌های ثابت و متحرک در اثر پاسخ شدید و پدیده جداشدن مودها [۱] می‌گردد.

قبل از عملیات ساخت توربوماشین‌ها، پیش‌بینی پارامترهای اختلال ناشی از نامیزانی‌ها غیرممکن است. بنابراین محاسبه پارامترهای اختلال که منجر به بدترین پاسخ سیستم می‌شود، ضروری است. مسئله یافتن بدترین الگوی نامیزانی به صورت معادله (۱) فرموله می‌شود.

$$q^*(\delta) = \max(q_{bj}) \quad j = 1 \dots 24 \quad (1)$$

$$|\delta_j| \leq \mu$$

در معادله (۱)، q_{bj} دامنه پاسخ z امین پره تحت پارامترهای نامیزانی δ_j است. همچنین μ نشان‌دهنده محدودیت برای پارامترهای نامیزانی می‌باشد. معادله (۱) یک مسئله بهینه‌سازی است که نقطه ماکزیمم مطلق آن مطلوب است. در این مقاله نامیزانی‌های موجود در دانسیته پره‌ها بررسی می‌شود و این مسئله توسط شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک حل می‌گردد.

برای بهینه‌سازی از الگوریتم‌های مختلفی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها را می‌توان به سه روش کلی زیر تقسیم کرد:

۱. روش‌های مشتق محور^۱
۲. روش‌های جستجوگر
۳. روش‌های ابتکاری^۲

روش‌های مشتق محور، کارا و دارای سرعت بالا همگرایی هستند (در صورتی که گرادیان تابع هدف نسبت به متغیرها موجود باشد). مهمترین چالش‌های پیش روی این روش‌ها وجود مشکل مشتق‌گیری در هنگام افزایش تعداد متغیرها

¹ Gradient Based Methods

² Heuristic

استفاده وی از این المان، سازگاری و صحت این المان در مسائل با هندسه پیچیده بود. یو^۲ [۳] از المان هشت‌گره‌ای پوسته برای مدل دیسک و پره دو بعدی خود استفاده کرد. اما در بیشتر مطالعات قبلی مانند [۴ و ۵] و همچنین این مطالعه، از المان سه بعدی هشت‌گره‌ای شش وجهی بدلیل سادگی، قابلیت سازگاری و مرتبه نسبتاً بالا برای ضخامت‌های مختلف و هندسه‌های پیچیده استفاده شده‌است. وایتهد^۳ [۶] در سال ۱۹۶۶ از طریق یک تحلیل ریاضی به بررسی ماکزیمم پاسخ ارتعاشات سیستم دیسک و پره تحت وجود نامیزانی کوچک پرداخت. نتایج وی نشان داد که ماکزیمم پاسخ یک سیستم نامیزان‌شده‌ی دیسک و پره می‌تواند به مراتب بیشتر از پاسخ همان سیستم در حالت ایده‌آل یا میزان باشد. او در اولین مقاله خود ضریب $\frac{1}{2}(1 + \sqrt{N})$ را برای یک سیستم با N پره معرفی کرد، که این ضریب در واقع نسبت پاسخ بدترین پره به پاسخ همان پره در شرایط میزان و در حالت رزونانس است. او همچنین تأثیرات استهلاک مکانیکی را بر این پدیده بررسی کرد و بعد از ده سال، ضریب بدترین پاسخ خود را به شکل $\frac{1}{2}(1 + \sqrt{\frac{N}{2}})$ تصحیح کرد [۷].

پس از وایتهد، وگنر^۴ [۸] در سال ۱۹۷۶ از یک مدل جرم و فنر برای ارائه پره‌های توربین استفاده کرد که از طریق یک دیسک انعطاف‌پذیر با هم کوپله شده بودند. وی فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و پاسخ اجباری سیستم را محاسبه نمود. نتایج حاصل از تحقیق او با نتایج وایتهد تا حدی تطابق داشت.

دای و هانری^۵ [۹] در سال ۱۹۶۹ مدل متمرکز جرم و فنر خود را تحت نامیزانی تک پره^۶، نامیزانی متناوب^۷ و نامیزانی اتفاقی^۸ حل عددی و تست کردند. آن‌ها در مدل ۴۳ پره‌ای خود فاکتور ۲/۸۷ را برای نامیزانی تک‌پره

و پره، نسبت به دیگر روش‌ها، می‌توان الگوریتم ژنتیک را گزینه مناسبی در نظر گرفت.

در این مقاله، به‌منظور بررسی تأثیر نامیزانی‌های کوچک در سیستم دیسک و پره، ابتدا مدل اجزاء محدود سیستم دیسک و پره در محیط نرم افزار انسیس ایجاد شد و پاسخ فرکانسی پره‌ها در حالت میزان بدست آمد. سپس طی دو‌بست مرحله آزمایش برای دانسیته‌های متفاوت در یک بازه مشخص، ماکزیمم پاسخ سیستم نامیزان برای هر آزمایش بدست آمد. در ادامه با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک ماکزیمم پاسخ فرکانسی محاسبه شد. سپس با ده‌های بدست‌آمده مدل جدید در محیط نرم‌افزار انسیس ایجاد و ماکزیمم پاسخ فرکانسی آن رسم گردید.

از سال ۱۹۶۰ مطالعات وسیعی در زمینه نامیزانی پره‌ها انجام شده‌است. بیشتر این مطالعات بر اساس مدل‌های متمرکز بوده و از لحاظ صنعتی کاربرد زیادی ندارند. اساساً این مدل‌ها برای اثبات مفهوم کلی نامیزانی بکاررفته و کاربرد عملی کمتری دارند. همچنین تهیه این مدل‌ها و شبیه‌سازی پارامترها از مدل واقعی، مخصوصاً برای هندسه‌های پیچیده‌تر، یکی از اساسی‌ترین مشکلات این مدل‌ها می‌باشد. روش‌های زیادی برای مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های پیچیده وجود دارد. به‌طورکلی برای سیستم دیسک و پره دو روش عمده برای مدل‌سازی ریاضی در دسترس است: روش‌های پیوسته و روش‌های گسسته. کاربرد روش‌های پیوسته تنها برای مدل‌های بسیار ساده بوده و روش‌های گسسته برای کلیه مدل‌ها اعم از ساده و پیچیده قابل استفاده است. روش پارامترهای متمرکز و روش اجزاء محدود، دو روش اصلی گسسته‌سازی سیستم می‌باشد. برای دست‌یافتن به کاربردهای عملی، اخیراً از مدل‌های اجزاء محدود استفاده می‌شود. در این مقاله نیز برای مطالعه نامیزانی در سیستم‌های واقعی، روش اجزاء محدود استفاده شده که بهترین تکنیک برای مدل‌های بزرگ و صنعتی می‌باشد.

در مطالعات قبلی از روش‌ها و المان‌های مختلفی برای مدل‌سازی سیستم دیسک و پره استفاده شده‌است. راثو^۱ [۲] از المان سه بعدی بیست‌گره‌ای ایزوپارامتریک مکعبی برای مدل‌سازی سیستم واقعی دیسک و پره استفاده کرد. دلیل

² You

³ Whitehead

⁴ Wagner

⁵ Dye & Henry

⁶ Single Mistuning

⁷ Alternative Mistuning

⁸ Random Mistuning

¹ Rao

۲۰۰۵ در مدل اجزاءمحدود سیستم دیسک و پره که به روش جدیدی و بر اساس روش ترکیب مودهای تشکیل‌دهنده، کاهش یافته بود، از نامیزانی عمدی به‌منظور کاهش بدترین پاسخ استفاده کرد.

چیو^۸ [۱۹] در سال ۲۰۰۷ به‌صورت تحلیلی به بررسی ارتعاشات یک شفت همراه با پره‌هایی که از نظر طول نسبت به یکدیگر نامیزان شده بودند پرداخت. چان^۹ [۲۰] در سال ۲۰۱۰ از روش مونتہ کارلو و گرادیان مزدوج برای تحلیل نامیزانی در سیستم دیسک و پره استفاده کرد.

در دهه اخیر روش‌ها و ایده‌های جدیدی در زمینه بررسی نامیزانی سیستم‌های دیسک و پره شکل‌گرفته که بیشتر منجر به واقعی‌تر شدن و کم هزینه‌تر شدن محاسبات شده است. از آنجایی که مسائل مربوط به نامیزانی، مسائل بهینه‌سازی و غیرقابل پیش‌بینی هستند، به حل مکرر نیاز دارند و عملاً حل مدل‌های بسیار بزرگ و واقعی با کامپیوترهای بسیار قوی نیز امکان پذیر نمی‌باشد. به این ترتیب ایده استفاده از روش اجزاء محدود و روش‌های بهینه‌سازی شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک شکل گرفت تا مشکلات ناشی از حل مدل‌های متفاوت و زمان‌های طولانی حل را کاهش دهد. نوآوری این تحقیق، استفاده از شبکه عصبی برای بدست آوردن ماکزیمم پاسخ فرکانسی سیستم دیسک و پره به جای استفاده از نرم‌افزار انسیس است.

در این تحقیق، برای ساخت پره، ابتدا سطح مقطع پره به شکل ایرفویل ایجاد شد. سپس این سطح مقطع به اندازه ۹۰ میلی‌متر و تحت زاویه ۶۰ درجه در راستای خط عمود بر صفحه ایرفویل حجیم شد تا پره نهایی بدست آید. شکل ۲ پره ایجاد شده را نشان می‌دهد. سپس به‌طور مشابه بیست و چهار پره روی محیط دیسکی با شعاع داخلی ۲۰ میلی‌متر، شعاع خارجی ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ثابت و برابر با ۲۷ میلی‌متر ایجاد شد. مدل نهایی دیسک و پره در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای شبکه‌بندی مدل از المان سه بعدی هشت‌گره‌ای مکعبی و ایزوپارامتریک استفاده شده است. جدول ۱ خواص فیزیکی مدل را نشان می‌دهد [۲۱].

پیشنهاد نمودند. همچنین مطالعات آن‌ها برای یک مدل آماری خاص فاکتور ۲/۴۴ را ارائه داد.

اوینز^۱ [۱۰] نیز مطالعاتی را در مورد اثر نامیزانی اتفاقی و عمدی روی سیستم دیسک و پره انجام داد. در مدل او کوپلینگ بین پره‌ها و دیسک انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده بود. او در اولین مقاله خود در سال ۱۹۶۹ به بررسی مقادیر ویژه و شکل مودها پرداخت. همچنین تاثیر وجود نامیزانی اتفاقی را روی پاسخ اجباری سیستم تحت تحریک‌های معمول و هارمونیک در یک سیستم ۲۴ پره‌ای بررسی کرد. او همچنین در یک مدل ۳۴ پره‌ای دیگر به فاکتور افزایشی ۲۰٪ رسید. وی در ادامه کارهای خود، نشان داد که مجموعه‌ای از پره‌ها با مقدار ثابت انحراف تحت ترکیب‌بندی-های مختلف پاسخ‌های کاملاً متفاوتی می‌توانند داشته باشند [۱۱] و بیشترین پاسخ را در پره‌ای دانست که بیشترین انحراف را دارد که بعداً با نتایج آفولابی^۲ [۱۲-۱۴] مطابقت پیدا کرد.

یو [۳]، مدل متمرکز جرم و فنر خود را که پره‌های آن به واسطه فنر و دمپر کوپله شده بودند، با استفاده از یک مدل آماری خاص نامیزان کرد و برای اولین بار اثرات نامیزانی را در پارامترهای کوپلینگ قرارداد. وی توانست حالت‌های مختلف ترکیب‌بندی را برای هر انحراف حل عددی کند و به نتایج متفاوتی در رابطه با پاسخ بدترین پره برسد. او نشان داد که منحرف‌ترین پره همواره بیشترین پاسخ را ندارد. در سال‌های اخیر روش‌های بهینه‌سازی کارآمد و مدل‌های غیرخطی برای سیستم‌های تقارن دایره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۵].

پتروف^۳ و اوینز [۵ و ۱۶] روش جدیدی برای یافتن پاسخ پاسخ سیستم‌های بزرگ و نامیزان براساس پاسخ سیستم میزان ارائه کردند. همچنین بلاذ^۴، کاستانیر^۵ و کریستوف^۶ [۱۷] از روش ترکیب مودهای تشکیل‌دهنده برای کاهش مرتبه سیستم استفاده کردند. در ادامه لیم^۷ [۱۸] در سال

¹ Ewins

² Afolabi

³ Petrov EP

⁴ Bladh

⁵ Castanier

⁶ Christophe

⁷ Lim

⁸ Chiu

⁹ Chun

باشند. کروموزوم‌ها حاوی اطلاعاتی هستند که به تنهایی معنی خاصی نداشته و باید رمزگشایی شوند.

جدول ۱- خواص فیزیکی سیستم

واحد	مقدار	نماد لاتین	خواص فیزیکی
مگا پاسکال	2×10^5	E_0	مدول الاستیسیته اسمی
بدون واحد	۰/۲۵	ν	ضریب پواسون
کیلوگرم بر متر مکعب	$7/86 \times 10^3$	ρ_0	چگالی

در هر نسل تعدادی از عناصر جمعیت این فرصت را پیدا می‌کنند که تولید مثل کنند. به این عناصر که از میان جمعیت انتخاب می‌شوند، والدین می‌گویند. عمل انتخاب براساس یک تابع به اسم تابع شایستگی^۱ انجام می‌شود. کروموزومی که دارای شایستگی بالاتری باشد امکان انتخاب شدنش برای تولید نسل بعدی بیشتر است.

الگوریتم ژنتیک از عملگرهایی برای ایجاد کروموزوم جدید با استفاده از کروموزوم‌های والد استفاده می‌کند. این عملگرها، تقاطع^۲ و جهش^۳، که از ژنتیک طبیعی تقلید شده- شده‌اند، باعث می‌شوند که تقریب‌های بهتری از جواب نهایی بدست آید. تقاطع امکان ترکیب جوابهای جزئی و بدست آوردن جواب‌هایی با کیفیت بالاتر را فراهم می‌آورد. جهش برای بوجود آوردن فرزند فقط از یک والد استفاده می‌شود و باعث می‌شود که الگوریتم ژنتیک از بهینه‌های محلی فرار کند.

در مسئله بهینه‌سازی پیش‌رو، ۲۴ متغیر وجود دارد که به پارامترهای اختلال مربوط می‌شوند. برای انجام این تحلیل مشخصه‌های استفاده‌شده در الگوریتم ژنتیک بصورت جدول ۲ می‌باشد.

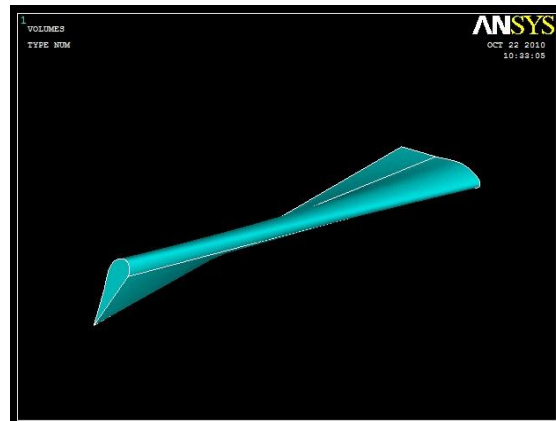
جدول ۲- پارامترهای استفاده‌شده در الگوریتم ژنتیک

۹۰٪	ادغام چند نقطه‌ای (Multipoint)	ترکیب (Crossover)
۳٪	تصادفی (Multi-nonuniform)	جهش (Mutation)
۲۰۰	-	تعداد نسل (population)

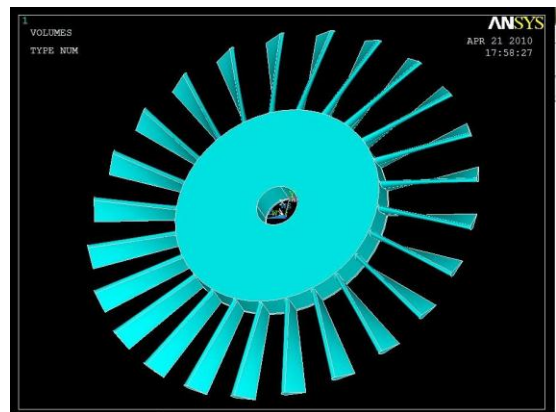
¹ Fitness

² Crossover

³ Mutation



شکل ۲- شکل نهایی پره مدل شده



شکل ۳- مدل اجزاء محدود کل سیستم

۲- آشنایی با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک را می‌توان به طور ساده یک روش جستجوگر نامید که بر پایه مشاهدات خصوصیات فرزندان نسل‌های متوالی و انتخاب فرزندان براساس اصل بقای بهترین، پایه‌ریزی شده‌است. الگوریتم ژنتیک با تقلید از قوانین موجود در علم ژنتیک روی جواب‌های مسئله در یک مرحله تأثیر کرده و به تولید جواب‌های نزدیک‌تر به هدف مسئله می‌پردازد [۲۲]. الگوریتم ژنتیک بوسیله مجموعه اولیه از راه‌حل‌های تصادفی که جمعیت اولیه نامیده می‌شود، شروع می‌گردد. هر کدام از افراد جمعیت که کروموزوم نامیده می‌شوند، تقریبی از جواب نهایی مسئله می‌باشند. کروموزوم‌ها که از ژن‌هایی تشکیل شده‌اند، یک جواب کامل برای مسئله بهینه‌سازی می-

$$z_i = \sigma \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} + w_{0i} \right) \quad 1 \leq i \leq h \quad (3) \text{ و } (4)$$

$$y_k = \sigma \left(\sum_{i=1}^h v_{ki} z_i + v_{0k} \right) \quad 1 \leq k \leq m$$

w_{ij} وزن‌های اتصالات بین لایه ورودی و لایه مخفی هستند، w_{i0} مقادیر آستانه سلول‌های عصبی مخفی هستند و v_{ki} وزن‌های اتصالات بین لایه مخفی و خروجی می‌باشند. حال می‌توان مقادیر خروجی را با استفاده از فرمول (۵) بدست آورد:

$$y_k = \sigma \left(\sum_{i=1}^h v_{ki} \sigma \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} + w_{0i} \right) + v_{0k} \right) \quad (5)$$

مجموعه نمونه یادگیری شبکه‌های عصبی پیش‌خور به صورت $A = \{(X^i + T^i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ می‌باشد که X^i ورودی شبکه عصبی و T^i خروجی مطلوب می‌باشد و با فرمول (۶) محاسبه می‌گردد. فرآیند یادگیری شبکه‌های عصبی پیش‌خور، بدست‌آوردن مقدار حداقل E است که با تنظیم وزن‌های اتصالات و مقادیر حد آستانه سلول‌های عصبی حاصل می‌گردد:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (Y_k^i - T_k^i)^2 \quad (6)$$

شبکه عصبی چند لایه با قاعده آموزش پس‌انتشار، دارای کاربرد زیادی در حل مسائل فنی مهندسی می‌باشد. در این مسئله نیز برای آموزش شبکه عصبی، از الگوریتم پس‌انتشار استفاده شده‌است. این الگوریتم از دو مسیر اصلی تشکیل می‌گردد. در مسیر اول که مسیر رفت نامیده می‌شود، بردارهای ورودی به شبکه اعمال می‌شود و تأثیرش از طریق لایه‌های میانی به لایه‌های خروجی انتقال می‌یابد. در مسیر دوم، مسیر برگشت، برعکس مسیر رفت، پارامترهای شبکه تغییر و تنظیم می‌گردد. تنظیم پارامترهای شبکه عصبی با قانون اصلاح خطا انجام می‌شود.

۴- تحلیل ارتعاشات اجباری سیستم دیسک و

پره

برای بدست‌آوردن پاسخ فرکانسی سیستم میزان، هر پره را می‌توان تحت نیروی واحد قرار داد. این نیرو در انتهای پره و

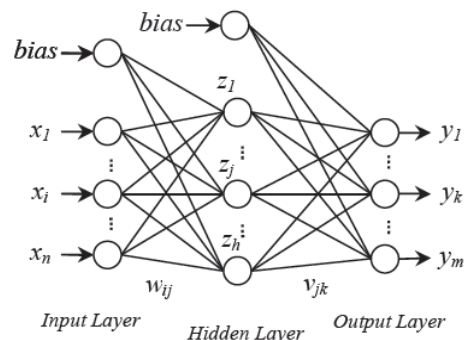
۳- آشنایی با شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی ایده‌ای برای پردازش اطلاعات می‌باشد که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش اطلاعات می‌پردازد. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی به نام نرون تشکیل شده که برای حل یک مسئله باهم هماهنگ عمل می‌کند. شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز مانند انسان‌ها با مثال یاد می‌گیرند. این شبکه‌ها با قابلیتی که در استنتاج داده‌های پیچیده یا مبهم دارند می‌توانند برای استخراج الگوها و شناسایی روش‌هایی که آگاهی از آن‌ها برای انسان و دیگر تکنیک‌های کامپیوتری پیچیده است، به کار گرفته شوند [۲۳].

شبکه‌های عصبی پیش‌خور نمونه‌ای از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشند که کاربرد زیادی دارند. در این مقاله از یک شبکه عصبی پیش‌خور سه لایه استفاده شده‌است که جزئیات آن در شکل ۴ نشان داده شده‌است. لایه خروجی خطی است و تابع عملیات غیر خطی سلول عصبی لایه پنهان، یک تابع شبه هذلولی است که در رابطه (۲) آورده شده‌است. مقادیر خروجی سلول‌های عصبی ورودی، همان مقادیر ورودی بدون هیچ تغییری هستند.

$$\sigma(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

با فرض اینکه مقادیر ورودی و خروجی سلول‌های عصبی لایه خروجی به ترتیب (x_1, x_2, \dots, x_n) و (y_1, y_2, \dots, y_m) باشند و مقادیر ورودی سلول‌های عصبی مخفی (z_1, z_2, \dots, z_h) و مقادیر خروجی آن (s_1, s_2, \dots, s_h) هستند



شکل ۴- ساختار یک شبکه عصبی پیش‌خور سه لایه

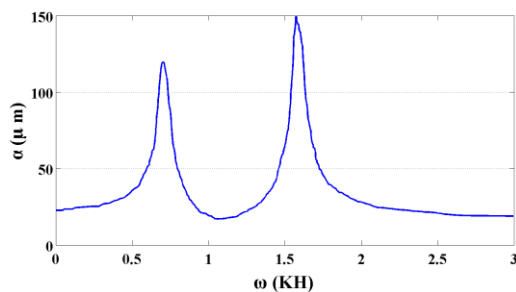
که از طریق فرمول‌های (۳) و (۴) بدست می‌آیند:

- (۴) محاسبه بدترین پاسخ به کمک الگوریتم ژنتیک
 (۵) ایجاد بدترین الگوی بدست‌آمده در نرم‌افزار انسیس
 و رسم پاسخ فرکانسی.

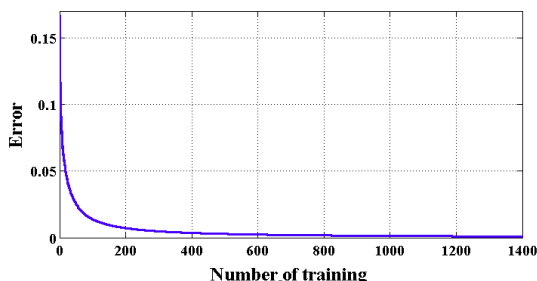
۶- نتایج عددی برای سیستم نامیزان

جهت همگرایی بهتر و رسیدن به حداقل خطا، آموزش شبکه‌عصبی در ۱۵۰۰ سیکل انجام شده‌است. با توجه به نمودار شکل ۶ ملاحظه می‌شود که مقدار خطا پس از حدود ۱۲۰۰ آموزش ثابت شده و مقدار آن تغییر چندانی نمی‌کند، که می‌توان نتایج را رضایت‌بخش دانست.

مهم‌ترین بخش در شبکه‌های عصبی، مرحله تست یا آزمایش شبکه است. در واقع در مرحله تست، عملکرد شبکه بررسی می‌شود. برای بررسی صحت آموزش شبکه‌عصبی، سه تست جدید به کمک نرم‌افزار انسیس و همچنین شبکه‌عصبی انجام شده و نتایج در جدول ۳ مقایسه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که جواب‌های شبکه آموزش داده شده با دقت قابل قبولی با جواب‌های بدست‌آمده از نرم‌افزار انسیس مطابقت دارند. از این مرحله به بعد از این شبکه به جای مدل المان-محدود استفاده می‌گردد.



شکل ۵- پاسخ فرکانسی سیستم در حالت میزان



شکل ۶- نمودار خطای آموزش شبکه‌عصبی

عمود بر صفحه سیستم دیسک و پره اعمال می‌شود. در ادامه به تحلیل هارمونیک سیستم پرداخته می‌شود.

همان‌طور که ذکر شد، المان مورد استفاده سه بعدی بوده و در نتیجه در هر گره سه درجه آزادی و در پی آن سه پاسخ در راستای x ، y و z بدست می‌آید. برای داشتن یک ضریب بزرگنمایی، α ، برای هر گره بدون وابستگی به دستگاه مختصات، از رابطه (۶) استفاده می‌شود که اوینز [۵] نیز در مقاله خود از آن استفاده کرده‌است:

$$\alpha_j = \sqrt{\frac{1}{2}(u_j^* u_j + |u_j^T u_j|)} \quad (7)$$

در رابطه (۶) بردار جابجایی یا پاسخ پره z ام می‌باشد. همچنین اندیس (*) نشان‌دهنده فرم الحاقی بردار یا همان مزدوج (از لحاظ مختلط بودن) و (T) ترانپوز می‌باشد. پارامترهای فیزیکی و المان‌بندی سیستم برای همه محاسبات ثابت و برابر با مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته شده‌است.

در شکل ۵ پاسخ فرکانسی سیستم در حالت میزان برای محدوده فرکانسی ۰ تا ۳ کیلوهرتز رسم شده‌است. ماکزیمم پاسخ حدود ۱۴۹/۵ میکرومتر به ازای نیروی یک نیوتن می‌باشد. همچنین در حالت میزان اندازه پاسخ برای همه پره‌ها یکسان است و تنها تفاوت در پاسخ، اختلاف فاز بین آن‌ها می‌باشد.

۵- ماکزیمم پاسخ فرکانسی برای وجود

نامیزانی در دانسیته پره‌ها

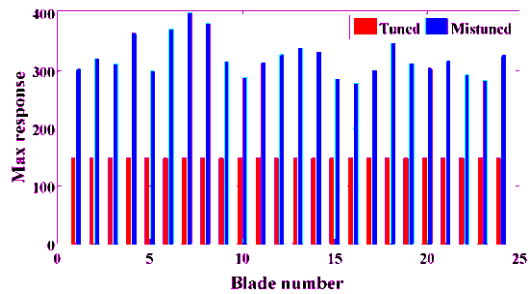
برای ایجاد نامیزانی در دانسیته پره‌ها از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\rho_j = (1 + \delta_j) \rho_0 \quad j = 1, 2, \dots, 24 \quad (8)$$

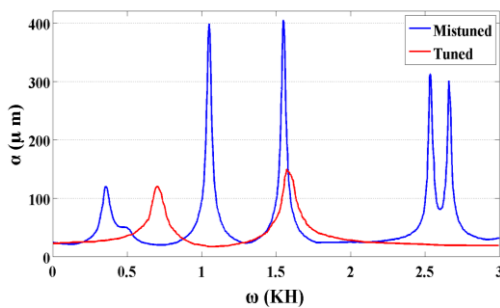
در رابطه (۷) مقادیر δ_j برای پره شماره j در بازه $[-0.05, 0.05]$ انتخاب می‌شود [۲۱]. مفهوم آن این است که تولرانس مجاز، μ ، در رابطه (۳) برای این سیستم برابر با ۰/۰۵ است. محدوده فرکانس تحریک بین ۰ و ۳ کیلوهرتز فرض شده‌است.

الگوریتم حل شامل موارد زیر است:

- (۱) ساخت مدل المان‌محدود در نرم‌افزار انسیس
- (۲) انجام ۲۰۰ آزمایش برای پارامترهای مختلف در بازه مشخص
- (۳) آموزش شبکه عصبی و تست آن



شکل ۸- ماکزیمم پاسخ مربوط به هر پره در بدترین الگوی نامیزانی



شکل ۹- پاسخ فرکانسی سیستم میزان و نامیزان در حالت بدترین الگو و برای بدترین پره

جدول ۴ خلاصه‌ای از نسبت بدترین پاسخ سیستم نامیزان به پاسخ سیستم میزان برای مدل‌های متفاوت را نشان می‌دهد. تفاوت موجود در بین نسبت‌ها به دلیل استفاده از مدل‌های مختلف و روش‌های حل متفاوت در هر مطالعه است.

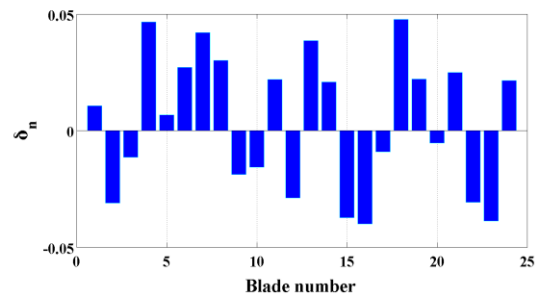
۷- نتیجه‌گیری

حل مدل‌های مختلف سیستم دیسک و پره با تعداد پرها و نامیزانی‌های متفاوت به کمک نرم‌افزار انسیس زمان‌بر می‌باشد. در این مقاله برای حل این مشکل شبکه عصبی به‌عنوان روشی کارآمد و سریع آموزش داده‌شد. به کمک شبکه آموزش داده‌شده می‌توان ماکزیمم پاسخ فرکانسی سیستم را بدست آورد. از این‌رو برای پیدا کردن ماکزیمم پاسخ توسط الگوریتم ژنتیک (که نیاز به حل مدل‌های مختلف دارد) دیگر نیازی به حل مدل‌های متفاوت در محیط انسیس نبوده و می‌توان برای بدست آوردن ماکزیمم پاسخ از شبکه عصبی استفاده کرد. بنابراین، در این مقاله شبکه عصبی و الگوریتم

جدول ۳- مقایسه نتایج بدست آمده از نرم‌افزار انسیس و شبکه عصبی

تست	۱	۲	۳
ماکزیمم دامنه از نرم-افزار انسیس	۳۱۱/۱۴	۳۵۰/۰۵	۳۳۲/۲۳
ماکزیمم دامنه از شبکه عصبی	۳۰۴/۲۹	۳۴۷/۶۰	۳۱۹/۶۱
اختلاف	۲/۲ %	۰/۷ %	۳/۸ %

جواب بدست آمده از الگوریتم ژنتیک برای بدترین پره برابر با ۳۹۶/۸۱ می‌باشد. بدترین الگوی محاسبه‌شده برای این سیستم در شکل ۷ رسم شده‌است.



شکل ۷- پارامترهای اختلال برای هر پره در بدترین الگو

در ادامه با δ های بدست آمده از الگوریتم ژنتیک مدل جدید در محیط انسیس ایجاد گردید و ماکزیمم پاسخ فرکانسی هر پره محاسبه شد.

شکل ۸ ماکزیمم پاسخ بدست آمده برای هر پره در نرم-افزار انسیس را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نکته قابل توجه در این شکل آن است که پره‌ای که بیشترین انحراف را دارد لزوماً بدترین پره نمی‌باشد. همین‌طور پره‌ای که کمترین انحراف را دارد لزوماً کمترین پاسخ را ندارد. ماکزیمم پاسخ بدست آمده از نرم‌افزار انسیس برای بدترین پره برابر با ۴۰۱/۷۳ می‌باشد (شکل ۹).

پاسخ فرکانسی سیستم میزان و نامیزان در حالت بدترین الگو برای بدترین پره در محدوده فرکانسی ۰ تا ۳ کیلوهرتز در شکل ۸ رسم شده‌است. منحنی رسم شده نشان می‌دهد که ماکزیمم پاسخ فرکانسی حالت نامیزان (که برابر با ۴۰۱/۷۳ می‌باشد) برابر ماکزیمم پاسخ فرکانسی حالت میزان (که برابر با ۱۴۹/۵۸ می‌باشد) است.

بیشترین پاسخ ممکن تحت یک الگوی نامیزانی محتمل و یک آرایش خاص از پره‌ها برای طراحی توربوماشین‌ها در عمل بسیار با اهمیت می‌باشد.

مراجع

- [1] Yoo HH, Kim JY, Inman DJ (2003) Vibration localization of simplified mistuned cyclic structures undertaking external harmonic force. *J Sound Vib* 261: 859–870.
- [2] Rao JS (1991) *Turbomachine blade vibration*. Wiley, New Dehl.
- [3] You H (1995) Forced vibration characteristics of bladed disc assemblies. PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology & Medicines, University of London.
- [4] Petrov EP (1988) Determination the worst blade mistuning upon forced vibration of impellers using the nonlinear programming methods. Abstracts of the conference mathematical simulation of processes and structures of power and transport turbines in CAD-CAM systems, Gotvald, Ukraine 3: 71–72.
- [5] Petrov EP, Ewins DJ (2003) Analysis of the worst mistuning patterns in bladed disk assemblies. *J Turbomach* 125(4): 623–632.
- [6] Whitehead DS (1966) Effects of mistuning on the vibration of turbomachinery blades. *J Mech Eng Sci* 8: 15–21.
- [7] Whitehead DS (1976) Effects of mistuning on forced vibration of blades with mechanical coupling. *J Mech Eng Sci*, Vol. 18, No. 6.
- [8] Wagner JT (1967) Coupling of turbomachine blade vibrations through the rotor. *ASME, J. Eng. Power*, Vol. 89, No. 4.
- [9] Dye RCF, Henry TA (1969) Vibration amplitudes of compressor blades resulting from scatter in blade natural frequencies. *ASME J Eng Power* 91: 182–187.
- [10] Ewins DJ (1969) The effect of detuning upon the forced vibration of bladed disks. *J Sound Vib* 9: 65–79.
- [11] Ewins D, Han ZC (1984) Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk. *ASME J Vib. Acoust* 106: 211–217.
- [12] Afolabi DH (1982) Vibration of mistuned bladed disc assembly. PhD thesis, Imperial College of Science, Technology & Medicines, University of London.

جدول ۴- خلاصه‌ای از اعداد بدست آمده برای نسبت بدترین پاسخ به پاسخ سیستم میزان برای مدل‌های متفاوت

مرجع	سال	نسبت
وایتهد [۶]	۱۹۶۶	۲/۲۳
اوینز [۱۰]	۱۹۶۹	۱/۲۱
دای [۹]	۱۹۶۹	۱/۸۲
ال بایومی [۲۴]	۱۹۷۵	۱/۲۰
اوینز [۱۱]	۱۹۸۴	۱/۶۳
گریفین [۲۵]	۱۹۸۴	۲/۰۵
سانلی ترک [۲۶]	۱۹۹۲	۲/۱۰
رحیمی - ضیایی راد [۲۷]	۲۰۱۰	۲/۹۵
مطالعه حاضر، نامیزانی در دانسیته	۲۰۱۲	۲/۶۸

ژنتیک برای حل مسائل مربوط به بهینه‌سازی سیستم دیسک و پره معرفی گردید. ماکزیمم پاسخ بدست‌آمده از روش شبکه‌عصبی و الگوریتم ژنتیک با خطای کمتر از ۱/۵ درصد با ماکزیمم پاسخ بدست‌آمده از نرم‌افزار انسیس مطابقت دارد که کارایی روش به‌کاررفته را نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه گردید که وجود نامیزانی‌های بسیار کوچک در سیستم دیسک و پره می‌تواند پاسخ فرکانسی آن را نسبت به حالت میزان تا ۲/۶۸ برابر افزایش دهد که این افزایش می‌تواند باعث شکست پره‌ها در اثر ارتعاشات و همچنین باعث برخورد پره‌های متحرک با قسمت‌های ثابت شود.

در این مقاله نامیزانی در دانسیته پره‌ها در نظر گرفته‌شد، در حالی‌که می‌توان نامیزانی را در نیروی وارد بر هر پره نیز در نظر گرفت و تمام مراحل پیموده شده در این مقاله از جمله انجام آزمایشات در نرم‌افزار انسیس، آموزش و ایجاد شبکه عصبی و تحلیل سیستم دیسک و پره به‌کمک الگوریتم ژنتیک را دوباره انجام داد.

همچنین می‌توان اثرات نامیزانی را به‌صورت همزمان در دانسیته و نیروی وارد بر هر پره در نظر گرفت. که در این صورت نیاز به حل مدل‌های بیشتری است. ولی مدل و جواب بدست‌آمده مطمئن‌تر و واقعی‌تر خواهد بود. به‌عنوان یکی از کارهای آتی می‌توان اثرات نیروها و گشتاورهای نابالانسی در سیستم دیسک و پره را همزمان با وجود نامیزانی در دانسیته پره‌ها مورد بررسی قرار داد.

نتایج بدست‌آمده گرچه مفید می‌باشد ولی برای مدل‌های دیگر با پارامترهای دیگر قابل استفاده نخواهد بود. اما دانستن

- [21] Bladh R, Castanier MP, Pierre C (2001) Component-Mode-Based reduced order modeling techniques for mistuned bladed disks—Part II. Application, *J Eng Gas Turb Power* 123: 100–108.
- [22] Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Reading, MA: Addison-Wesley.
- [23] Gallinari P, Thiria S, Badran F, Fogelman-Soulie F (1991) On the relations between discriminant analysis and multilayer perceptrons. *Neural Networks* 4: 349–360.
- [24] EL-Bayoumy LE, Srinivasan AE (1975) Influence of mistuning on rotor blade vibration. *AIAA Journal* 13: 460–464.
- [25] Griffin JH, Hoosac TM (1984) Model development and statistical investigation of turbine blade mistuning. *J. Vib Acoust Stress* 106: 204–210.
- [26] Sanliturk KY, Imregun M, Ewins DJ (1992) Statistical analysis of random mistuning of bladed assemblies. *J. Mech. Eng. C432* (110): 51–57.
- [27] Rahimi M, Ziaei-Rad, S (2010) Uncertainty treatment in forced response calculation of mistuned bladed disk. *J. Math Comput Simulat*, 80: 1746–1757.
- [13] Afolabi DH (1982) A note on the rogue failure of turbine blades. *J. Sound Vib.* 122(3): 535–545.
- [14] Afolabi DH (1988) Vibration amplitudes of mistuned blades. *ASME, J. Turbomach*, 110: 251–257.
- [15] King ME, Layne PA (1998) Dynamic of nonlinear cyclic systems with structural irregularity. *Nonlinear Dynam* 15: 225–244.
- [16] Petrov EP, Sanliturk KY, Ewins DJ (2002) A new method for dynamic analysis of mistuned bladed disks based on the exact relationship between tuned and mistuned systems. *Transactions of the ASME* 124: 586–597.
- [17] Bladh R, Castanier MP, Christophe P (2000) Component mode modeling of mistuned bladed disk vibration. 5th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference, Chandler, Arizona.
- [18] Lim SH (2005) Dynamic analysis and design strategies for mistuned bladed disk. PhD thesis, University of Michigan, Mechanical Department.
- [19] Chiu YJ, Huang ShCh (2007) The influence on coupling vibration of a rotor system due to a mistuned blade length. *J Mech Sci* 49: 522–532.
- [20] Chan YJ, Ewins DJ (2010) Management of the variability of vibration response levels in mistuned bladed discs using robust design concepts. Part 1 Parameter design, *J Mech Syst Signal Pr* 24: 2777–2791.