



Prediction of the Critical Buckling Load in a Composite Lattice Conical Structure Using Artificial Neural Network

Aliasghar Naderi^{*}, Farid Bagherpoor[†], Seyed Mostafa Mirtabaei[‡]

^{*} Department of Engineering, Imam Ali Officers' University, Tehran, Iran. (*Correspondence: aa.naderi@modares.ac.ir)

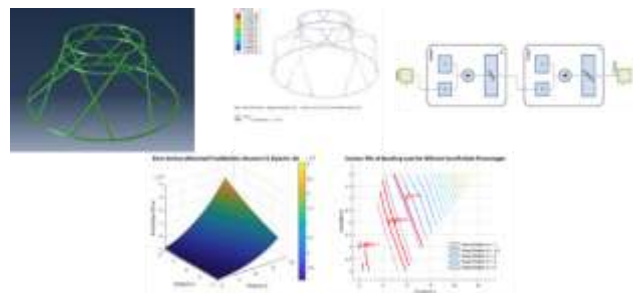
[†] Department of Engineering, Imam Ali Officers' University, Tehran, Iran. Email: farid.bagherpor@gmail.com

[‡] Department of Engineering, Imam Ali Officers' University, Tehran, Iran. Email: mostafamirtabaei@ac.ir

HIGHLIGHTS

- Investigation of the effect of nanoparticle inclusion on enhancing the mechanical properties of composite lattice conical structures
- Development of a high-accuracy numerical model in ABAQUS for predicting buckling load
- Training and selection of the optimal artificial neural network for predicting the critical buckling load in composite lattice structures

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: ۳۱ January ۲۰۲۶

Received in revised form: ۲۷ March ۲۰۲۶

Accepted: ۱۷ April ۲۰۲۶

Available online: ۱۳ May ۲۰۲۶

^{*}Correspondence:

aa.naderi@modares.ac.ir

Keywords:

Composite Lattice Structures

Buckling Analysis

Finite Element Method

Artificial Neural Network (ANNs)

ABSTRACT

Composite lattice shells are widely employed across various industries due to their exceptional strength-to-weight ratio and ability to sustain significant loads while remaining lightweight. Buckling analysis and the accurate prediction of the critical buckling load are among the most essential design considerations for these structures. In this study, the influence of incorporating carbon nanoparticles (۱, ۱.۵, ۳, ۴, and ۵ wt%) on the elastic properties of the resin was investigated using the Modified Halpin–Tsai model. The effective properties of the composite material in the conical lattice structure were then estimated through the rule of mixtures. Based on these properties, finite element models were developed in Abaqus to predict the buckling load, and the numerical results were validated against experimental data. Furthermore, to enable neural network-based prediction of the critical buckling load, ۷۵ parametric models were generated in Abaqus with varying nanoparticle concentrations and aspect ratios (۰.۵, ۱, and ۱.۵) for the cross-sections of helical and circumferential ribs. The corresponding critical buckling loads were calculated and used to train neural networks. Networks with different neuron counts and training epochs were systematically evaluated, and the optimal architecture for accurate prediction of the critical buckling load was identified.

Cite this article: Naderi A[®], Bagherpoor F, Mirtabaei S M. Prediction of the Critical Buckling Load in a Composite Lattice Conical Structure Using Artificial Neural Network. Journal of Aerospace Mechanics. ۲۰۲۵; ۲۲ (۱): ۶۳-۷۲.

DOI: <https://doi.org/10.4۷۱۷۶/MAJ.۲۰۲۶.۱۵۴۱>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.





پیش‌بینی بار بحرانی کمانش در سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی با استفاده از شبکه عصبی

مصنوعی

علی اصغر نادری^{۱*}، فرید باقرپور^۲، سید مصطفی میرطبابی^۳

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران. (نویسنده مسئول: aa.naderi@modares.ac.ir)

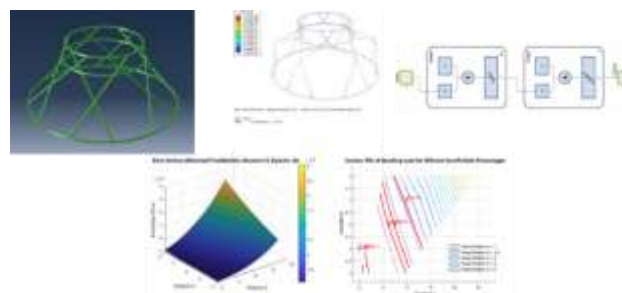
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران. (farid.bagherpor@gmail.com)

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران. (mostafamirtabaei@ac.ir)

برجسته‌ها

- بررسی تأثیر افزودن ذرات نانو بر بهبود خواص مکانیکی سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی
- توسعه یک مدل عددی بادقت بالا در نرم‌افزار آباکوس جهت پیش‌بینی بار کمانش
- آموزش و انتخاب بهترین شبکه عصبی جهت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش در سازه‌های مشبک کامپوزیتی

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۱ بهمن ۱۴۰۴

بازنگری: ۷ فروردین ۱۴۰۵

پذیرش: ۲۸ فروردین ۱۴۰۵

ارائه آنلاین: ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۵

*نویسنده مسئول:

aa.naderi@modares.ac.ir

کلید واژه‌ها:

ساختارهای مشبک کامپوزیتی

آنالیز کمانش

روش المان محدود

شبکه عصبی مصنوعی

چکیده

پوسته‌های مشبک کامپوزیتی یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده سازه‌های مورد استفاده در صنایع مختلف هستند. نسبت استحکام بالا به وزن پائین و قابلیت تحمل بار در وزن محدود این امکان را فراهم آورده که این نوع سازه‌ها به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گیرند. آنالیز کمانش و تعیین و پیش‌بینی بار بحرانی کمانش در این سازه‌ها از جمله مهم‌ترین پارامترهای طراحی این سازه‌های کامپوزیتی است. در این مطالعه ابتدا با استفاده از نظریه هالفین - تسای بهبودیافته تأثیر افزودن نانوذرات کربن با درصدهای جرمی ۱، ۱.۵، ۳، ۴ و ۵ بر خواص الاستیک رزین بررسی و محاسبه شد. سپس با استفاده از نظریه اختلاط در کامپوزیت‌ها خواص کامپوزیت به کاررفته در سازه مشبک مخروطی تخمین زده شد. پس از تعیین خواص کامپوزیت با درصدهای مختلف ذرات نانو، یک مدل المان محدود جهت پیش‌بینی بار کمانش در نرم‌افزار آباکوس توسعه و نتایج آن با نتایج تجربی صحت سنجی شد. همچنین جهت آموزش شبکه عصبی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش ۷۵ مدل به روش اسکرپیت‌نویسی در نرم‌افزار آباکوس با درصدهای مختلف ذرات نانو و نسبت ضخامت به عرض‌های مختلف در سطح مقطع ریب‌های مارپیچ و محیطی (۰/۵ و ۱ و ۱/۵) توسعه و بار بحرانی کمانش محاسبه گردید.

استناد: نادری، علی اصغر^۱، باقرپور، فرید، میرطبابی سید مصطفی. پیش‌بینی بار بحرانی کمانش در سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. مکانیک هوا فضا. (۱۴۰۵)؛ ۲۲ (۱): ۶۳-۷۲.

<https://doi.org/10.47176/MAJ.2026.1041>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



۱- مقدمه

پوسته‌های مشبک مخروطی کامپوزیتی امروزه کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا پیدا کرده‌اند. این پوسته‌های مخروطی معمولاً برای اتصال مقاطع استوانه‌ای با شعاع‌های مختلف استفاده می‌شود. دو دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه طراحی سازه‌هایی با ساختارهای هندسی مشبک در حال انجام است. سازه‌های کامپوزیتی مشبک به دلیل داشتن مزایا و خواص بسیار مناسب از جمله وزن کم، استحکام بالا، پایداری مناسب و جذب انرژی بسیار عالی در صنایع هوا و فضا و دیگر صنایع مانند اتومبیل‌سازی و کشتی‌سازی موردتوجه بسیاری قرار گرفته‌اند. این سازه‌ها از دو بخش اصلی ریب و پوسته تشکیل می‌شوند. ریب‌ها به‌عنوان جز اصلی تحمل‌کننده بار به شمار رفته و پوسته الزامات طراحی سازه را برآورده می‌سازد. از نقطه‌نظر کاربردی، بر اساس ساختار شبکه‌بندی یا به عبارتی بر مبنای نوع اتصال ریب‌ها، سازه‌های مشبک به شکل‌های مختلفی ساخته شده که از مهم‌ترین آنها می‌توان به هندسه‌های ایزوگرید و آنیزوگرید اشاره کرد [۱]. یکی از اصلی‌ترین معیارهای شکست این سازه‌ها، مقاومت آن‌ها در برابر بار کمانشی است. مطالعات مختلفی در زمینه‌های تسلیم‌شدن این سازه‌ها در مقابل بار کمانش و قابلیت جذب انرژی کامپوزیت‌های مشبک انجام شده است. کیم و همکاران به بررسی رفتار پنل‌های کامپوزیتی مشبک ایزوگرید برای شناسایی حالت‌های مختلف تسلیم با انجام آزمایش فشاری محوری بر روی این سازه‌ها پرداختند. نتایج آزمون فشار نشان داد که بار اولیه به مقدار زیادی بر ریب‌ها تا زمانی که دچار کمانش نشده‌اند اعمال و پوسته در سازه مشبک در جهت شعاعی مقاوم است. همچنین نتایج نشان داد، دومین مد تسلیم، کمانش پوسته در این سازه‌ها است که بعد از کمانش ریب‌ها اتفاق می‌افتد. مطالعات نشان داد که در پنل‌های ایزوگرید، مقاومت در برابر بار فشاری حتی بعد از تسلیم شدن یک یا چند ریب همچنان ادامه می‌یابد. همچنین اعمال بار بیشتر باعث تسلیم‌شدن ریب‌های بیشتر شده تا در نهایت با اعمال بار بسیار زیاد جدایش در فصل مشترک بین ریب^۱ و پوسته ایجاد می‌شود [۲]. هدایتیان و همکاران [۳]، پاسخ به ضربه کامپوزیت مشبک استوانه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در سازه‌های مشبک وجود ریب‌های مجزا، مانع از گسترش شکست از یک سلول به سلول مشابه شده و پوسته در برخورد با اجسام ریز که در آن انرژی برخورد از حدی فراتر می‌رود، باعث ایجاد سوراخ می‌شود. همچنین نشان داد که وجود ریب‌ها در سازه‌های مشبک موجب افزایش سفتی موضعی سازه در نزدیکی آن‌ها، محدود کردن سطح شکست به یک سلول و کاهش تغییر شکل کلی سازه تحت بار ضربه می‌گردد.

رهنما و همکاران [۴] رفتار ارتعاشات آزاد پوسته‌های مخروطی ساندویچی با هسته مشبک شش ضلعی متشکل از ریب‌های هلیکال و محیطی را تحت شرایط تکیه‌گاهی مختلف بررسی کردند. با استفاده از روش سفتی معادل، نظریه دائل و اصل همپلتون، معادلات ارتعاشی استخراج و به کمک روش گالرکین حل مقدار ویژه فرکانسی انجام شد. نتایج نشان داد، پارامترهای هندسی مانند ضخامت رویه‌ها و عرض ریب‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها دارند و این تأثیر به نوع شرایط تکیه‌گاهی وابسته است.

رضوانی و همکاران [۵] پایداری دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده با شبکه ایزوگرید را تحت بارگذاری ترکیبی بررسی کردند. با استفاده از نظریه دائل و روش بولتین، تأثیر پارامترهایی مانند زاویه و فاصله ریب‌ها، سطح مقطع آن‌ها و نسبت‌های هندسی پوسته بر نواحی ناپایداری تحلیل شد. نتایج نشان داد کاهش زاویه ریب‌های مارپیچ موجب افزایش فرکانس ناپایداری و کاهش گستره ناحیه ناپایداری می‌شود. موروزوف و همکاران [۶] کمانش پوسته‌های مخروطی مشبک کامپوزیتی را با مدل‌سازی اجزاء محدود بررسی کردند. نتایج نشان داد زاویه و ابعاد ریب‌ها تأثیر زیادی بر بار بحرانی دارند و با افزایش سختی یا افزودن ریب‌های محیطی می‌توان مقاومت کمانشی را بالا برد.

رستمی و همکاران [۷] تأثیر پارامترهای مؤثر از جمله ضخامت پوسته خارجی، ضخامت، زاویه و تعداد ریب‌ها بر توزیع تنش و رفتار کمانشی ساختارهای مشبک را مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور از روش المان محدود جهت مدل‌سازی و مطالعه تأثیر این پارامترها بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک استفاده شد. همچنین جهت افزایش بهبود مقاومت سازه هم‌زمان با حفظ وزن کم آن، از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی برای تعیین بهینه‌ترین حالت پارامترهای مؤثر در رفتار کمانشی سازه استفاده شد. نحوه محاسبه بار بحرانی کمانش در سازه‌های مشبک تحت اثر بار محوری توسط نادری و همکاران [۸] مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور ابتدا از رابطه اولیئر، بار کمانش در اجزای نزدیک به انتهای سازه مشبک مخروطی محاسبه شد. سپس با استفاده از بار کمانشی محاسبه شده و با فرض کمانش متقارن، بار بحرانی کمانش یک سازه مشبک مخروطی تحت بار محوری، به دست آمد. در مطالعه‌ای دیگر، اثر زاویه‌های مختلف الیاف در لایه‌چینی، بر مقدار بار کمانش در سازه‌های مخروطی دایروی ناقص با استفاده از دو روش المان محدود و نظریه کلاسیک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد بار کمانش بر اساس جهت‌گیری و مسیرهای مختلف الیاف در لایه‌چینی بر استحکام کمانشی سازه و وزن آن مؤثر است [۹]. احمدی‌فر و همکاران [۱۰] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار کمانشی سازه‌های مشبک مخروطی کامپوزیتی از جنس فیبر کربن قبل و بعد از ضربه جانبی پرداختند. در این پژوهش

^۱ Rib

[۱۴] به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات خاک رس بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی پرداختند. نتایج آزمون کمانش پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی، بهبود رفتار کمانشی این سازه‌ها را با افزایش درصد جرمی نانوذرات رس در ماتریس نشان داد. همچنین مطالعه انجام شده نشان داد بیشترین بهبود در بار کمانشی ساختارهای مشبک نانوکامپوزیتی در ۵ درصد وزنی نانوذرات رس است. نادری و همکاران رفتار کمانشی ساختارهای مشبک کامپوزیتی الیاف پیچ شده تحت بار فشاری محوری با درصد‌های مختلف نانوذرات را مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور از دو روش المان محدود و تحلیلی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بار کمانشی ساختارهای مشبک با افزایش درصد جرمی نانوذرات رس افزایش می‌یابد [۱۵]. تاهیر و همکاران [۱۶] به مطالعه استفاده از شبکه عصبی مصنوعی^۱ برای افزایش دقت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش در سازه‌های مشبک بر اساس داده‌های تجربی به‌دست‌آمده در مطالعات پیشین پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش‌دیده، دقت بالاتری در پیش‌بینی بارهای کمانشی از خود نشان داده و آن‌ها را برای کاربردهای طراحی عملی مناسب می‌سازند. هدف در پژوهش حاضر پیش‌بینی بار بحرانی کمانش در سازه‌های مشبک کامپوزیتی با خواص مادی و شرایط هندسی مختلف با استفاده از روش شبکه عصبی است. برای این منظور ابتدا خواص معادل کامپوزیت تقویت شده با درصد‌های مختلف ذرات نانو با استفاده از روش‌های نظریه تعیین و پس از مدل‌سازی ریب‌های محیطی و حلقوی با خواص مختلف مادی و هندسی به روش اجزاء محدود بار بحرانی کمانش به‌صورت مجموعه‌ای از داده‌ها استخراج و در نهایت یک مدل شبکه عصبی جهت آموزش داده‌ها و پیش‌بینی بار بحرانی کمانش انتخاب و ارائه گردید.

۲- تخمین خواص کامپوزیت تقویت شده با ذرات نانوکربن

پوسته مشبک کامپوزیتی از الیاف شیشه تک جهته شیشه و ماده زمینه اپوکسی (LYS۰۵۲) و هاردنر (HY۵۰۵۲) شرکت هانتسمن با درصد وزنی (۱۰۰:۳۸) تشکیل شده است که در جدول ۱ خواص مکانیکی آن‌ها گزارش شده است.

جدول ۱: خواص مکانیکی الیاف و رزین [۸]

ماده	مدول یانگ (GPa)	رزین Kg/m ^۳
الیاف شیشه نوع E	۷۲	۲۴۴۰
ماده زمینه (رزین و هاردنر)	۳/۵	۱۱۲۰

نمونه‌ها با روش الیاف‌پیچی و استفاده از قالب فلزی ساخته شدند و تحت بارگذاری فشاری - محوری آزمایش شدند. سپس اثر ضربه جانبی بالترژی مشخص بر مقاومت کمانشی سازه‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که ضربه جانبی موجب کاهش قابل‌توجه بار بحرانی کمانش (حدود ۲۷٪) می‌شود. همچنین تحلیل عددی با نرم‌افزار المان محدود انجام شد و مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که اختلاف بین دو روش اندک است و مدل اجزاء محدود می‌تواند با دقت مناسبی رفتار کمانشی سازه‌های مشبک مخروطی را پیش‌بینی کند. این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن اثر ضربه جانبی در طراحی سازه‌های مشبک کامپوزیتی را برجسته می‌سازد.

شان و همکاران [۱۱] در یک مقاله مروری جامع، اثر نانو افزودنی‌ها بر خواص مکانیکی، ضربه‌ای، ارتعاشی و رفتار کمانش/پس کمانش کامپوزیت‌ها را بررسی کردند. در این مطالعه نشان داده شد که افزودن نانوذرات مانند گرافن و نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) موجب بهبود قابل‌توجه مقاومت خمشی، ظرفیت جذب انرژی و کاهش اثرات ناشی از تخلخل در ساختار کامپوزیت می‌شود. همچنین نویسندگان تأکید کردند که اصلاح سطح نانوذرات و استفاده از روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند علاوه بر ارتقای خواص مکانیکی، هزینه ساخت کامپوزیت‌ها را کاهش داده و شرایط بهینه تولید را با دقت قابل‌قبول پیش‌بینی نماید.

یخچیان و همکاران [۱۲] نشان دادند که استفاده از نانو پلاکت‌های گرافن در پوسته‌های چندلایه اپوکسی با آرایش تابعی مناسب، به‌ویژه آرایش X، موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت کمانشی حرارتی می‌شود. همچنین نتایج آن‌ها بیانگر آن است که نسبت حجمی نانوذرات و نسبت طول به ضخامت پوسته نقش تعیین‌کننده‌ای در مقدار بار بحرانی کمانش داشته و می‌تواند عملکرد سازه را به طور چشمگیری بهبود بخشد.

اسکندری و همکاران [۱۳] رفتار کمانشی پوسته‌های مخروطی کامپوزیتی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی تابعی (FG-CNTCS) را با در نظر گرفتن پدیده کلوخه‌شدن مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، معادلات حاکم بر کمانش با استفاده از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول استخراج و سپس با روش گالرکین حل شدند. نتایج نشان داد که کلوخه‌شدن نانولوله‌های کربنی به طور قابل‌توجهی بار بحرانی کمانش را کاهش می‌دهد. همچنین بررسی پارامتری نشان داد که افزایش درصد حجمی بالای نانو لول‌های کربنی الزاماً بهبود چشمگیری در بار کمانش ایجاد نمی‌کند و به دلیل احتمال بالای کلوخه‌شدن، استفاده از درصد‌های کم‌تر CNT علاوه بر کاهش هزینه ساخت، نتایج بهتری در پایداری کمانشی دارد. این مطالعه اهمیت توجه به توزیع تابعی و کلوخه‌شدن نانولوله‌های کربنی در طراحی پوسته‌های کامپوزیتی را برجسته می‌سازد. رحیمی و همکاران

^۱ Artificial Neural Network

جدول ۴: خواص مکانیکی کامپوزیت با درجهت ۱ و ۲ با درصد وزنی (۳۱:۱۰۰) الیاف به رزین

خواص مادی کامپوزیت GPa	۰٪ نانوذره	۱٪ نانوذره	۱.۵٪ نانوذره	۳٪ نانوذره	۴٪ نانوذره	۵٪ نانوذره
مدول الاستیک در راستای ۱۱	۲۴۷۰	۲۵۵۰	۲۵۹۳	۲۷۳۷	۲۸۱۷	۲۹۰۹
مدول الاستیک در راستای ۲۲	۴۷۶	۶۴۹	۷۳۵	۹۹۴	۱۱۶۷	۱۳۳۹

۳- مدل‌سازی عددی

تعیین مقدار بار بحرانی و مد کمانش^۲ محتمل از جمله پارامترهای مهم طراحی در سازه‌های مشبک کامپوزیتی است. در پژوهش حاضر به‌منظور پیش‌بینی بار بحرانی کمانش توسط روش شبکه عصبی برای یک سازه مشبک کامپوزیتی و باتوجه به هزینه بالا در ساخت این سازه‌های مشبک جهت تولید داده برای آموزش مدل شبکه عصبی، این داده‌ها در نرم‌افزار آباکوس ایجاد شد. برای این منظور ابتدا یک مدل از سازه مشبک مخروطی از مواد مرکب [۸] با درصد نانوذره صفر درصد با دوازده ریب ماریچ و سه ریب محیطی به سطح مقطع با عرض و ارتفاع ۲ میلی‌متر در میلی‌متر با زاویه نیم راس ۳۰ درجه و شعاع دایره‌ای پوسته میانی ۵۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر در لبه کوچک و بزرگ مدل‌سازی شد. همچنین ارتفاع مخروط ناقص ۸۰ میلی‌متر است. لازم به ذکر است جهت صحت سنجی دقیق مدل المان محدود با نتایج آزمون تجربی به‌دست‌آمده توسط نادری و همکاران [۸] مشخصات هندسی سازه همان‌طور که اشاره شده عیناً بر اساس نمونه تجربی ساخته شده، در نرم‌افزار مدل‌سازی گردید. تعیین بار کمانش از حلقه کمانش خطی استفاده گردید. بارگذاری باتوجه به شرایط واقعی در بخش انتهایی مخروط مشبک به‌صورت گیردار و در بخش بالایی آن دارای یک درجه آزادی در جهت بار فشاری فرض شده است. همچنین برای مدل‌سازی ریب‌های ماریچ و حلقوی از مدل تیر سه‌بعدی استفاده شد. نحوه اعمال بار و شرایط مرزی مفروض در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین تعداد مش‌های استفاده شده در تحلیل حاضر ۵۳۰۰ مش است. جهت بررسی دقت نتایج باتوجه به تعداد مش به‌کاررفته از آنالیز حساسیت مش استفاده شد که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بعد از تعداد

نتایج ارائه شده در جدول ۲ خواص مکانیکی یک تک‌ماده مرکب را نشان می‌دهد. این خواص بر اساس روش اختلاط و با درصد ۳۱/۱ درصد حجمی الیاف محاسبه شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی کامپوزیت به‌کاررفته در سازه مشبک کامپوزیتی مخروطی [۸].

خواص مکانیکی	مدول الاستیک در جهت ۱ MPa	مدول الاستیک در جهت ۲ MPa	مدول برشی MPa	چگالی Kg/m ^۳	ضریب پواسون
	۲۴۷۰۰	۴۷۶۰	۱۸۳۰	۱/۵۴۸	۰.۳

جهت بررسی تأثیر درصد نانوذرات کربن بر بار بحرانی کمانش در ساختارهای مشبک کامپوزیتی به ترتیب از ۵ نوع درصد وزنی نانوذره به ترتیب ۱، ۳، ۴، ۵ و ۱۰ استفاده شد. به‌منظور تخمین خواص رزین تقویت شده با درصدهای مختلف وزنی ذرات نانو ابتدا با استفاده از نظریه هالفین - تسای^۱ بهبودیافته خواص رزین با درصدهای وزنی مختلف نانوذرات تیوب کربن^۲ در کد توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب تخمین زده شد که نتایج حاصل از آن در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است به‌منظور اعتبارسنجی کد توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب، نتایج حاصل از تخمین خواص مکانیکی با نتایج ارائه‌شده در مرجع [۱۷] مقایسه گردید. تطابق مناسب بین نتایج عددی و داده‌های مرجع، صحت عملکرد مدل عددی را تأیید می‌نماید.

جدول ۳: خواص مکانیکی رزین تقویت شده با نانوذرات تیوب کربن.

مدول الاستیک MPa	۰٪ نانوذره	۱/۵٪ نانوذره	۲٪ نانوذره	۳٪ نانوذره	۴٪ نانوذره	۵٪ نانوذره
	۳۳۵۰	۴۶۰۳	۵۲۳۷	۷۱۶۷	۸۴۷۷	۹۸۰۷

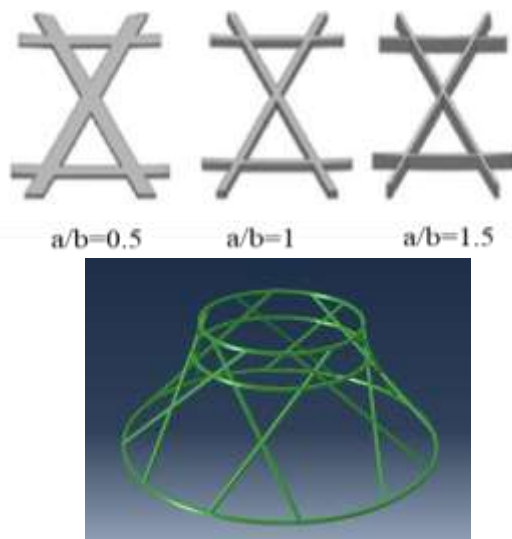
پس از تخمین خواص رزین با درصدهای مختلف نانوذرات تیوب کربن با استفاده از قاعده اختلاط اشاره شده در فرمول ۱، خواص مادی کامپوزیت تقویت شده با ذرات نانوتیوب کربن را با درصد وزنی (۳۱:۱۰۰) الیاف به رزین در دو جهت ۱ و ۲ تخمین که مقادیر آن در جدول ۴ اشاره شده است.

$$E_{11} = \theta_f E_f + (1 - \theta_f) E_{resin}$$

$$E_{22} = 1 / \left(\frac{\theta_f}{E_f} + \frac{(1 - \theta_f)}{E_{resin}} \right) \quad (۱)$$

^۲ Buckling Mode

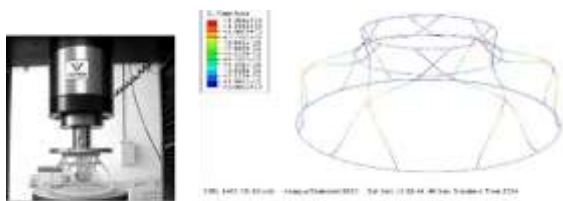
^۱ Modified Halpin-Tsai
^۲ CNTs



شکل ۳: نمونه مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس با نسبت مقاطع عرض به طول ۰/۵، ۱ و ۱/۵.

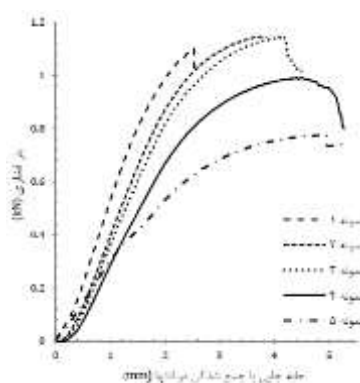
۴-۱ صحت سنجی مدل المان محدود با نمونه تجربی

نتایج به دست آمده از مدل المان محدود با نتایج حاصل از نمونه تجربی ساخته شده توسط نادری و همکاران صحت سنجی شد. در ابتدا مد کمانش محتمل به دست آمده از روش المان محدود با مدل تجربی تطبیق که در شکل ۴ قابل رویت است.



شکل ۴: مقایسه شکل مد کمانش پیش بینی شده حاصل از نتایج المان محدود و نتایج تجربی

سپس بار بحرانی کمانش خطی پیش بینی شده در مد ششم به روش المان محدود با نتایج حاصل از آزمون تجربی برای ۵ نمونه که در شکل ۵ ارائه شده است مقایسه و نتایج ن در جدول ۵ ارائه شده است.

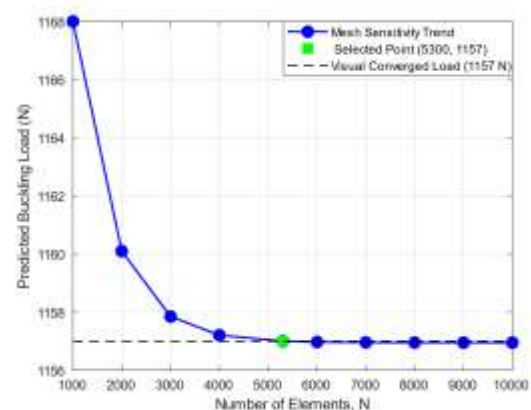


شکل ۵: نمودارهای آزمون تجربی بار - جابه جایی در بارگذاری کمانش برای ۵ نمونه [۸].

۵۰۰۰ مش مقدار نتایج پیش بینی شده برای بار بحرانی کمانش خطی به یک مقدار ثابت همگرا می شود؛ بنابراین در پژوهش حاضر جهت صرفه جویی در زمان و نیز دقت پیش بینی نتایج تعداد ۵۳۰۰ مش برای تمامی مدل های عددی در نظر گرفته شد.



شکل ۱: شمایکی از شرایط مرزی و بار کمانش اعمال شده بر روی سازه مشبک کامپوزیتی در نرم افزار آباکوس



شکل ۲: نمودار آنالیز حساسیت مش مدل المان محدود جهت پیش بینی بار بحرانی کمانش خطی نسبت به تعداد المان ها

جهت تولید داده های آموزش جهت پیش بینی بار کمانش بحرانی برای سازه های کامپوزیتی مشبک مخروطی تقویت شده با ذرات نانوکربن با درصد وزنی های مختلف به ترتیب ۱، ۱/۵، ۳، ۴ و ۵ درصد و برای سه نسبت مختلف عرض به طول ریب های حلقوی و مارپیچ به ترتیب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مطابق با شکل ۳ برای ۵ عرض مختلف به ترتیب ۴، ۶، ۷ و ۸ میلیمتر با استفاده از روش اسکریپت نویسی در آباکوس ۷۵ سازه مشبک مدل سازی و بار بحرانی کمانش برای هر حالت به طور مجزا پیش بینی شد.

۴- صحت سنجی مدل سازی عددی با آزمون تجربی

به منظور ارائه یک مدل رگرسیون جهت پیش بینی بار کمانشی در ساختارهای کامپوزیتی مشبک با داده های ورودی معلوم با استفاده از شبکه عصبی همان طوری که اشاره شد لازم است مجموعه ای از داده ها استخراج شده از مدل سازی المان محدود را جهت آموزش شبکه استفاده نمائیم؛ بنابراین دقت نتایج به دست آمده از مدل المان محدود از اهمیت بالایی جهت پیش بینی بار کمانش برخوردار است.

یک‌لایه خروجی به پایان می‌رسد و معمولاً شامل چندین لایه پنهان در میان آن‌ها است. هر لایه از تعداد زیادی نرون تشکیل شده که در آن هر نرون در یک وزن مربوطه ضرب و یک بایاس به نتیجه اضافه می‌گردد. این خروجی سپس پس از پردازش توسط یک تابع فعال‌سازی، مانند تابع سیگموید، تابع تانژانت هذلولوی، یا سایر توابع مرتبط، به لایه بعدی منتقل می‌شود [۱۸]. شبکه‌های عصبی مصنوعی به طور گسترده در مهندسی برای وظایفی مانند تقریب تابع، طبقه‌بندی تصویر و تحلیل سیستم‌های دینامیکی [۱۹] استفاده می‌شوند. این شبکه‌ها زمانی مؤثر هستند که پارامترهای ورودی متعددی بر خروجی تأثیر بگذارند و برقراری روابط مستقیم پیچیده باشد. ANN‌ها می‌توانند حجم زیادی از داده‌ها را مدیریت کنند و مزایایی مانند تقریب تابع و قابلیت انطباق با شرایط متغیر را ارائه می‌دهند [۲۰]. آموزش شامل تنظیم وزن‌ها و بایاس‌ها بر اساس الگوهای داده است تا زمانی که خروجی شبکه با مقادیر هدف در یک محدوده قابل قبول مطابقت پیدا کند. معماری شبکه، از جمله تعداد لایه‌های پنهان و نرون‌ها، معمولاً از طریق آزمون و خطا بهینه می‌شود [۲۱]. شبکه‌های پیش‌خور معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند، جایی که داده‌ها از لایه ورودی از طریق لایه‌های پنهان به لایه خروجی جریان می‌یابند. پس انتشار یک روش کلیدی آموزش است که وزن‌ها را با انتشار خطاها از لایه خروجی به عقب در شبکه تنظیم می‌کند. برای مهندسی سازه، الگوریتم‌های لونبرگ - مارکوارت و رگولاریزاسیون بی‌زی اغلب به کار گرفته می‌شوند [۲۲]. در مطالعه حاضر از نرم‌افزار متلب برای آموزش آزمون شبکه‌های عصبی استفاده شده است. جهت آموزش داده‌ها از تابع فیت نت برای ایجاد یک شبکه با یک‌لایه پنهان با ورودی‌های متعدد شامل کامپوزیت‌های تقویت شده با درصدهای مختلف ذرات نانو شامل ۱، ۱/۵، ۳، ۴ و ۵ درصد و برای سه نسبت مختلف عرض به طول ریب‌های حلقوی و مارپیچ به ترتیب ۰/۵، ۱، ۱/۵ و برای ۵ عرض مختلف به ترتیب ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ میلیمتر و یک خروجی بار بحرانی کمانش به کار برده شد. برای بهینه‌سازی در طول فرایند آموزش، از الگوریتم لونبرگ - مارکوارت استفاده شده است. این روش یک فن بهینه‌سازی ترکیبی است که مزایای هر دو روش گرادیان کاهشی و گاوس - نیوتن را ترکیب می‌کند. همچنین الگوریتم لونبرگ - مارکوارت به طور گسترده برای وظایف تقریب تابع و مسائل رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف شبکه عصبی ما نیز پیش‌بینی بار بحرانی کمانش است که در حوزه مهندسی سازه به‌عنوان یک مسئله رگرسیون شناخته می‌شود. این الگوریتم با تنظیم تکراری وزن‌ها و بایاس‌های شبکه، مجموع مربعات خطا را به حداقل می‌رساند و در نتیجه همگرایی سریع به یک حداقل محلی را تسهیل می‌کند. همچنین در طول آموزش، ۸۰ درصد داده‌ها جهت آموزش و ۲۰ درصد مجموعه داده‌ها جهت اعتبارسنجی

جدول ۵: بار بحرانی کمانش به‌دست‌آمده از آزمون تجربی برای ۵

نمونه مشبک کامپوزیتی [۸]

نمونه	بار کمانش (N)
۱	۱۱۰۰
۲	۱۱۴۵
۳	۱۱۴۷
۴	۹۹۰
۵	خراب

جدول ۶: مقایسه بار کمانشی بحرانی میانگین به‌دست‌آمده از آزمون

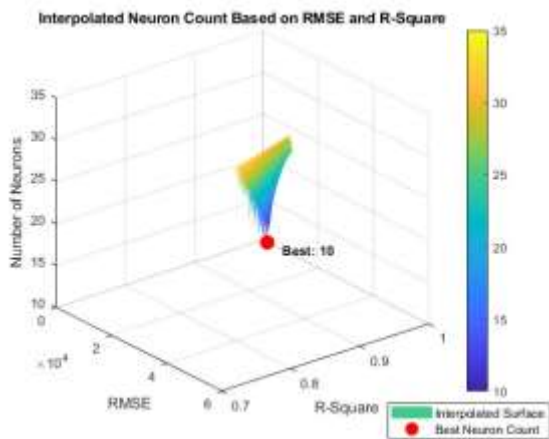
تجربی و روش المان محدود

روش	بار کمانش (N)	خطا (%)
نمونه تجربی	۱۰۹۶(±۵۴)	۵
مدل سازی المان محدود	۱۱۵۷/۳	

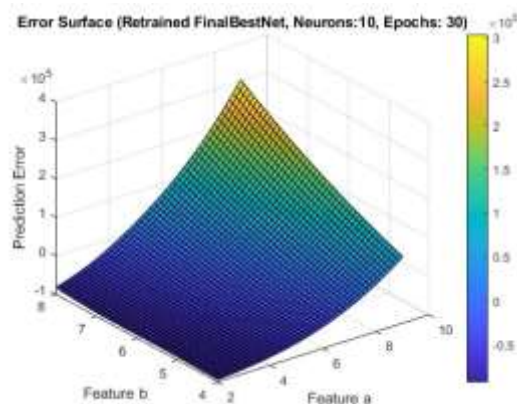
همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مقدار به‌دست‌آمده از تحلیل اجزاء محدود ۱۱۵۷/۳ بسیار نزدیک به میانگین نتایج آزمایش تجربی ۱۰۹۵/۵ است و اختلاف آن در حد خطای قابل‌انتظار مدل‌سازی عددی است. در مقابل مقادیر گزارش شده در جدول ۵ و ۶، نشان می‌دهد که پراکندگی نتایج آزمایش انحراف معیار حدود ۶۳/۷ ناشی از اختلاف بار بحرانی کمانش اندازه‌گیری شده برای نمونه ۴ در قیاس با سایر نمونه‌هاست که دلیل این موضوع می‌تواند به عوامل واقعی همچون ناهمگنی مواد، کیفیت ساخت نمونه‌ها مرتبط باشد. در نهایت هرچند ماده واقعی دارای نواقص بوده و شرایط ایدئال ندارد، میانگین نتایج آزمون تجربی نشان داد که تا قبل از تخریب، مد کمانش پیش‌بینی‌شده توسط مدل المان محدود با مد کمانش خطی مشاهده‌شده در آزمایش تجربی تطابق دارد. نتایج نشان می‌دهد مقدار خطای مدل المان محدود با آزمون کمانش بر روی سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی در محدوده ۵ درصد است؛ بنابراین نتایج به‌دست‌آمده از مدل المان محدود جهت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش و تولید داده برای آموزش شبکه عصبی برای سازه‌هایی با خواص مادی و هندسی مختلف از قابلیت اطمینان قابل‌قبولی برخوردار که این امر موجب کاهش قابل‌توجه در هزینه ناشی از ساخت و انجام آزمون‌های تجربی را خواهد شد.

۵- مدل شبکه عصبی

یک شبکه عصبی مصنوعی، مدلی از یادگیری ماشین است که از لایه‌های متعددی تشکیل شده و دارای واحدهای به‌هم‌پیوسته‌ای به نام نرون است. این نرون‌ها از طریق اتصالات سیناپسی وزن‌دار با یکدیگر تعامل دارند. این شبکه با یک‌لایه ورودی آغاز و با

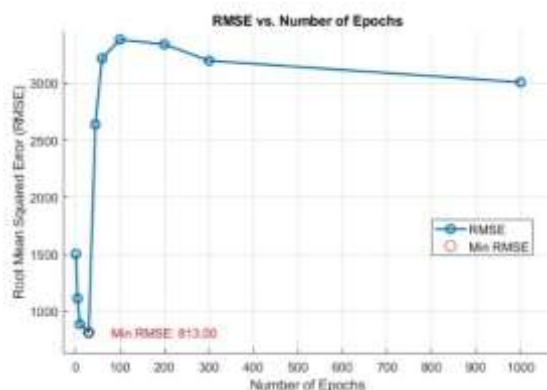


شکل ۷: نمودار تعیین بهینه‌ترین تعداد نورون جهت آموزش شبکه با در نظر گرفتن شاخص‌های R-square و RSME



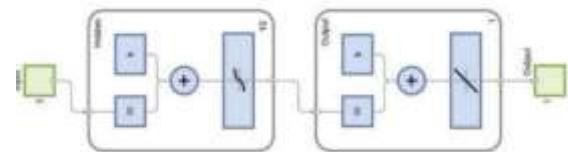
شکل ۸: نمودار سطوح خطا پیش‌بینی برای بهترین شبکه انتخاب شده جهت آموزش با ۱۰ نورون و تعداد اپوک‌های آموزش ۳۰

باتوجه به خطای میانگین به دست آمده از آموزش شبکه‌ای به تعداد ۱۰ نورون و تعداد اپوک‌های مختلف، میزان خطای داده‌های آموزش نسبت به داده‌های تست باتوجه به شاخص RMSE جهت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش برای شبکه‌ای با ۱۰ نورون و ۳۰ اپوک کمترین مقدار است که این روند تغییر خطا در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۹: نمودار تعیین کمترین میزان حداقل میانگین مجذور مربعات خطا برای شبکه‌ای با ۱۰ نورون و تعداد اپوک‌های آموزش ۱، ۵، ۱۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰

تقسیم شد تا عملکرد مدل بالاتر و از بیش برازش^۱ جلوگیری شود. برای انتخاب نمونه‌های عددی به دست آمده از نرم افزار المان محدود جهت آموزش شبکه از روش نمونه برداری تصادفی ساده^۲ در الگوریتم شبکه عصبی استفاده شد. به منظور انتخاب بهترین شبکه جهت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش شبکه با تعداد نورون‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ نورون با تعداد اپوک ثابت ۱۰ برای تمامی شبکه‌ها آموزش داده شد. پس انتخاب بهترین شبکه جهت آموزش، تعداد اپوک‌های آموزش برای شبکه مشخص شده مورد ارزیابی قرار و مناسب‌ترین حالت جهت فرایند آموزش انتخاب شد. جهت انتخاب مناسب‌ترین حالت شاخص‌های مختلف برای ارزیابی عملکرد نهایی آموزش شبکه عصبی به کار گرفته شد که از جمله این شاخص‌ها خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین در نظر گرفته شده است. در نهایت پس از انتخاب بهترین توپولوژی شبکه جهت آموزش، تأثیر تعداد اپوک‌ها در فرایند آموزش در شبکه انتخاب شده مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از فن‌هایی از جمله نمودارهای رگرسیون، هیستوگرام و سطوح خطا استفاده گردید.



شکل ۶: توپولوژی شبکه عصبی پیشنهادی جهت آموزش داده‌ها

۶- بحث و بررسی نتایج

پس از انجام فرایند آموزش شبکه عصبی با تعداد نورون‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ و ۱۰ اپوک ثابت بهترین شبکه با کمترین مقدار میانگین خطا و بیشترین ضریب تأثیر انتخاب شد. باتوجه به نتایج به دست آمده در شکل ۷، بهترین توپولوژی برای شبکه جهت آموزش ساختاری با تعداد ۱۰ نورون است که در آن مقدار خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین به ترتیب ۱۶۲۵ و ۰/۹۹۹۸ که در مقایسه با سایر ساختارها بهترین عملکرد را نشان می‌دهد.

پس از تعیین بهترین توپولوژی جهت آموزش شبکه عصبی جهت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش، تأثیر تعداد اپوک‌ها در آموزش شبکه مشخص شده مورد مطالعه قرار داده شد. برای این منظور نمودار سطح خطا برای شبکه با ۱۰ نورون برای اپوک‌های ۱، ۵، ۱۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ مورد ارزیابی و بهترین مقدار جهت یادگیری برای شبکه‌ای با ۱۰ نورون، ۳۰ اپوک مشخص شد. نمودار سطح خطا برای شبکه انتخاب شده در شکل ۸ مشخص شده است.

^۱ Overfitting

^۲ Simple Random Sampling

نقطه	بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده KN	a طول مقطع cm	b عرض مقطع cm	درصد نانوذره %
نقطه ۱	۱۱/۰	۲/۵	۵/۰	۳/۵
نقطه ۲	۱۳۷/۰	۶/۰	۷/۰	۴/۰
نقطه ۳	۷۳/۰	۵/۰	۶/۰	۵/۰
نقطه ۴	۸/۰	۲/۰	۵/۰	۳/۵
نقطه ۵	۵۸/۰	۴/۵	۶/۰	۵/۰

- [۶] Morozov EV, Lopatin AV, Nesterov VA. Buckling analysis and design of anisogrid composite lattice conical shells. *Composite Structures*. ۲۰۱۱;۹۳(۱۲):۳۱۵۰-۳۱۶۲. DOI ۱۰.۱۰۱۶/j.compstruct.۲۰۱۱.۰۶.۰۱۵
- [۷] Latifi Rostami SA, Kolahdooz A, Lim HJ. Structural stability and design optimization of anisogrid conical lattice composite shells. *Structures*. ۲۰۲۵;۷۹:۱۰۹۵۰۴. DOI ۱۰.۱۰۱۶/j.istruc.۲۰۲۵.۱۰۹۵۰۴
- [۸] Naderi AA, Rahimi Gh. Simple method for buckling load of composite conical lattice structures under axial load. *Modares Mechanical Engineering*. ۲۰۱۵;۱۴(۱۵):۲۹۰-۲۹۸. DOI ۲۰.۱۰۰۱.۱.۱۰۲۷۵۹۴۰.۱۳۹۳.۱۴.۱۵.۲۸.۵
- [۹] Naderi AA, Rahimi Gh, Arefi M. Influence of fiber paths on buckling load of tailored conical shells. *Steel and Composite Structures*. ۲۰۱۴;۱۶(۴):۳۷۵-۳۸۷. DOI ۱۰.۱۲۹۸۹/scs.۲۰۱۴.۱۶.۴.۳۷۵
- [۱۰] Shan L, Tan CY, Shen X, Ramesh S, Zarei MS, Kolahchi R, Hajmohammad MH. The effects of nano-additives on the mechanical, impact, vibration, and buckling/post-buckling properties of composites: A review. *Journal of Materials Research and Technology*. ۲۰۲۳;۲۴:۷۵۷۰-۷۵۹۸. DOI ۱۰.۱۰۱۶/j.jmrt.۲۰۲۳.۰۴.۲۶۷
- [۱۱] Ahmadifar A, Zamani MR, Davar A, Jam JE, Beni MH. Experimental and numerical buckling analysis of carbon fiber composite lattice conical structure before and after lateral impact. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. ۲۰۲۰;۶(۴):۸۱۳-۸۲۲. DOI: ۱۰.۲۲۰۵۵/JACM.۲۰۱۹.۲۹۹۲۹.۱۶۶۴
- [۱۲] Yakhchian B, Shaterzadeh A. Thermal buckling and postbuckling analysis of plates reinforced with graphene platelets using differential quadrature method. *Aerospace Mechanics*. (Persian) ۲۰۲۳;۱۹(۴):۱۰۳-۱۱۷. DOI: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۳۲۳.۱۴.۲.۱۹.۴.۸.۹
- [۱۳] Eskandary K, Shishesaz M, Moradi S. Buckling analysis of composite conical shells reinforced by agglomerated functionally graded carbon nanotube. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. ۲۰۲۲;۲۲(۳):۱۳۲. DOI ۱۰.۱۰۰۷/s۴۳۴۵۲-۰۲۲-۰۰۴۴۰-۶
- [۱۴] Zamani R, Rahimi GhH, Pol MH, Hedayatian M. Reinforcing effect of nanoclay on buckling behavior of nanocomposite grid shells: Experimental investigation. *Modares Mechanical Engineering*. ۲۰۱۵;۱۵(۳):۴۱۱-۴۱۸. DOI ۲۰.۱۰۰۱.۱.۱۰۲۷۵۹۴۰.۱۳۹۴.۱۵.۳.۹.۹
- [۱۵] Naderi AA, Rahimi Gh. Buckling analysis of glass fiber reinforced epoxy/clay conical shells subjected to axial loading. *Proceedings of the ۱۲th Iranian Aerospace Society Conference*. ۲۰۱۳.
- [۱۶] Tahir ZUR, Mandal P, Adil MT, Naz F. Application of artificial neural network to predict buckling load of thin cylindrical shells under axial compression. *Engineering Structures*. ۲۰۲۱;۲۴۸:۱۱۳۲۲۱. DOI ۱۰.۱۰۱۶/j.engstruct.۲۰۲۱.۱۱۳۲۲۱
- [۱۷] Azizi S, Fattahi AM, Nel W. Investigation of elastic properties of PE/CNT injected composites. *International*

ذرات تقویتی نانو اختلاف مقدار بار بحرانی کمانش به دست آمده حاصل از آزمون تجربی و پیش‌بینی شده در حل عددی ۵ درصد است. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود، جهت تولید داده و آموزش شبکه عصبی جهت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش، ۷۵ مدل اجزای محدود از طریق اسکریپت‌نویسی در نرم‌افزار آباکوس با نسبت مختلف ضخامت به عرض و درصدهای مختلف ذرات نانو ایجاد و بار بحرانی کمانش در سازه‌های مشبک کامپوزیتی محاسبه شد. پس از تولید داده یک شبکه عصبی با استفاده از تابع فیت نت آموزش داده شد. جهت تعیین بهترین شبکه به منظور پیش‌بینی بار بحرانی کمانش با کمترین خطا، شبکه با تعداد نوروهای مختلف و برای ۱۰ اپوک آموزش داده شد. نتایج نشان داد شبکه‌ای با ۱۰ نورو مناسب‌ترین توپولوژی را جهت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش را داراست. پس از تعیین مناسب‌ترین توپولوژی تأثیر تعداد اپوک‌ها جهت آموزش شبکه با ۱۰ نورو بررسی گردید. در نهایت نتایج نشان داد بهترین شبکه جهت پیش‌بینی بار بحرانی کمانش شبکه‌ای با ساختار ۱۰ نورو و تعداد دفعات آموزش ۳۰ اپوک است. همچنین نتایج نشان داد که افزایش درصد نانوذرات معمولاً بار بحرانی کمانش سازه‌های مشبک کامپوزیتی را افزایش می‌دهد، اما این روند در همه شرایط برقرار نیست. در برخی شرایط، حتی با درصد کمتر نانوذرات، بار بحرانی بیشتری حاصل می‌شود که بیانگر نقش هم‌زمان پارامترهای مادی و هندسی در بهبود رفتار کمانشی سازه است.

۸- مراجع

- [۱] Wang D, Abdalla MM. Global and local buckling analysis of grid-stiffened composite panels. *Composite Structures*. ۲۰۱۵;۱۱۹:۷۶۷-۷۷۶. DOI ۱۰.۱۰۱۶/j.compstruct.۲۰۱۴.۰۹.۰۵۰
- [۲] Kim TD. Fabrication and testing of thin composite isogrid stiffened panel. *Composite Structures*. ۲۰۰۰;۴۹(۱):۲۱-۲۵. DOI ۱۰.۱۰۱۶/S۰۲۶۳-۸۲۲۳(۹۹)۰۰۱۲۲-۱
- [۳] Hedayatian M, Liaghat Gh, Rahimi Gh, Pol MH, Khoshsorour M. Experimental study on dynamic response of grid cylindrical composite structures under high velocity impact. *Modares Mechanical Engineering*. ۲۰۱۴;۱۴(۲):۴۱-۴۶.
- [۴] Alirezvani H, Davar A, Heydari Beni M, Eskandari Jam J, Eskandari Shahraki M. A dynamic stability analysis of composite grid-stiffened cylindrical shells under harmonic loads using the Donnelly theory. *Aerospace Mechanics*. ۲۰۲۲;۱۷(۴):۵۵-۷۹. DOI ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۳۲۳.۱۴.۰۰.۱۴.۴.۵.۳
- [۵] Rahnema M, Sheikhi MM, Hamzeloo SR. Free vibration behavior of three-skin conical shells with composite lattice core based on semi-analytical and finite element methods. *Aerospace Mechanics*. (Persian) ۲۰۲۴;۲۰(۳):۷۵-۸۶. DOI ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۳۲۳.۱۴.۰۳.۲۰.۳.۵.۱

Journal of Engineering and Technology. ۲۰۱۸;۷:۳۳۳۰–

۳۳۳۴. DOI ۱۰.۱۴۴۱۹/ijet.v۷i۴.۱۰۷۴۵

[۱۸] Tao F, Liu X, Du H, Yu W. Physics-informed artificial neural network approach for axial compression buckling analysis of thin-walled cylinder. AIAA Journal. ۲۰۲۰. DOI ۱۰.۲۵۱۴/۱.J.۵۸۷۶۵

[۱۹] Falcone R, Lima C, Martinelli E. Soft computing techniques in structural and earthquake engineering: a literature review. Engineering Structures. ۲۰۲۰;۲۰۷:۱۱۰۲۶۹. DOI ۱۰.۱۰۱۶/j.engstruct.۲۰۲۰.۱۱۰۲۶۹

[۲۰] Haykin S. Neural networks and learning machines. ۳rd ed. Pearson Education India; ۲۰۰۹.

[۲۱] Tran VL, Kim SE. Efficiency of three advanced data-driven models for predicting axial compression capacity of CFDST columns. Thin-Walled Structures. ۲۰۲۰;۱۵۲:۱۰۶۷۴۴. DOI ۱۰.۱۰۱۶/j.tws.۲۰۲۰.۱۰۶۷۴۴

[۲۲] Tahir ZR, Mandal P. Artificial neural network prediction of buckling load of thin cylindrical shells under axial compression. Engineering Structures. ۲۰۱۷;۱۵۲:۸۴۳–۸۵۵. DOI ۱۰.۱۰۱۶/j.engstruct.۲۰۱۷.۰۹.۰۱۶

–۱

–۲

–۳