



بررسی جذب انرژی در یک ساختار مشبک آگزتیکی با استفاده از یادگیری ماشین مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

نوشین قنادی^۱، امین فرخ آبادی^{۲*}، شهرام حسینی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- فارغ التحصیل دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: amin-farrokh@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۰ مرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۷ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

سازه آگزتیکی

شبکه عصبی مصنوعی

الگوریتم ژنتیک

جذب انرژی

هوش مصنوعی

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، بهبود و کیفیت زندگی، هوش مصنوعی در جهان جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. در این پژوهش به بهینه‌سازی سازه شبکه‌ای آگزتیکی منحنی شکل ساخته شده از پلی لاکتیک اسید پرداخته شده است. سازه‌های مشبک به علت مزایایی از جمله جذب انرژی بالا که دارند کاربرد بسیارگسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. پارامترهای هندسی این ساختار می‌توانند تأثیر محسوسی بر مقدار جذب انرژی این سازه‌ها داشته باشند. در همین راستا، بهینه‌سازی پارامترهای هندسی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. در این تحقیق پارامترهای شعاع انحنا $R1$ ، زاویه انحنا $\theta1$ ، شعاع انحنا $R2$ ، زاویه انحنا $\theta2$ ، طول L نسبت به انرژی جذب شده توسط سازه، نیروی بیشینه و مدول الاستیسیته بهینه شده‌اند. تعداد زیاد پارامترهای بهینه‌سازی تأییدکننده استفاده از الگوریتم ژنتیک برای فرایند بهینه‌سازی این ساختار است. بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مستلزم وجود یک تابع هدف است که پارامترهای هندسی نسبت به آن بهینه شوند. این تابع هدف می‌بایست یک تابع پیوسته باشد که بتواند به ازای هر پارامتر هندسی، خروجی‌های لازم را تولید کند. در این تحقیق از شبکه عصبی مصنوعی برای ساخت تابع هدف استفاده شده است. شبکه عصبی مصنوعی این امکان را فراهم می‌کند که با وجود تعداد محدودی ورودی و خروجی بتوان یک تابع پیوسته ایجاد کرد که بتواند به ازای دریافت ورودی‌های مختلف، خروجی‌های مناسبی تولید کند. پس از استخراج پارامترهای هندسی بهینه، ساختار بهینه با استفاده از چاپگر سه‌بعدی ساخته شده و مورد آزمایش فشار شبه استاتیکی قرار گرفته است.

Energy Absorption Analysis in an Auxetic Lattice Structure Using Artificial Neural Network Machine Learning and Genetic Algorithm

Noushin Ghannadi¹, Amin Farrokhhabadi^{2*}, Shahram Hosseini³

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- PhD Graduate, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: amin-farrokh@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 31 July 2024

Accepted: 28 August 2024

Keywords:

Auxetic Structure
Artificial Neural Network
Genetic Algorithm
Energy Absorption
Artificial Intelligence

Abstract

Today, with the advancement of technology, improvement and quality of life, artificial intelligence has found a special place in the world. In this research, the optimization of the curved mesh structure made of polylactic acid has been discussed. Mesh structures are widely used in various industries due to their advantages such as high energy absorption. The geometric parameters of this structure can have a noticeable effect on the amount of energy absorption of these structures. In this regard, optimization of geometrical parameters has been done using genetic algorithm. In this research, the parameters of radius of curvature $R1$, angle of curvature $\theta1$, radius of curvature $R2$, angle of curvature $\theta2$, length L relative to the energy absorbed by the structure, maximum force and modulus of elasticity have been optimized. A large number of optimization parameters confirm the use of genetic algorithm for the optimization process of this structure. Optimization using genetic algorithm requires the existence of an objective function to which the geometric parameters are optimized. This objective function should be a continuous function that can produce the necessary outputs for each geometric parameter. In this research, artificial neural network has been used to construct the objective function. The artificial neural network makes it possible to create a continuous function with a limited number of inputs and outputs that can produce suitable outputs for receiving different inputs. After extracting the optimal geometric parameters, the optimal structure was made using a 3D printer and subjected to quasi-static pressure testing.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ghannadi N, Farrokhhabadi A, Hosseini S. Energy Absorption Analysis in an Auxetic Lattice Structure Using Artificial Neural Network Machine Learning and Genetic Algorithm. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Oct 22;11(8):20-31. doi: 10.22034/ijme.2024.470912.1993 [In Persian]

۱- مقدمه

اکثر مهندسين و طراحان با پیشرفت تکنولوژی و فناوری به دنبال روش‌های هوشمند جهت طراحی، ساخت و بهینه‌سازی سازه می‌باشند. ایجاد نوآوری و خلاقیت کاربردی با توجه به ماشینی شدن دنیا از اهمیت بسیاری برخوردار است. الکادی و همکاران [۱] با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به پیش بینی عمر خستگی مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف برای زوایای مختلف پرداختند. و از دقت بالای نتایج دریافتند که در صورت آموزش کافی، ANN می‌تواند برای پیش‌بینی عمر خستگی کامپوزیت‌ها برای مجموعه‌ای معین به کار رود. ژانگ و همکاران [۲] با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای بررسی پارامترهای سیستماتیک در طراحی بهینه مواد کامپوزیتی برای کاربردهای خاص پرداخته‌اند. در پژوهش صورت گرفته، اصول مختلف رویکرد شبکه عصبی برای پیش‌بینی خواص معین مواد کامپوزیت پلیمری شامل عمر خستگی، عملکرد سایش، پاسخ در شرایط بارگذاری ترکیبی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی صورت گرفت. تاناکاچان و همکاران [۳] در تحقیق انجام شده به مدل‌سازی خواص کششی فولاد ضد زنگ دوبلکس ریخته‌گری را با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، که منحصراً برای این کار توسعه داده شده است، بررسی کرده‌اند. لی و همکاران [۴] به شناسایی آسیب در خرپا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداخته‌اند. که برای هر المان در خرپا یک اندیس آسیب تعریف کردند که خروجی شبکه عصبی می‌باشد و سپس مقادیر فرکانس های طبیعی و بردارهای ویژه محاسبه کرده‌اند. ۳ مقدار فرکانس طبیعی بزرگتر از بقیه و بردارهای ویژه به عنوان ورودی شبکه عصبی می‌باشد. با کمک داده‌های به دست آمده شبکه عصبی آموزش دیده و شبکه عصبی آموزش دیده از دقت پیش‌بینی بسیار خوبی برخوردار می‌باشد. بالوکاس و همکاران [۵] از شبکه عصبی برای تولید یک مدل جایگزین برای خواص الاستیک کامپوزیت‌های سه بعدی با عدم قطعیت استفاده کرد که با آن‌ها می‌توان هزینه محاسباتی در تجزیه و تحلیل حساسیت را برای شناسایی مهم‌ترین پارامترهای نامشخص کاهش دهند. آنگ و همکاران [۶] یک مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی شروع شکست لوله‌های کامپوزیتی اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه تحت بارهای چندمحوره توسعه دادند. قنادی و همکاران [۷] به بهینه‌سازی شکست ساختار شبکه‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک پرداختند و نتایج نشان داد که ساختار بهینه از جذب انرژی بسیار بالایی برخوردار است. یان و همکاران [۸] به پیش‌بینی رفتار خرابی پیش‌رونده سازه‌های کامپوزیتی بزرگ به صورت آنلاین با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند و این مدل جایگزین در مقایسه با مدل‌سازی المان محدود سنتی از دقت خوبی برخوردار است. سرجوئی و همکاران [۹] با استفاده از چاپ چهاربعدی، تأثیر یک محرک خارجی مانند دما در این تحقیق چاپ چهاربعدی سازه‌های ساندوچی هوشمند با پتانسیل جذب انرژی مورد بررسی قرار داده‌اند نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داد که از بین پارامترهای فرایند، ضخامت دیواره، ارتفاع لایه و دمای نازل مهم‌ترین پارامترها برای افزایش جذب انرژی یا همان افزایش بارفشاری است. بیگی و همکاران [۱۰] به توسعه و ارزیابی یک مدل دقیق یادگیری ماشینی بر اساس روش درخت تصمیم برای برآورد عیب برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی غلتکی ورق‌های پیش سوراخ شده پرداخته‌اند و نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از روش درخت تصمیم می‌تواند یک راه‌حل مؤثر برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی غلتکی ورق‌های پیش سوراخ شده باشد. آخوندی و همکاران [۱۱] به بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپ شده توسط چاپگرهای سه بعدی با فن‌آوری لایه نشانی ذوبی ارائه شده است. این روش بر اساس استفاده از الیاف پیوسته (کربن، شیشه و آرامید) در لایه نشانی بر روی سطوح منحنی است نتایج تجربی نشان می‌دهد این روش قادر به افزایش خواص مکانیکی قطعات چاپ شده با فن‌آوری لایه نشانی ذوبی بر روی سطح منحنی است و قابلیت پیاده‌سازی بر روی چاپگرهای ساده و ارزان قیمت را دارد. ایمانی و همکاران [۱۲] به بررسی و بهینه‌سازی فرایند فرزکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ به منظور دستیابی به کم‌ترین زبری با کمک شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند، که نتایج مدل‌سازی ۶۴ آزمایش با کمک شبکه عصبی و مقایسه آن با نتایج تجربی نشان داد که از دقت بالایی برخوردار است. دیلمی و همکاران [۱۳] به بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی نموی ورق دو لایه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند. نتایج نشان داد با کمک شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین نیروی عمودی و ضخامت نهایی لایه‌ها توسعه داده شده است و این مدل امکان پیش‌بینی نتایج را با دقت مناسبی فراهم می‌کند. سپاهوشی و همکاران [۱۴] به توسعه یک مدل پیش‌بینی دقیق زبری سطح در طول فرایند ماشینکاری این سه آلیاژ آلومینیوم، با استفاده از ترکیبی از پارامترهای فرایند و خواص مواد به عنوان متغیرهای ورودی می‌باشد و رویکرد ترکیبی ANFIS-GA بهترین عملکرد را در پیش‌بینی زبری سطح در داده‌های آزمایشی نشان داده است.

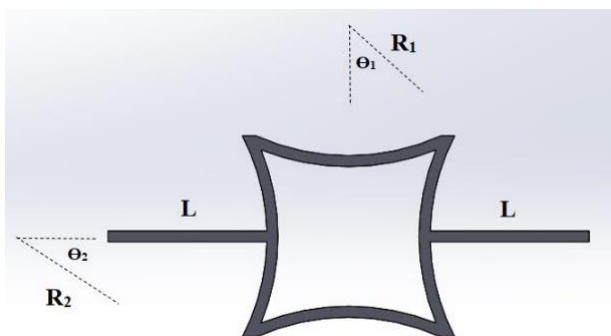
هدف از این مسئله بهینه‌سازی سازه شبکه‌ای آگرتیک منحنی شکل ساخته شده از پلی لاکتیک اسید پرداخته شده است. برای اولین بار، ساختار آگرتیک متشکل از بازوهای انحنادار ارائه شده است. پارامترهای هندسی این ساختار می‌تواند تأثیر محسوسی بر مقدار جذب انرژی این سازه‌ها داشته باشند. در همین راستا، بهینه‌سازی سازه صورت گرفته است تا سازه با جذب انرژی بالا بیشترین استحکام و بالاترین بازدهی را داشته باشد. در ابتدا یک مدل ساختار شبکه‌ای انحنادار از جنس اسید پلی لاکتیک یا همان PLA به کمک نرم‌افزار سالیدورکز مدل‌سازی انجام شده و سپس به حل عددی و تحلیل با کمک روش المان محدود نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. از نتایج روش المان محدود نمودارهای نیرو - جابه‌جایی در پارامتر و اندازه‌های مختلف به دست آمده و در ادامه به آموزش شبکه عصبی مصنوعی برای تشکیل تابع هدف و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر سازه با کمک الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است؛ سپس به صورت تجربی ابعاد نهایی مدل بهینه شده در آزمایشگاه تحت جابجایی در راستای محور عمودی (y) قرار گرفته‌است و نتایج به‌دست آمده از روش تجربی و عددی با هم مقایسه و بررسی شده است.

۲- متدولوژی

۲-۱- مدل‌سازی

در این تحقیق به جای در نظرگیری کل ساختار، یک سلول از ساختار را در نظر گرفته شده است، علت این امر مطابق رابطه ۱ ثابت بودن محیط و به تبع، وزن سازه می‌باشد. برای اینکه بتوان سازه آگرتیک به بهینه‌ترین شکل ممکن مدل‌سازی شود. با کمک پارامترهای هندسی نشان داده شده در شکل ۱، شامل شعاع انحنای R_1 ، زاویه انحنای θ_1 ، شعاع انحنای R_2 و زاویه انحنای θ_2 با اعمال مقادیر مختلف مطابق جدول ۱ و با در نظرگیری ثابت بودن محیط، مقادیر مختلف پارامترها به دست می‌آید.

$$2L + 2(R_1\theta_1 + R_2\theta_2) = cte \quad (1)$$

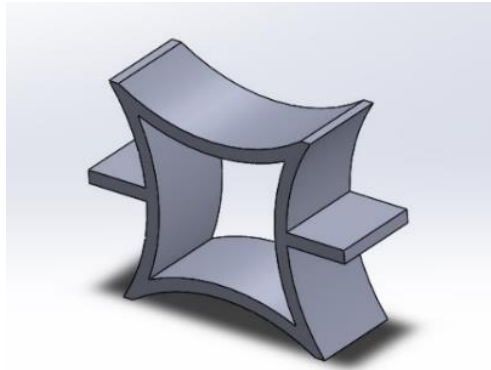


شکل ۱ پارامترهای متغیر سلول ساختار آگرتیک

جدول ۱ مقادیر مختلف پارامترهای متغیر سلول آگرتیک و همچنین مقادیر ورودی شبکه عصبی مصنوعی

شماره	L (mm)	R ₁ (mm)	θ ₁ (deg.)	R ₂ (mm)	θ ₂ (deg.)
۱	۱۰	۹/۳۶	۹۰	۹/۳۶	۹۰
۲	۱۰	۹/۳۶	۹۰	۱۴/۰۴	۶۰
۳	۱۰	۱۴/۰۴	۶۰	۹/۳۶	۹۰
...
۳۴	۶	۱۴/۱۷	۹۰	۱۰/۶۳	۶۰
۳۵	۶	۲۱/۲۶	۶۰	۷/۰۸	۹۰
۳۶	۶	۲۱/۲۶	۶۰	۱۰/۶۳	۶۰

در این پژوهش به مدل‌سازی جامد اولیه سازه مشبک آگرتیک با خواص پلی لاکتیک اسید (PLA) با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز پرداخته شده است. به کمک نرم‌افزار سالیدورکز، یک سلول از سازه شبکه‌ای آگرتیک را مطابق جدول ۱ در پارامترهای مختلف R_1 ، θ_1 ، R_2 ، θ_2 ، L ، در ۳۶ حالت هندسی مختلف، مدل‌سازی صورت گرفته است. به طور مثال نمونه شماره ۱ جدول مطابق شکل ۲ می‌باشد:



شکل ۲ یک نمونه از ۳۶ مدل ترسیم شده با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی سالیدورکز

۲-۲- شبیه‌سازی عددی

در این بخش تمامی مراحل مدل‌سازی، تعریف خواص مواد، شرایط مرزی و شبکه‌بندی انجام می‌گیرد. در جدول ۲ خواص مکانیکی برای الاستیک و در جدول ۳ خواص مکانیکی برای پلاستیک سازه آگرتیک نشان داده شده است. ۳۶ مدل سلول آگرتیک تحت جابجایی در راستای محور عمودی y می‌باشد. که با اجرای تحلیل، سلول آگرتیک تحت شرایط تعریف شده و جابجایی قرار گرفته، رفتار مکانیکی و داده‌های موردنیاز جهت آموزش شبکه عصبی مصنوعی و نمودار نیرو-جابجایی، به دست می‌آید. در شکل ۴ قسمت بحث و نتیجه‌گیری یک نمونه ساختار شبیه‌سازی شده با آباکوس و در شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی آورده شده است. جدول ۴ داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس که داده‌های خروجی شبکه عصبی مصنوعی می‌باشند، نشان می‌دهد.

جدول ۲ خواص مکانیکی برای الاستیک سازه آگرتیک

(E) مدول یانگ	(U) ضریب پواسون
۲۱۲۶ مگاپاسکال	۰/۳

جدول ۳ خواص مکانیکی برای پلاستیک سازه آگرتیک

کرنش پلاستیک	تنش تسلیم
۰	۳۵/۱۷ مگاپاسکال
۰/۰۴	۳۷/۷۶ مگاپاسکال

جدول ۴ داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و هم‌چنین مقادیر خروجی شبکه عصبی مصنوعی

شماره	مدول یانگ (E)	انرژی جذب شده (Ab)	بیش‌ترین بارگذاری (PL)
۱	۰/۳۹	۵۷/۹۳	۲۳/۳۱
۲	۰/۴۱	۳۴/۵۹	۶/۱۲
۳	۰/۴۲	۱۵۲/۹۸	۲۳/۳۳
...
۳۴	۰/۲۹	۵۳۵/۱۶	۳۱۸/۳۷
۳۵	۰/۲۷	۵۴۴/۸۲	۳۹/۸۰
۳۶	۰/۲۹	۲۰۵/۲۰	۲۷/۴۷

۲-۳- شبکه عصبی مصنوعی

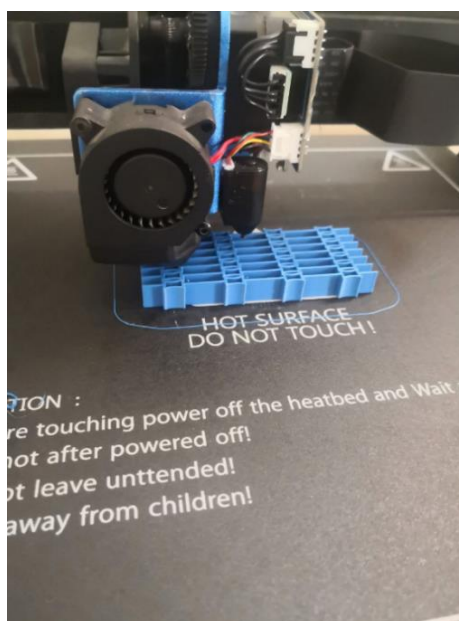
در این پژوهش با استفاده از مقادیر به دست آمده از نتایج نرم افزار آباکوس، داده‌های به دست آمده در جدول ۳ و جدول ۴ نشان داده شده است و با داشتن داده‌های ورودی و خروجی، شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده می‌شود. شبکه عصبی آموزش دیده و ۷۰ درصد داده‌ها به آموزش و ۳۰ درصد مابقی را به آزمایش اختصاص داده است. آموزش داده شده به شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از الگوریتم بیزین نرم افزار متلب در کوتاه‌ترین زمان ممکن انجام شده است. در ادامه برای یافتن رابطه بین ورودی (متغیرهای مستقل) و خروجی (متغیرهای وابسته) از روش رگرسیون استفاده شده است. تعداد لایه‌های ورودی، ۵ لایه شامل (شعاع انحنای R_1 ، زاویه انحنای θ_1 ، شعاع انحنای R_2 ، زاویه انحنای θ_2 ، طول L) و تعداد لایه‌های خروجی، ۳ لایه شامل (انرژی جذب شده Ab ، مدول الاستیک E ، بیش‌ترین بارگذاری PL) و تعداد لایه‌های پنهان، ۸ لایه می‌باشد. آموزش داده می‌شود. برای داده‌های به دست آمده تحت جابجایی در راستای محور عمودی y صورت گرفته شده است. درصد دقت پیش‌بینی مقادیر آموزش دیده بالای ۹۵ درصد می‌باشد. علت استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به دست آوردن تابع هدف می‌باشد. نتیجه آموزش شبکه عصبی در قسمت بحث و نتیجه‌گیری آمده است.

۲-۴- بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم بهینه‌سازی است که از مفاهیم الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌کند. الگوریتم ژنتیک یک جست‌وجوی تصادفی هدفمند محسوب می‌شود و از مسیرهای مختلف استفاده می‌کند تا به جواب برسد. در این پژوهش با به دست آوردن تابع هدف از شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از نرم‌افزار متلب، بهینه‌سازی سازه آغاز می‌گردد. هدف از بهینه‌سازی به حداکثر رساندن میزان جذب انرژی می‌باشد. با توجه به این که شبکه عصبی به خوبی آموزش دیده و به خوبی پیش‌بینی را انجام می‌دهد. نتیجه بهینه‌سازی در شکل ۱۰ در قسمت بحث و نتیجه‌گیری آمده است.

۲-۵- ساخت ساختار بهینه‌سازی شده

در این پژوهش از دستگاه چاپ سه‌بعدی مدل‌سازی رسوب ذوب شده (FDM) استفاده شده است. FDM نوعی دستگاه چاپ سه‌بعدی است که از فرایند پلاستیک ذوب شده برای ایجاد یک شیء فیزیکی استفاده می‌کند. برای انجام ساخت نمونه از رشته PLA استفاده شده است. در فایل STL، ساختار کلی مدل‌های بهینه شده در نرم‌افزار آباکوس در دستگاه چاپ‌گر قرار داده شده و با سرعت چاپ ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه، دمای نازل ۲۱۰ درجه و قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر شروع به چاپ می‌شود. شکل ۳ چاپ سه‌بعدی ساختار بهینه با دستگاه FDM را نشان می‌دهد.



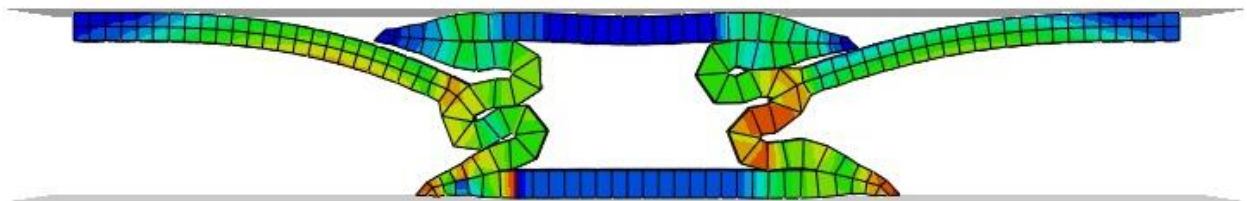
شکل ۳ چاپ سه‌بعدی ساختار نهایی سازه آگرتیک با خواص PLA

در این پژوهش از دستگاه تست کشش- فشار یونیورسال ۱۵ تن استفاده شده است. نمونه بین دو فک بالا و پایین قرار می‌گیرد و تست فشاری با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نتایج تست و نمودار نیرو-جابجایی در بخش نتایج و بحث به طور کامل آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

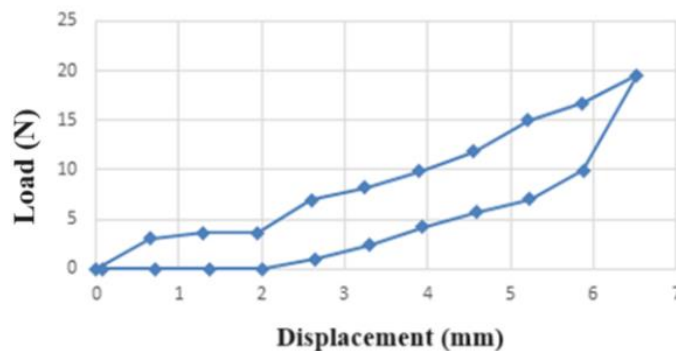
۳-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

شکل ۴ مقادیر پارامترهای شماره ۱ از جدول ۱ ترسیم شده و به صورت نمونه نمایش داده شده است. با استفاده از پارامترهای داده شده شبیه‌سازی انجام شده و در راستای محور عمودی تحت جابجایی قرار گرفته است.



شکل ۴ نمونه‌ای از چاپ سه‌بعدی ساختار نهایی سازه آگرتیکی با خواص PLA با مقادیر پارامتر شعاع انحنا R_1 و R_2 به ترتیب $18/72$ و $6/24$ میلی‌متر، زاویه انحنا θ_1 و θ_2 به ترتیب 60° و 90° درجه، طول $L=10$ میلی‌متر)

در شکل ۵ یک نمونه از نمودار نیرو - جابجایی نشان داده شده است. با کمک داده‌های به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با کمک نرم‌افزار آباکوس به آموزش شبکه عصبی مصنوعی پرداخته شده است.

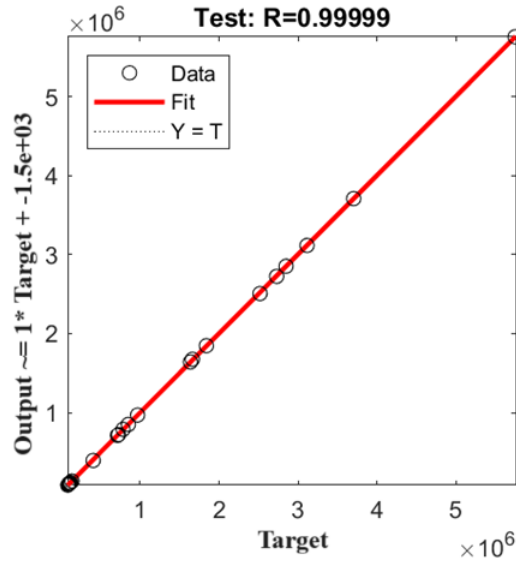


شکل ۵ نمونه‌ای از نمودار نیرو - جابجایی سلول سازه آگرتیکی منحنی شکل با مقادیر پارامتر شعاع انحنا R_1 و R_2 به ترتیب $18/72$ و $6/24$ میلی‌متر، زاویه انحنا θ_1 و θ_2 به ترتیب 60° و 90° درجه، طول $L=10$ میلی‌متر) می‌باشد

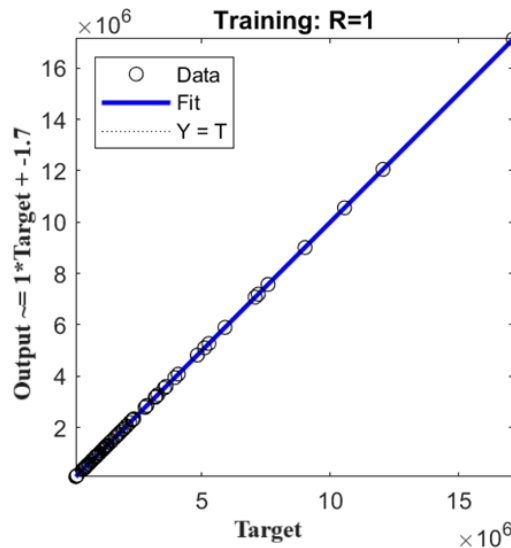
۳-۲- نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی

با استفاده از داده‌های به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی به آموزش شبکه عصبی مصنوعی با کمک نرم‌افزار متلب پرداخته شد. به طور کلی همان‌طور که در نمودار آموزش شکل ۶ و نمودار آزمایش شکل ۷ دیده می‌شود، خروجی مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی بر روی تابع هدف منطبق شده‌اند. با استفاده از تعداد نورون‌های لایه مخفی و افزایش آن به تعداد ۸ نورون، میزان دقت و پیش‌بینی افزایش یافته است و میزان دقت شبکه عصبی مصنوعی بالای ۹۹ درصد می‌باشد.

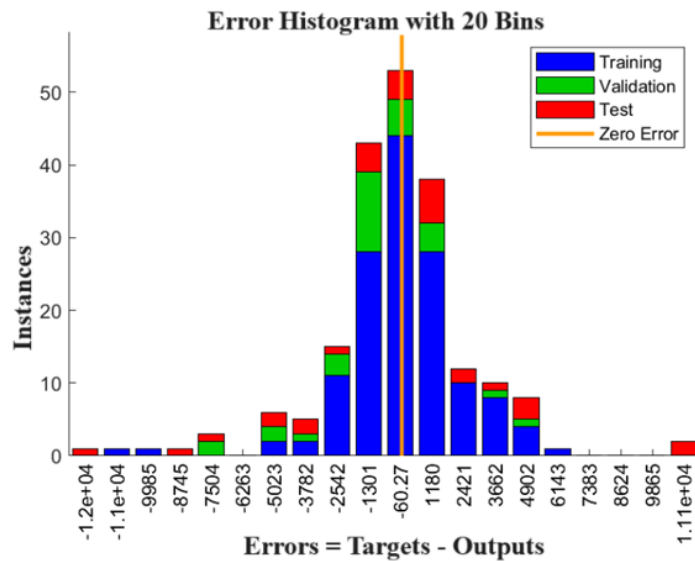
نمودار توزیع خطا در شبکه عصبی متلب نمایش دهنده توزیع خطاهای مدل شبکه عصبی است. این نمودار کمک می‌کند تا بتوان بررسی کرد که چگونه خطاها در طول زمان یا در طول فرایند آموزش شبکه عصبی توزیع شده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد که آیا مدل شبکه عصبی دارای خطا است یا خیر، همچنین اینکه آیا هنگام آموزش، خطاهای بزرگ‌تر چقدر اغلب رخ می‌دهد. در شکل ۸ نمایش گرافیکی توزیع خطا در یک مدل یادگیری ماشین است. محور افقی این نمودار محدوده مقادیر خطا و محور عمودی آن فراوانی خطا را نشان می‌دهد. در این نمودار به راحتی تفاوت بین مقدار واقعی با مقدار پیش‌بینی را می‌توان مشاهده کرد. در محدوده فراوانی خطا $60/27$ - در داده‌های آموزش حدود ۵۵ می‌باشد.



شکل ۶ رگرسیون مقادیر آزمایش شبکه عصبی مصنوعی

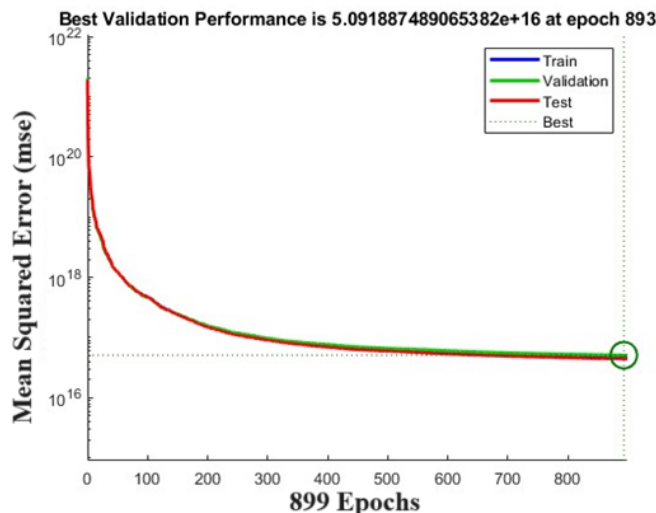


شکل ۷ رگرسیون مقادیر آموزش شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۸ میزان تعلق هر دسته از داده‌ها به ازای خطاهای مختلف

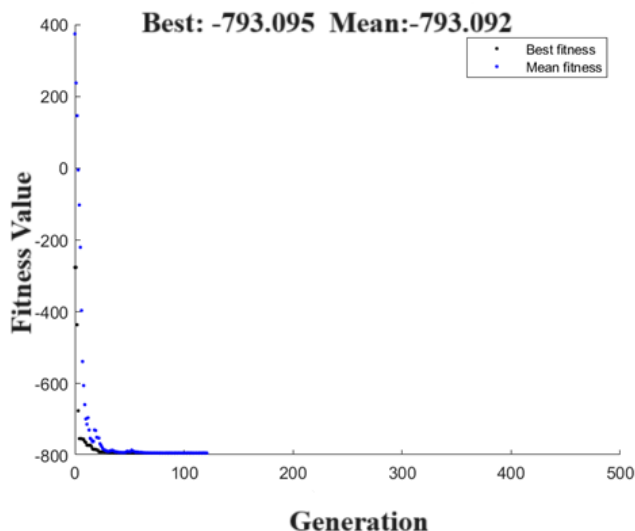
نمودار نشان داده شده در شکل ۹ نشان دهنده میزان مربعات خطا بر حسب تکرار می‌باشد. محور افقی تعداد تکرار و محور عمودی میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد. در این مسئله در قسمت مشخص شده سبز رنگ، ۶ تکرار بدون بهبود را نشان می‌دهد که باعث توقف در تکرار ۸۹۹ شده است.



شکل ۹ نمودار میانگین مربعات خطا بر حسب تعداد تکرار

۳-۳- الگوریتم ژنتیک

نمودار نشان داده شده در شکل ۱۰، بیان‌گر نتایج بهینه‌سازی سازه مشبک آگرتیک تحت جابجایی در راستای x می‌باشد که در هر دوره یا نسل، مقدار بهینه تابع هدف تغییر می‌کند. محور x تعداد دوره‌ها و محور y مقدار تابع هدف می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، همگرایی سریع جواب‌های کاندید به جواب بهینه در الگوریتم ژنتیک پس از حدود ۱۲۰ نسل به مقدار خوبی رسیده است. پیشرفت‌های حاصل شده پس از نسل اول معنادار نخواهد بود؛ با این حال، با مقایسه جواب‌های به دست آمده پس از نسل صد و بیستم، به راحتی می‌توان نتیجه گرفت پیشرفت‌های بسیار خوبی در زمینه همگرایی به جواب بهینه حاصل شده است و بهترین پارامترها برای الگوریتم ژنتیک انتخاب شده است. در جدول ۵، پارامترهای بهینه‌سازی شده سازه آگرتیک تحت جابجایی در راستای عمودی را نشان می‌دهد. در سازه مدل‌سازی شده با ابعاد بهینه بیش‌ترین جذب انرژی را خواهد داشت.



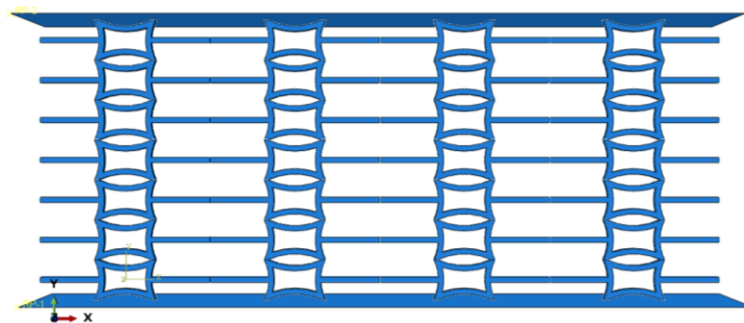
شکل ۱۰ نمودار مقدار تابع برازندگی با پیشروی نسل در بهینه‌سازی در راستای محور عمودی

جدول ۵ مقادیر سازه مشبک آگرتیک بهینه‌سازی شده در راستای جابجایی محور عمودی

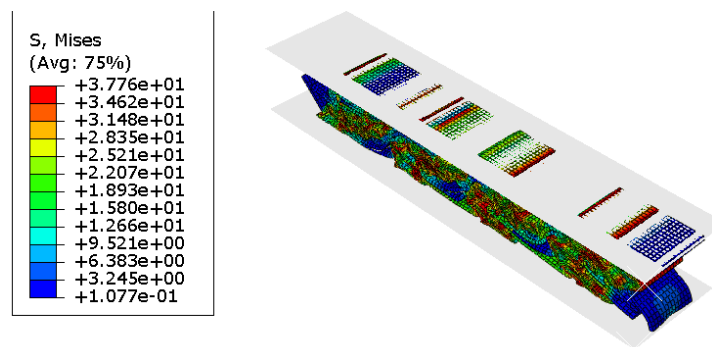
طول L (mm)	شعاع انحنا R_1 (mm)	زاویه انحنا θ_1 (درجه)	شعاع انحنا R_2 (mm)	زاویه انحنا θ_2 (درجه)
۷/۸	۸/۴۷	۶۰	۶	۶۰

۳-۴- نتایج ساختار شبکه‌ای کلی

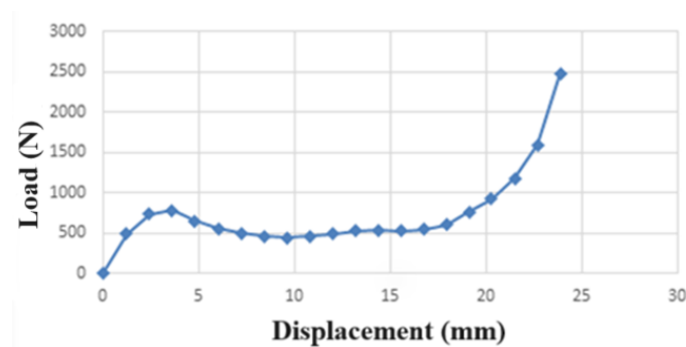
در شکل ۱۱ ساختار شبکه‌ای آگرتیکی بهینه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. در شکل ۱۲ سازه به دلیل دارا بودن خواص پلی لاکتیک اسید، به صورت حافظه‌دار رفت و برگشتی عمل می‌کند. با شروع تحلیل، سازه آگرتیک تا گام ۰/۵ در راستای محور عمودی فشرده شده و پیش می‌رود و سپس تا گام ۱ شکل اولیه خود باز می‌گردد. شکل ۱۳ نتایج نمودار نیرو - جابجایی سازه را نشان می‌دهد. با افزایش جابجایی مقدار نیرو تغییر می‌کند. اوج بار در مقدار نیروی ۲۴۷۷/۶۷ نیوتن و در جابجایی ۲۳/۸۹ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. مساحت سطح زیر نمودار نیرو - جابجایی، مقدار انرژی جذب شده را نشان می‌دهد. در این نمودار تنها تا گام ۰/۵ داده‌ها ترسیم شده‌اند.



شکل ۱۱ ساختار شبکه‌ای مدلسازی شده تحت جابجایی در راستای محور عمودی با ابعاد بهینه



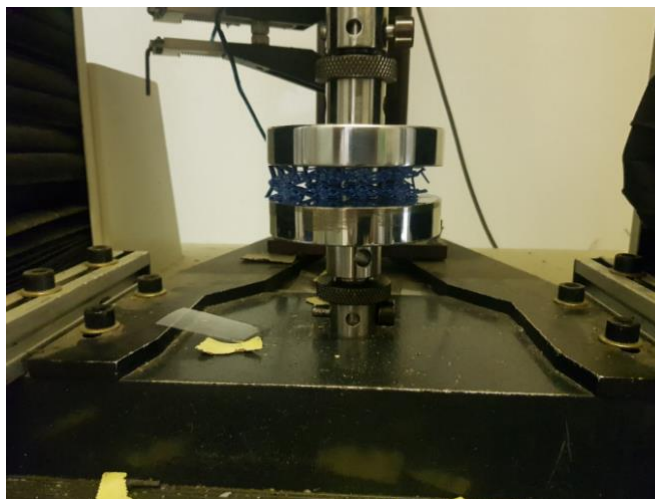
شکل ۱۲ سازه بهینه‌سازی شده آگرتیک تحت جابجایی در راستای محور عمودی y در گام ۰/۵



شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابجایی سازه بهینه‌سازی شده آگرتیک تحت جابجایی در راستای محور عمودی y در گام ۰/۵

۳-۵- نتایج آزمایش تجربی

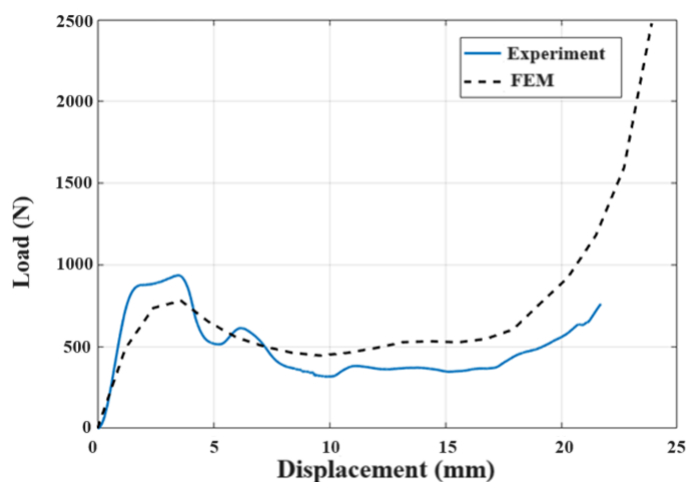
شکل ۱۴ ساختار شبکه‌ای آگرتیکی با خواص PLA تحت بارگذاری در راستای محور افقی y با استفاده از دستگاه تست کشش - فشار را نشان می‌دهد. تست انجام شده با دستگاه تست کشش - فشار سنتام با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است.



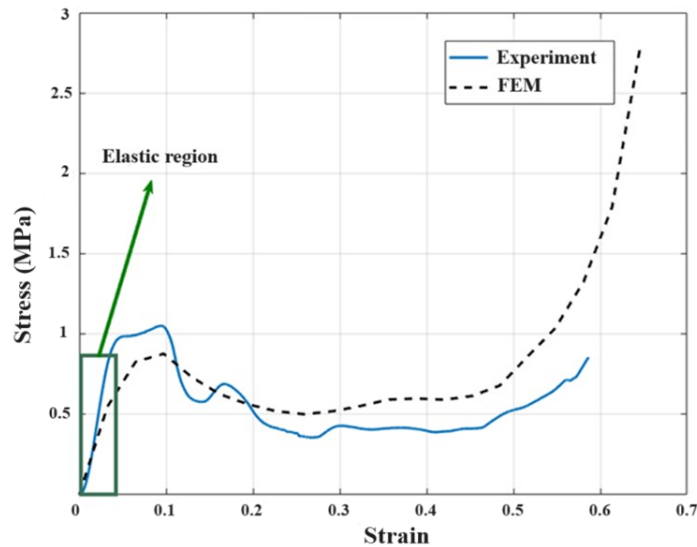
شکل ۱۴ نمودار میانگین مربعات خطا بر حسب تعداد تکرار

شکل ۱۵ مقایسه نتایج آزمایش عددی و تجربی نمودار نیرو - جابجایی را نشان می‌دهد که از تطابق خوبی برخوردار هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با محاسبه مقدار جذب انرژی، مقدار انرژی جذب شده در آزمایش تجربی، $9935/5$ کیلوژول و هم چنین مقدار انرژی جذب شده در آزمایش عددی، $1137/04$ کیلوژول می‌باشد. که درصد اختلاف $12/65$ درصد می‌باشد. در شکل ۱۶ مقایسه نتایج نمودار تنش - کرنش را نشان می‌دهد. در نمودار تنش - کرنش ناحیه خطی الاستیک در نظر گرفته شده است. با محاسبات انجام، مدول الاستیسیته در آزمایش تجربی برابر است $1/023$ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته در آزمایش عددی برابر است با $1/3622$ مگاپاسکال می‌باشد که درصد اختلاف $24/9$ درصد می‌باشد که از مقایسه نتایج آزمایش عددی و تجربی مشاهده شد که تطابق بسیار خوبی باهم دارند.

در جدول ۶ نتایج به دست آمده از هر سه روش آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در جهت x و y مقادیر جذب انرژی، مدول الاستیک و باریشینه در مقایسه باهم از دقت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. نتایج به دست آمده جذب انرژی، مدول الاستیک، بار بیشینه در مقایسه با نتایج روش عددی دارای دقت بالای ۹۵ درصد می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که شبکه عصبی به درستی آموزش دیده است.



شکل ۱۵ نمودار نیرو - جابجایی ساختار شبکه‌ای آگرتیکی در راستای محور عمودی



شکل ۱۶ نمودار تنش - کرنش ساختار شبکه‌ای آگرتیکی در راستای محور عمودی

جدول ۶ نتایج مقادیر روش‌های عددی، تجربی و شبکه عصبی مصنوعی در راستای عمودی

نوع روش	جذب انرژی (کیلوژول)	مدول الاستیک (مگاپاسکال)	بار بیشینه (نیوتن)
روش عددی	۱۱۳۷۵/۰۴	۱۶/۷۸	۱۰۷۰
روش تجربی	۹۹۳۵/۵۰	۱۸/۲۶	۷۵۰
روش شبکه عصبی	۱۰۴۵/۹۸	۱۸/۰۴	۱۱۰۰

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش صورت گرفته به بررسی رفتار سازه آگرتیک منحنی به عنوان جاذب انرژی پرداخته شده است. هندسه این ساختار برای نخستین بار در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه بهینه با استفاده از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک به دست آمده است. برای تشکیل تابع هدف از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. هندسه بهینه با استفاده از دستگاه چاپ گر سه‌بعدی ساخته شده و نتایج آزمایش تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. با توجه به مباحث مطرح شده در این مقاله نتایج در زمینه موضوع مورد بررسی به دست آمد:

- با تغییر هندسه سازه، میزان جذب انرژی تغییر می‌کند. پارامترهای مختلف می‌توانند بر مقدار انرژی جذب شده، مدول الاستیسیته معادل و نیروی بیشینه تأثیرگذار باشند. همچنین مشاهده شد که روند محسوسی میان پارامترهای هندسی و خروجی‌های تحلیل وجود ندارد. به همین خاطر یافتن ساختار بهینه به صورت تحلیلی امکان‌پذیر نیست. همین مورد، لزوم استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مناسب را تأیید می‌کند.
- بهینه‌سازی یک یا چند پارامتر نسبت به یک یا چند پارامتر دیگر، نیازمند یک تابع هدف مناسب است. این تابع باید بتواند مقادیر پیوسته از ورودی‌ها و خروجی‌ها را تولید کند. مشاهده شد که استفاده از شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند گزینه مناسبی برای تشکیل تابع هدف جهت بهینه‌سازی باشد.
- ساختار مورد پژوهش به دلیل انحنایی که دارد کارایی بهتری در مقایسه با ساختار غیرانحنادار دارد.
- سازه‌های مشبک به علت مزایایی از جمله جذب انرژی بالا که دارند کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند.
- شبکه عصبی مصنوعی با کمک تابع هدف پیوسته این امکان را فراهم می‌کند که با وجود تعداد محدودی ورودی و خروجی بتواند به ازای هر پارامتر هندسی، خروجی لازم را تولید کند.
- سلول ارائه شده جذب انرژی خوبی دارد.
- شبکه عصبی مصنوعی ابزار مناسبی جهت تخمین انرژی جذب شده توسط ساختار ارائه شده است.

References

- [1] El Kadi H, Al-Assaf Y. Prediction of the fatigue life of unidirectional glass fiber/epoxy composite laminae using different neural network paradigms. *Composite Structures*. 2002 Feb 1;55(2):239-46. doi: [10.1016/S0263-8223\(01\)00152-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00152-0)
- [2] Zhang Z, Friedrich K. Artificial neural networks applied to polymer composites: a review. *Composites Science and technology*. 2003 Nov 1;63(14):2029-44. doi: [10.1016/S0266-3538\(03\)00106-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00106-4)
- [3] Thankachan T, Prakash KS, Jothi S. Artificial neural network modeling to evaluate and predict the mechanical strength of duplex stainless steel during casting. *Sādhanā*. 2021 Dec;46:1-2. doi: [10.1007/s12046-021-01742-w](https://doi.org/10.1007/s12046-021-01742-w)
- [4] Lee S, Park S, Kim T, Lieu QX, Lee J. Damage quantification in truss structures by limited sensor-based surrogate model. *Applied Acoustics*. 2021 Jan 15;172:107547. doi: [10.1016/j.apacoust.2020.107547](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107547)
- [5] Balokas G, Czichon S, Rolfes R. Neural network assisted multiscale analysis for the elastic properties prediction of 3D braided composites under uncertainty. *Composite Structures*. 2018 Jan 1;183:550-62. doi: [10.1016/j.compstruct.2017.06.037](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.037)
- [6] Ang JY, Majid MA, Nor AM, Yaacob S, Ridzuan MJ. First-ply failure prediction of glass/epoxy composite pipes using an artificial neural network model. *Composite Structures*. 2018 Sep 15;200:579-88. doi: [10.1016/j.compstruct.2018.05.139](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.139)
- [7] Ghanadi N, Farrokhgadi A, Hosseini S. Optimizing the failure analysis of a network structure using artificial neural network and genetic algorithm. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jan 21;9(11):35-44. doi: [10.22034/ijme.2023.400071.1789](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.400071.1789) [In Persian]
- [8] Yan S, Zou X, Ilkhani M, Jones A. An efficient multiscale surrogate modelling framework for composite materials considering progressive damage based on artificial neural networks. *Composites Part B: Engineering*. 2020 Aug 1;194:108014. doi: [10.1016/j.compositesb.2020.108014](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108014)
- [9] Serjouei A, Yousefi A, Jenaki A, Bodaghi M, Mehrpouya MJ. 4D printed shape memory sandwich structures: experimental analysis and numerical modeling. *Smart Materials and Structures*. 2022 Apr 8;31(5):055014. doi: [10.1088/1361-665X/ac60b5](https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac60b5)
- [10] Zeinolabedin-Beygi A, Naeini HM, Talebi-Ghadikolaee H, Rabiee AH, Hajiahmadi S. Predictive modeling of spring-back in pre-punched sheet roll forming using machine learning. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2024 Oct;59(7):463-74. doi: [10.1177/03093247241263685](https://doi.org/10.1177/03093247241263685)
- [11] Akhoundi B, Khosravian E, Modanloo V. Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on fused filament fabrication technology. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jan 21;10(11):16-23. doi: [10.22034/ijme.2024.429126.1885](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.429126.1885) [In Persian]
- [12] Imani L, Rahmani Hanzaki A, Hamzeloo SR, Davoodi B. Modeling and optimization of cutting force and surface roughness in the milling process of Inconel 738 by Neural Network and Genetic Algorithm. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Oct 23;6(5):25-38. doi: [10.1177/0954405419889204](https://doi.org/10.1177/0954405419889204) [In Persian]
- [13] Deilami Azodi H, Badparva H, Zeinolabedin Beygi A. Optimizing AA3105-St12 two-layer sheet in incremental sheet forming process using neural network and multi-objective genetic algorithm. *Modares Mechanical Engineering*. 2022 Jan 10;22(2):121-32. doi: [20.1001.1.10275940.1400.22.2.4.7](https://doi.org/20.1001.1.10275940.1400.22.2.4.7)
- [14] Siahvashi A, Shahbazi M, Niknam SA. The use of a neuro-fuzzy network coupled with meta-heuristic learning methods to predict surface roughness in the machining of aluminum alloys. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jan 21;10(11):49-60. doi: [10.22034/ijme.2024.412021.1816](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.412021.1816) [In Persian]