

Research Article

Modelling the relationship between climatic fluctuations and diameter growth of *Pistacia atlantica* in Zagros forests using Neural NetworkAli Mahdavi ^{1*}, Sahel Ramezani  and Hamidreza Naji **Extended Abstract**

Background and Objectives: Background and Objectives: Climate change, reflected in fluctuations in key variables such as temperature and precipitation, poses a significant threat to forest ecosystems, particularly in semi-arid regions like the Zagros. *Pistacia atlantica* (Wild Pistachio) is a valuable native species in these forests, with growth highly sensitive to water availability. Quantifying the impact of climatic variables on its radial growth is essential for adaptive forest management. While traditional statistical methods have been used, advanced artificial intelligence models such as the Group Method of Data Handling (GMDH) neural network offer superior capabilities for modelling complex, non-linear relationships. The main objectives of this study were to: 1) evaluate the effect of climatic variables (precipitation, temperature, and relative humidity) on the diameter growth of *P. atlantica*; 2) determine the most influential climatic factors; and 3) assess the accuracy of the GMDH neural network model in predicting growth based on climate data.

Materials and Methods: The study was conducted in three habitats of *P. atlantica* (Darreh Shahr, Abdanan, and Majin) in Ilam province, Iran. A total of 18 tree discs (six from each site, divided into two diameter classes: <30 cm and >30 cm) were collected from trees with similar topographic conditions. After surface preparation and polishing, high-resolution images were taken, and annual ring widths were precisely measured using Motic image software. Wood density was determined for each sample. Climatic data (annual precipitation, average, minimum, and maximum temperature, and relative humidity) for the past 15 years were obtained from the nearest meteorological stations. The relationship between ring width indices and climatic variables was first analysed using Pearson correlation in SPSS software. The GMDH neural network model was then implemented in MATLAB to predict radial growth based on climatic inputs. The data were randomly divided into training (70%), validation (15%), and test (15%) sets. Model performance was evaluated using statistical indices: Root Mean Square Error (RMSE), Mean Squared Error (MSE), and Correlation Coefficient (R).

Results: Statistical analysis revealed a significant positive correlation between annual ring width and both annual precipitation ($r=0.188$, $p=0.002$) and relative humidity ($r=0.173$, $p=0.004$). In contrast, a significant negative correlation was found with average annual temperature ($r=-0.185$, $p=0.002$) and maximum annual temperature ($r=-0.152$, $p=0.013$). No significant correlation was observed with minimum annual temperature. The GMDH neural network model demonstrated high accuracy in predicting radial growth from climatic variables, with performance metrics on the total dataset as follows: RMSE= 3.86, MSE= 14.88, and $R=0.90$. The model's predictions closely matched the observed growth trends, confirming its effectiveness.

Conclusion: The radial growth of *Pistacia atlantica* in the semi-arid Zagros forests is significantly influenced by climatic fluctuations. Increased precipitation and relative humidity enhance growth, while rising temperatures, particularly maximum temperatures, have a suppressive effect, likely due to increased evapotranspiration and water stress. The successful application of the GMDH neural network model, with its high predictive accuracy ($R=0.90$), establishes it as a powerful and reliable tool for modelling climate-growth relationships in complex forest ecosystems. These findings provide critical insights for developing climate-adaptive conservation and management strategies to enhance the resilience of *P. atlantica* stands against future climate variability.

Keywords: Climate Change, Dendrochronology, GMDH Neural Network, Growth rings, *Pistacia atlantica*, Zagros forests.

1 Dept. Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, I.R. Iran

*Corresponding author, E-mail: a.mahdavi@ilam.ac.ir

DOI: [10.21859/jfer.4.2.50](https://doi.org/10.21859/jfer.4.2.50)

ISSN: 2423-4427 (Online); 2423-4095 (Print)

Received: 16.05.2025, Accepted: 07.02.2026,
Online Published: 16.02.2026

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی رابطه بین نوسانات اقلیمی و رویش قطری گونه بنه در جنگل‌های زاگرس با استفاده از شبکه‌عصبی

علی مهدوی^{*}، ساحل رضائی^۱، حمیدرضا ناجی^۱

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: تغییر اقلیم که از طریق نوسانات متغیرهای کلیدی مانند دما و بارش تظاهر می‌یابد، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های جنگلی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک‌ای مانند زاگرس محسوب می‌شود. گونه بنه (*Pistacia atlantica*) از گونه‌های بومی باارزش این جنگل‌هاست که رشد آن به شدت به دسترسی آب حساس است. کمی‌سازی تأثیر متغیرهای اقلیمی بر رشد شعایی این گونه، برای مدیریت تطبیقی جنگل ضروری است. اگرچه از روش‌های آماری سنتی استفاده شده است، اما مدل‌های هوش مصنوعی پیشرفته‌ای مانند شبکه‌عصبی ساختار گروهی داده (GMDH)، به دلیل قابلیت بالاتر در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی، مزیت ویژه‌ای دارند. اهداف اصلی این پژوهش شامل ارزیابی اثر متغیرهای اقلیمی (بارش، دما، رطوبت نسبی) بر رشد قطری بنه، تعیین مهم‌ترین عوامل اقلیمی تأثیرگذار، و ارزیابی دقت مدل شبکه‌عصبی (GMDH) در پیش‌بینی رشد بر اساس داده‌های اقلیمی بود.

مواد و روش‌ها: این مطالعه در سه رویشگاه بنه (دره‌شهر، آبدانان و ماژین) در استان ایلام انجام شد. در مجموع ۱۸ دیسک درختی (از هر منطقه ۶ دیسک، در دو طبقه قطری کمتر و بیشتر از ۳۰ سانتی‌متر) از درختانی با شرایط توپوگرافی مشابه برداشت شد. پس از آماده‌سازی و صیقل‌دادن سطوح، تصاویر با وضوح بالا تهیه و پهنای دایره سالیانه با استفاده از نرم‌افزار Motric image با دقت اندازه‌گیری شد. جرم حجمی چوب نیز برای هر نمونه تعیین گردید. داده‌های اقلیمی (بارش سالانه، دمای میانگین، حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی) مربوط به ۱۵ سال گذشته از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی اخذ شد. در ابتدا، رابطه بین شاخص‌های پهنای دایره و متغیرهای اقلیمی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS تحلیل شد. سپس، مدل شبکه‌عصبی GMDH در محیط MATLAB نسخه ۲۰۱۴ برای پیش‌بینی رشد شعایی بر پایه داده‌های اقلیمی پیاده‌سازی گردید. داده‌ها به‌صورت تصادفی به مجموعه‌های آموزش (۷۰٪)، اعتبارسنجی (۱۵٪) و آزمون (۱۵٪) تقسیم شدند. عملکرد مدل با شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب همبستگی (R) ارزیابی شد.

یافته‌ها: تحلیل آماری همبستگی مثبت و معناداری را بین پهنای دایره سالیانه با هر دو متغیر بارش سالانه ($r = 0.188, p = 0.002$) و رطوبت نسبی ($r = 0.173, p = 0.004$) نشان داد. در مقابل، همبستگی منفی و معناداری با دمای میانگین سالانه ($r = -0.185, p = 0.002$) و دمای حداکثر سالانه ($r = -0.152, p = 0.013$) مشاهده شد. با دمای حداقل سالانه همبستگی معناداری یافت نشد. مدل شبکه‌عصبی GMDH دقت بالایی در پیش‌بینی رشد شعایی از متغیرهای اقلیمی نشان داد، به‌طوری‌که معیارهای عملکرد آن روی کل مجموعه داده به شرح زیر بود: $RMSE = 3.86$ ، $MSE = 14.88$ و $R = 0.90$. پیش‌بینی‌های مدل به‌خوبی با روندهای رشد مشاهده‌شده مطابقت داشت که مؤید کارایی آن است.

نتیجه‌گیری: رشد شعایی بنه در جنگل‌های نیمه‌خشک زاگرس به‌طور معناداری تحت تأثیر نوسانات اقلیمی قرار دارد. افزایش بارش و رطوبت نسبی رشد را به‌طور مثبت افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش دما، به‌ویژه دمای حداکثر دارای اثر بازدارنده بود که به احتمال قوی ناشی از افزایش تبخیر و تعرق و ایجاد تنش آبی است. کاربرد موفق مدل شبکه‌عصبی GMDH با دقت پیش‌بینی بالا ($R = 0.90$) آن را به عنوان ابزاری قدرتمند و قابل اعتماد برای مدل‌سازی روابط اقلیم-رشد در اکوسیستم‌های جنگلی پیچیده تثبیت می‌کند. این یافته‌ها بینش‌های مهمی برای تدوین راهبردهای حفاظتی و مدیریتی تطبیقی با اقلیم فراهم می‌آورد تا تاب‌آوری توده‌های بنه در برابر نوسانات اقلیمی آینده افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: بنه، تغییر اقلیم، جنگل‌های زاگرس، دندروکرونولوژی، دایره رویشی، شبکه‌عصبی GMDH.

DOI: 10.21859/jfer4.1.50.

شاپا: ۴۴۲۷-۴۴۲۳ (برخط): ۴۰۹۵-۴۴۲۳ (چاپی)

^۱ گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایران.^{*} پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mahdavi@ilam.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶؛ تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۱۸؛ تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷

مقدمه

البته، این الگو در همه مناطق یکسان نیست و در ارتفاعات بالا یا عرض‌های جغرافیایی خاص که دما عامل محدودکننده اصلی است، رابطه مثبتی بین دما و رشد مشاهده شده است. (Stacy *et al.*, 2006; Flower *et al.*, 2011) همچنین، رطوبت نسبی به‌عنوان عاملی مؤثر بر تعادل آبی گیاه، می‌تواند اثر مثبتی بر رشد داشته باشد. لازم به ذکر است که در برخی مطالعات، رابطه معناداری بین رشد و برخی از این عوامل اقلیمی مشاهده نشده که احتمالاً ناشی از تفاوت در شرایط محلی، ژنتیک یا روش‌شناسی است (Bortozzi *et al.*, 2002; Habibi Bibalani *et al.*, 2007).

گونه بنه (*Pistacia atlantica*) از گونه‌های مهم و باارزش ناحیه رویشی زاگرس است که سطح وسیعی از جنگل‌های ایران و استان ایلام را پوشش می‌دهد و متأسفانه در سالیان اخیر تحت تأثیر فشارهای اقلیمی و انسانی قرار گرفته است (Zahedipour *et al.*, 2004; Naghipour Borj *et al.*, 2019).

با این حال، مطالعات کمی به بررسی کمی رابطه بین نوسانات اقلیمی و رویش این گونه پرداخته‌اند و اکثر پژوهش‌های پیشین بر تحلیل‌های آماری کلاسیک یا مدل‌های توزیع گونه متمرکز بوده‌اند. از محدود مطالعات انجام شده در این خصوص مطالعه (Naghipour Borj *et al.*, 2019) به پیش‌بینی پراکنش آبی بنه با توجه به تغییرات اقلیم پرداخت و (Mirzaeizadeh *et al.*, 2023) مدل‌سازی پراکنش کنونی آن را انجام دادند، اما پژوهشی که به طور خاص رابطه نوسانات اقلیمی سالانه با رویش قطری این گونه را با استفاده از مدل‌های شبکه‌عصبی مانند GMDH بررسی کند، مشاهده نشد. مدل‌سازی روابط پیچیده و غالباً غیرخطی بین نوسانات اقلیمی و رشد شعایی درختان، که در مطالعات دندروکرونولوژیک مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران نیز به کرات مشاهده شده است (Arsalani *et al.*, 2022; Alipoorfard *et al.*, 2023) و نیازمند رویکردهای تحلیلی پیشرفته‌ای است که توانایی استخراج الگوهای پنهان و تعاملات پیچیده میان متغیرهای مؤثر را دارا باشند. در این راستا،

تغییر اقلیم به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده که تأثیرات آن در اکوسیستم‌های جنگلی به وضوح قابل مشاهده است (Ray, 2008; Trigo *et al.*, 2005). تغییر در میانگین و شدت متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارندگی، پویایی جنگل‌ها را با تأثیر بر رویش، زنده‌مانی و پراکنش گونه‌های درختی، عمیقاً تحت تأثیر قرار می‌دهد (Bonan, 2008; Thomas *et al.*, 2010; Allen *et al.*, 2004). رویش درختان، به‌عنوان شاخصی کلیدی از سلامت و پویایی اکوسیستم، از سالی به سال دیگر متغیر بوده و اغلب با نوسانات آب‌وهوایی همبستگی نزدیکی دارد (Itter *et al.*, 2016). این تغییرات رویشی که در مشخصه‌هایی مانند پهنای حلقه‌های سالیانه و دانسیته چوب ثبت می‌شوند، از اولین واکنش‌های درختان به تغییرات محیطی محسوب می‌شوند (Savva *et al.*, 2003; Das *et al.*, 2015). در واقع حلقه‌های رویشی به‌عنوان بایگانی‌های ارزشمندی از تاریخچه اقلیمی عمل می‌کنند (Fritts, 1976; Hamidi *et al.*, 2021). بنابراین، درک رابطه بین اقلیم و رویش برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم آینده و تدوین راهبردهای مدیریت تطبیقی امری ضروری است. (Maaten, 2012) در این میان، بارندگی و دما به‌عنوان اصلی‌ترین عوامل اقلیمی مؤثر بر رویش درختان در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شوند (Hamidi *et al.*, 2021; Attarood *et al.*, 2015). در این مناطق، بارندگی با تأمین رطوبت خاک، نقش مثبت و غالباً تعیین‌کننده‌ای در رشد درختان ایفا می‌کند (Cherubini *et al.*, 2003; Pourtahmasbi *et al.*, 2008). مطالعات متعددی در جنگل‌های زاگرس همبستگی مثبت و معناداری بین بارندگی و رویش قطری گونه‌هایی مانند بلوط ایرانی گزارش کرده‌اند. (Najafi *et al.*, 2012; Poursartip *et al.*, 2015; Radmehr *et al.*, 2012) در مقابل، افزایش دما از طریق تشدید تبخیر و تعرق و ایجاد تنش خشکی، معمولاً تأثیر منفی بر رویش درختان در این مناطق دارد (Sheng *et al.*, 2007; Van der werf *et al.*, 2012; Najafi Harsini *et al.*, 2012).

رویش قطری درخت بنه (*Pistacia atlantica*) در جنگل های نیمه خشک زاگرس است. دستیابی به یک مدل پیش بینی گر قوی و قابل اعتماد از این طریق، می تواند چارچوب علمی دقیق تری برای ارزیابی آسیب پذیری این اکوسیستم کلیدی در برابر تغییرات اقلیمی فراهم نموده و مبنایی مستحکم برای تدوین راهبردهای مدیریتی تطبیقی و مبتنی بر شواهد ایجاد کند.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه در جنوب استان ایلام در سه مکان مختلف دره شهر، آبدانان و مازین که دارای رویشگاه های بارزش گونه بنه در استان ایلام هستند (شکل ۱). اطلاعات هواشناسی مناطق مورد مطالعه در جدول ۱ نشان می دهد که این مناطق از لحاظ متغیرهای اقلیمی و هواشناسی در شرایط تقریباً مشابهی قرار دارند (جدول ۱). مهمترین گونه های جنگلی این مناطق مورد مطالعه شامل بلوط ایرانی، بنه، کیکم، ارژن، زالزالک، بادام کوهی و انجیر کوهی است (Mozafarian, 2008).

الگوریتم های یادگیری ماشین^۱ و شبکه های عصبی مصنوعی^۲ به دلیل قابلیت ذاتی در پردازش روابط غیرخطی و توانایی تعمیم پذیری بالا، به طور فزاینده ای در علوم محیطی و منابع طبیعی مورد استفاده قرار می گیرند. (Maxwell et al., 2018) اثربخشی این مدلها در حوزه دندروکرونولوژی، از پیش بینی رشد بر اساس اقلیم (Salehnia & Ahn, 2022) تا مدل سازی صفات درختی پیچیده (Qin et al., 2023) گسترش یافته و برتری آنها را نسبت به روش های رگرسیونی خطی کلاسیک نشان داده است. در میان معماری های مختلف شبکه عصبی، شبکه عصبی ساختار گروهی داده ها^۳ به عنوان یک الگوریتم خودسازمان ده^۴ شناخته می شود که مزایای متعددی از جمله انتخاب خودکار ساختار بهینه مدل، کاهش قابل توجه خطر بیش برزش^۵ که از موانع اصلی در مدل سازی شبکه های عصبی محسوب می شود (Zhang et al., 2000) و قابلیت بالای پردازش مجموعه داده های با ابعاد مختلف را ارائه می دهد. بنابراین، نوآوری اصلی و هدف عملیاتی این پژوهش، بکارگیری مدل شبکه عصبی GMDH به منظور مدل سازی کمی و پیش بینی رابطه بین متغیرهای اقلیمی کلیدی (بارش، دما، رطوبت نسبی) و

جدول ۱- اطلاعات پایه از مشخصات مناطق مورد مطالعه

Table 1- Basic information on the characteristics of the study areas

مناطق مورد مطالعه Study areas	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع از سطح دریا (m) Height above sea level	میانگین بارندگی سالانه (mm) Precipitation	میانگین دمای سالیانه (°C) Average annual temperature	رطوبت نسبی relative humidity	روزهای یخبندان Frost days
دره شهر DarehShahr	33°3'30"	47°19'30"	933	426.3	21.4	44	21
آبدانان Abdanan	32°54'37"	47°17'55"	1010	524.4	22.4	41	4
مازین Majin	33°95'32"	47°78'98"	880	480.52	21.3	45	21

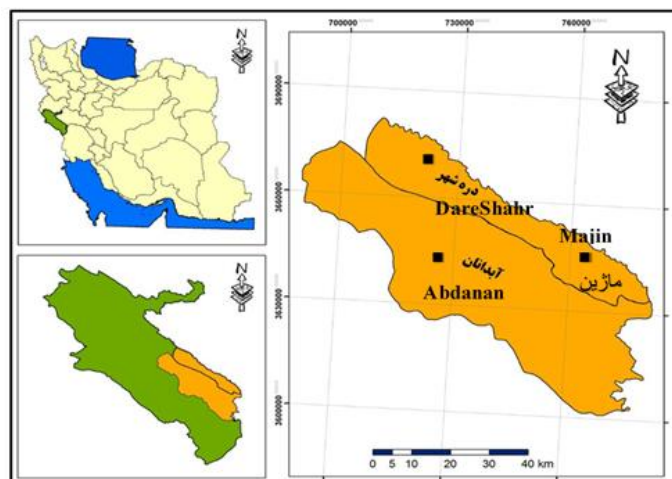
⁴ self-organizing

⁵ Overfitting

¹ Machine Learni

²Artificial Neural Networks - ANNs

³ Group Method of Data Handling - GMDH



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد بررسی در استان ایلام

Figure 1- Location of study area in Liam province

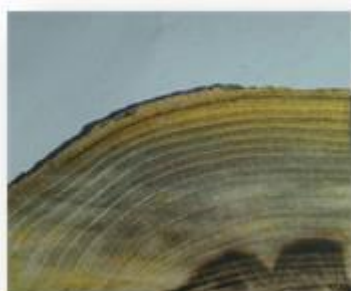
روش نمونه‌برداری در عرصه جنگل

در این تحقیق ابتدا در منطقه مورد مطالعه با بازدید میدانی شرایط رویشگاه بررسی و پس از جنگل گردشی و کسب اطلاعات اولیه از منطقه مورد مطالعه، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ اداره کل منابع طبیعی استان ایلام، مرز مناطق مورد مطالعه مشخص گردید. سپس درختانی با شرایط میکروکلیمای یکسان در هر منطقه انتخاب گردید. انتخاب منطقه نیز بر اساس حضور گونه بانه صورت گرفت. انتخاب حجم نمونه در مطالعات دندروکرونولوژی، به ویژه در رویشگاه‌های همگن با شرایط توپوگرافی و اقلیمی یکسان، عمدتاً بر اساس اصول تکراری‌پذیری و دستورالعمل‌های پذیرفته‌شده در مطالعات پیشین مشابه صورت گرفت. در بررسی منابع و مطالعات محققان در کشورهای مختلف با توجه به شرایط متفاوت تعداد نمونه‌های مختلفی (۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰) نمونه‌گیری شده است (Nasseri Karimvand et al., 2016; Kose et al., 2011; Fretts, 1976). در این تحقیق، با هدف دستیابی به یک کرونولوژی میانگین منطقه‌ای معتبر و کاهش اثرات نویز ناشی از عوامل محلی و فیزیولوژیکی فردی، از ۶ درخت در هر منطقه نمونه‌برداری شد. برای

این منظور درختان نمونه بانه در طبقات قطری بیشتر از ۳۰ سانتی‌متر و کمتر از ۳۰ سانتی‌متر تقسیم شدند و در هر طبقه قطری در هر منطقه ۳ نمونه برداشت شد (با توجه به مشابه بودن شرایط اقلیمی و توپوگرافی سه منطقه نمونه مجموعاً ۹ نمونه رویشی بیشتر از ۳۰ سانتی‌متر و ۹ نمونه رویشی کمتر از ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد). لازم به ذکر است که سعی شد تا نمونه‌برداری از درختان در ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت یکسان انجام گیرد و نمونه‌ها در ارتفاع معادل یکسان شوند. همچنین موقعیت مکانی هر درخت نمونه با استفاده از GPS ثبت شد.

روش آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا از هر نمونه به پهنای یک سانتی‌متر برش زده شد و سپس سمباده با استفاده از سه نوع سمباده زیر (۸۰)، متوسط (۲۴۰) و نرم (۴۰۰) انجام گردید و در مرحله بعد از نمونه‌های سمباده‌زده شده تصاویری با کیفیت تهیه شد.



شکل ۲- صاف سازی سطوح دیسک های نمونه جهت مشخص شدن دایر سالیانه

Figure 2. Smoothing the surfaces of sample discs to determine the annual circles

مدل سازی پارامترهای اقلیمی

در این بررسی برای مدل سازی با توجه به کاربرد شبکه های عصبی پرسپترون و الگوریتم *GMDH* در مسائل پیش بینی و قابلیت بالای آن در تعمیم نتایج از این شبکه ها برای پیش بینی پارامترهای اقلیمی و تاثیر آنها بر رویش قطری گونه بنه با استفاده از نرم افزار MATLAB نسخه ۲۰۱۴ استفاده شد.

مجموعه داده های حاصل از اندازه گیری های میدانی و اقلیمی (شامل تعداد و رکورد) به طور تصادفی به سه بخش تقسیم شدند: ۷۰٪ برای آموزش^۶، ۱۵٪ برای اعتبارسنجی^۷ و ۱۵٪ برای آزمون نهایی^۸ داده های اعتبارسنجی در حین فرآیند آموزش برای جلوگیری از بیش برآزش و تعیین نقطه توقف بهینه آموزش مورد استفاده قرار گرفتند.

معیار اصلی برای انتخاب ساختار نهایی مدل و توقف فرآیند یادگیری، دستیابی به کمترین مقدار خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) بر روی مجموعه داده های اعتبارسنجی بود. در نهایت، مدلی که بهترین تعمیم پذیری (پایین ترین خطا) را بر روی داده های مستقل اعتبارسنجی و آزمون نشان داد، به عنوان مدل نهایی انتخاب گردید.

سپس از تصاویر تهیه شده در نرم افزار Motic image که دارای دقت بسیار بالایی است، استفاده گردید تا پهنای دایر اندازه گیری شوند. اندازه گیری پهنای با واحد اندازه گیری میکرون و نوع خط نرمال و پهنای خط یک، با بزرگنمایی ۱۰۰ از پوست (بیانگر جدیدترین حلقه تشکیل شده در آخرین سال رشد) به سمت مغز (بیانگر اولین حلقه های تشکیل شده در سال های اولیه رشد) برای تمام نمونه ها انجام گرفت. سپس میزان میانگین میزان پهنای دایر سالیانه در هر ۶ نمونه از هر منطقه در بازه زمانی ۱۵ سال محاسبه گردید.

برای اندازه گیری دانسیته هم ابتدا از هر نمونه رویشی قطعاتی در اندازه یک سانتی متر تهیه شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۲ درجه قرار داده شد. بعد از ۲۴ ساعت نمونه ها از آون خارج شده و وزن خشک نمونه ها با ترازوی آزمایشگاه با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه گیری گردید. برای به دست آوردن حجم نمونه ها، ابتدا نمونه ها با پارافین پوشانده شده و سپس داخل آب مقطر قرار داده شد و به این وسیله حجم بر حسب سانتی متر مکعب به دست آمد. پس از آن با کمک رابطه (۱) دانسیته چوب به دست آمد.

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{g}{cm^3} \quad (1)$$

⁶ Train

⁷ Validation

⁸ Test

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ با اعمال عملیات‌های توصیفی (از جمله میانگین، انحراف معیار، حدقل و حداکثر داده‌های مربوط به متغیرهای تحقیق) و آزمون‌های آماری استنباطی (نظیر ضریب همبستگی پیرسون، تحلیل واریانس یک طرفه و t -test و آزمون دانکن) با توجه به فرضیات تحقیق، تجزیه و تحلیل گردید. برای

اطمینان از نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگورف-اسمیرنوف استفاده شد.

نتایج آماری توصیفی

جدول ۲ میانگین بارش و انحراف معیار بارش در طی سال را به تفکیک سه منطقه مورد مطالعه نشان داده شد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، میزان بارش در سه منطقه مورد مطالعه در طی فصول سال تقریباً یکسان گزارش شده است.

جدول ۲- میانگین بارش باران در سال به تفکیک ماه‌های سال در سه منطقه مورد مطالعه

Table 2- Average Annual precipitation by month in the three study areas

فصل‌ها Seasons	دره شهر DarehShahr	آبدانان Abdanan	ماژین Majin
فروردین April	63.2	79.9	86
اردیبهشت May	36.4	50.4	22
خرداد June	0.6	0.2	0
تیر July	0	0.1	0
مرداد August	0.1	0.8	0
شهریور September	0.6	1.3	1
مهر October	6.2	7.3	5.8
آبان November	71.9	109.6	70.4
آذر December	65.6	91.7	95.3
دی January	54.4	72.6	69.4
بهمن February	84.5	85.6	81.7
اسفند March	42.8	56.9	44.9

جدول ۳ نشان می‌دهد که چون میزان پهنای دوایر سالیانه و دانسیته بین درختان با قطر کم و زیاد معنی‌دار نیست، لذا می‌توان اظهار داشت که تفاوت معناداری از

نظر میزان پهنای دوایر و دانسیته به تفکیک قطر بیشتر و کمتر از ۳۰ وجود ندارد.

جدول ۳- نتایج تفاوت میزان پهنای دوائر سالیانه و دانسیته به تفکیک قطر بیشتر و کمتر از ۳۰ برای سه منطقه

Table 3- The results of the difference in the width of the annual circles and the density according to the diameter greater than and less than 30

Sig	Df	Std	میانگین Mean	گروه Group	متغیر Variable
0.405	1	0.352	0.697	<30	پهنا
		0.324	0.732	>30	Annual circle width
0.998	1	0.050	0.828	<30	دانسیته
		0.107	0.830	>30	Density

متغیرهای میانگین دمای سالانه و حداکثر دمای سالانه هم ارتباط منفی معنی دار با پهنای دوائر سالانه وجود دارد. این در حالی است که بین متغیر حداقل دمای سالانه و پهنای دوائر سالانه هیچ ارتباط معناداری وجود ندارد.

طبق نتایج جدول ۴ برای تعیین ارتباط بین پهنای دوائر سالیانه و متغیرهای اقلیمی از آزمون ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد، نتایج نشان می دهد که بین پهنای دوائر سالیانه و متغیرهای اقلیمی ارتباط مثبت یا منفی معنی دار وجود دارد. همان طوری که در جدول نشان داده شد، بین متغیرهای اقلیمی میزان بارندگی سالانه و رطوبت نسبی ارتباط مثبت و

جدول ۴- نتایج همبستگی پیرسون بین پهنای دوائر سالیانه و متغیرهای اقلیمی

Table 4- The results of Pearson correlation between the width of annual circles and climatic variables

Sig	P	متغیرهای اقلیمی climatic variables
0.002	0.188**	بارندگی سالانه Annual Precipitation
0.002	-0.185**	میانگین دمای سالانه Average annual temperature
0.004	0.173**	رطوبت نسبی Relative Humidity
0.635	-0.029	حداقل دمای سالانه Minimum annual temperature
0.013	-0.152**	حداکثر دمای سالانه Maximum annual temperature

بررسی و ارزیابی صحت مدل و کارکرد مدل شبکه عصبی GMDH

برای ارزیابی و سنجش مدل از چندین معیار آماری شامل، مجموع مربعات میانگین خطای نسبی Mean، میانگین مربع خطا (MSE)، جذر میانگین مجذور خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) استفاده می‌شود.

نمودارهای زیر میزان R و MSE و RMSE و Error Mean را برای اجرای شبکه بر روی تمام داده‌ها را نمایش می‌دهد، که تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد. خطوط آبی رنگ نشان‌دهنده داده‌های اصلی^۹ و خطوط قرمز رنگ نشان‌دهنده داده‌های تخمین زده شده^{۱۰} می‌باشد. در واقع فاصله این خطوط از همدیگر نشان‌دهنده خطا

می‌باشد و هر چه خطوط نزدیکتر باشند، خطا کمتر و برعکس است (شکل ۲).

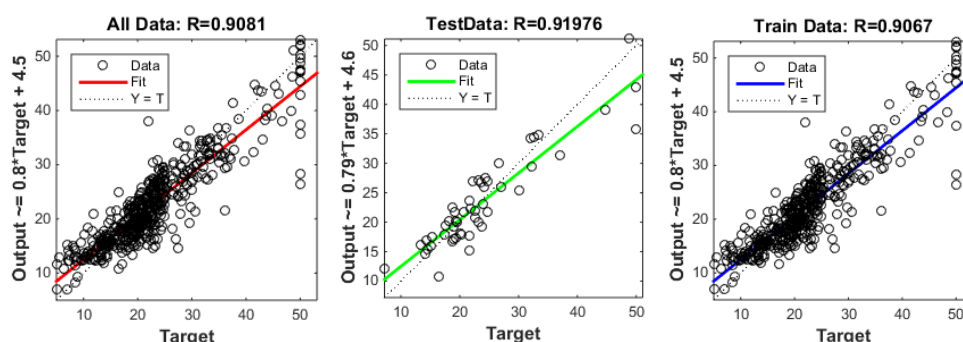
برای پارامتر میانگین خطا به ترتیب مقادیر ۰/۳۴۳۴، ۰/۰۱۰۵۸، ۰/۰۴۰۱۸۸ را داریم که به نوعی نشان دهنده تفاضل خروجی‌ها و متغیرهای هدف (تخمین زده شده) است و این مقادیر به صفر نزدیک هستند که نشان‌دهنده خطای کم و نتایج قابل قبول مدل است MSE. نیز همان واریانس برآوردگر است و می‌تواند اشاره‌ای به میانگین مقدار انحراف مربعات پیش‌بینی‌ها از مقادیر واقعی داشته باشد. برای مقدار MSE به ترتیب مقدار ۱۴/۸۷۵۸، ۱۴/۹۹۰۲ و ۱۳/۸۵۳ به دست آمد.

برای RMSE نیز به ترتیب مقادیر ۳/۸۵۶۹، ۳/۸۷۱۷ و ۳/۷۲۲ به دست آمد که به نوعی تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی را نشان می‌دهد. همچنین سایر معیارها در شکل ۲ آمده است.

جدول ۵ - شاخص‌های آماری پیش‌بینی در مرحله آموزش، آزمون و کل داده‌ها

Table 5- Statistical indicators of prediction in the stage of training, test and total data

معیارها Criteria	Error StD	Error Mean	MSE	RMSE
آزمون Test	3.7465	0.3434	13.853	3.722
آموزش Train	3.876	0.01058	14.990	3.8717
کل داده‌ها Total Data	3.3605	0.040188	14.875	3.8569



شکل ۲- نمودار ضریب همبستگی

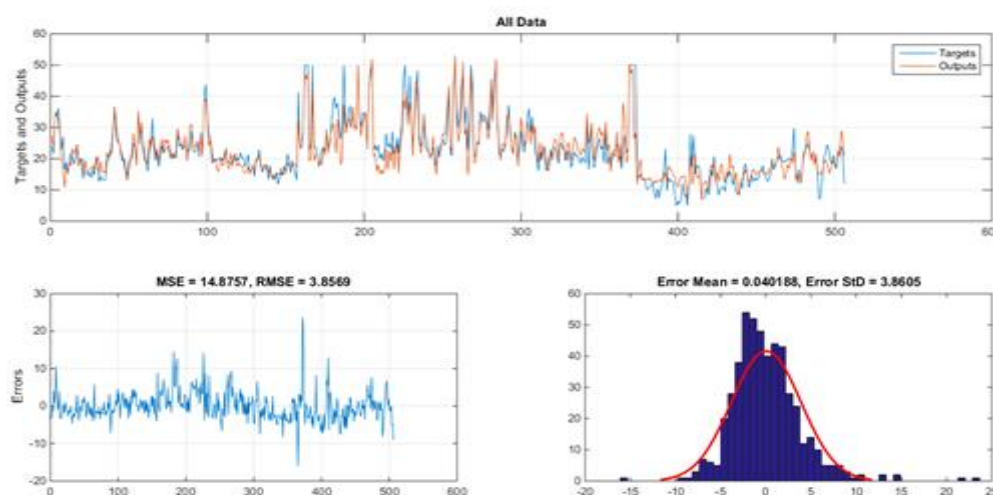
Figure 2- Correlation coefficient chart

⁹ Output

¹⁰ Targets

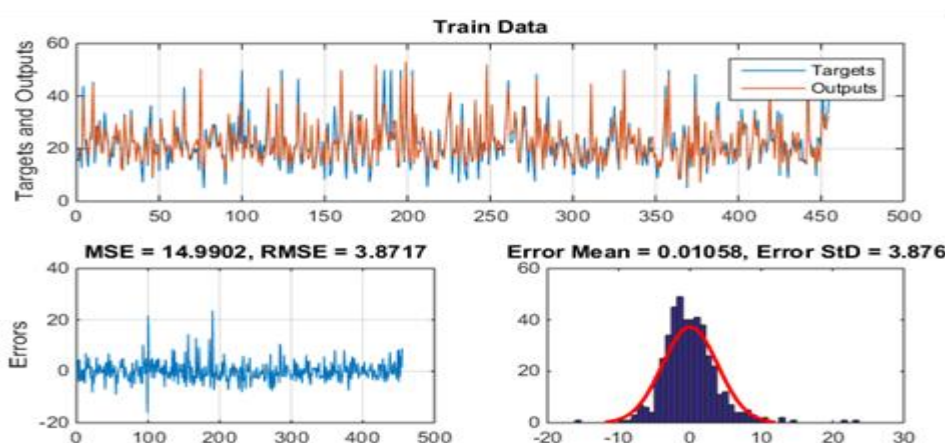
مهم ترین فاکتورهای اقلیمی تاثیرگذار در مناطق خشک و نیمه خشک، بارندگی، درجه حرارت، تشعشع خورشید، رطوبت نسبی، مینیمم و ماکزیمم دما می باشند که به ترتیب بیشترین به کمترین تاثیر را در کاهش رویش و ضعف فیزیولوژیکی ایجاد شده برای منابع جنگلی را دارند. (Mirzaeizadeh *et al.*, 2023) این فاکتورهای اقلیمی از نزدیک ترین ایستگاه های هواشناسی به منطقه مورد مطالعه تهیه شد.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های ۲ تا ۵ و نتایج شاخص های آماری ارائه شده در جدول ۵ مشخص شد که مدل به کار گرفته شده در این تحقیق از عملکرد بسیار بالایی در پیش بینی متغیرهای اقلیمی و ارزیابی اثر آن بر رویش قطری گونه بنه داشته است. برای انتخاب مناسب ترین متغیرهای ورودی در شبکه عصبی GMDH بر اساس مشاهدات تجربی و مطالعه سایر محققان، از مهم ترین متغیرهای ورودی موثر برای پیش بینی تغییرات اقلیمی استفاده شد.



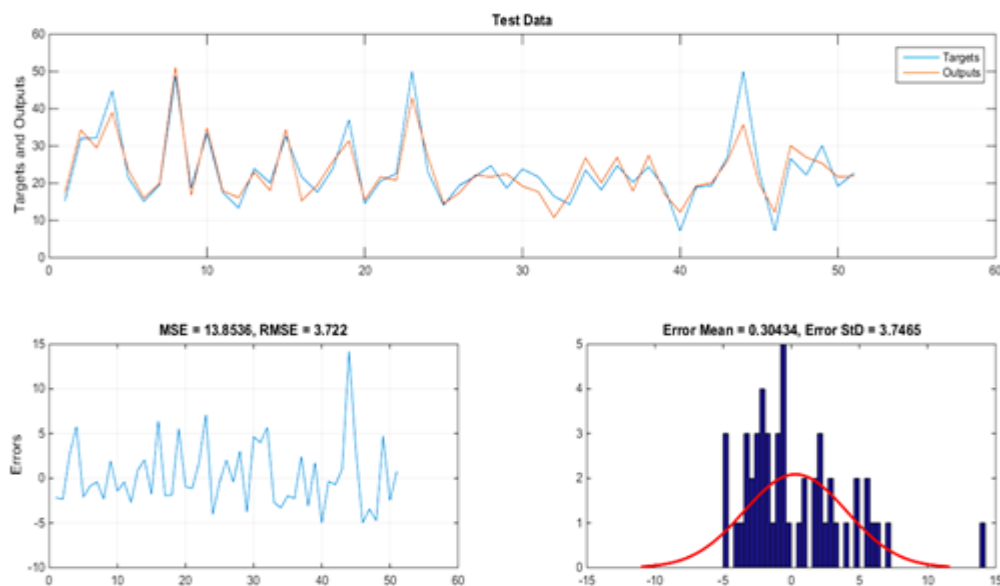
شکل ۳- نمودارهای پیش بینی در مرحله ی بررسی تمامی داده ها

Figure 3- Prediction charts in the stage of checking all the data



شکل ۴- نمودارهای پیش بینی در مرحله ی آموزش

Figure 4- Prediction charts in the training phase



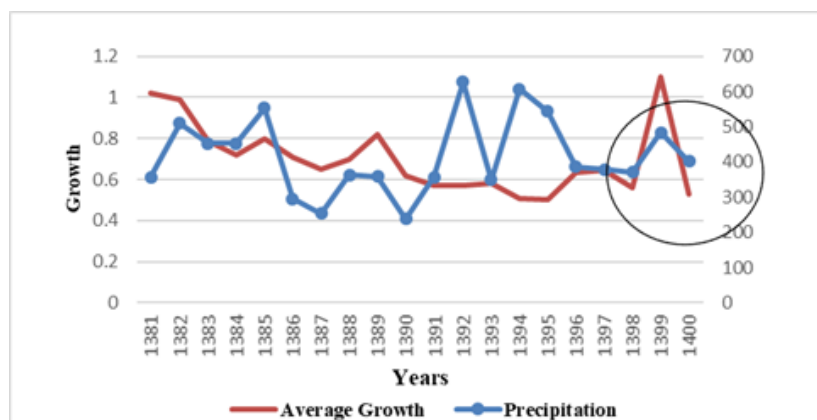
شکل ۵- نمودارهای پیش‌بینی در مرحله‌ی آزمون

Figure 5- Prediction charts in the test phase

میانگین که به دنبال آن کاهش رویش ایجاد شده است. میانگین مجموع بارش در دره شهر در سال ۱۳۹۲ دارای بیشترین میانگین بود. طبق داده‌های مدل بارندگی در سال ۱۳۹۹ افزایش خواهد داشت و با توجه به کاهش دمای پیش‌بینی‌شده در این سال پیش‌بینی رشد رویش افزایش می‌یابد که در سال‌های بعد پیش‌مدل یک روند نزولی را پیش‌بینی می‌کند.

مقایسه رویش کل با متغیرهای اقلیمی

یافته‌های شکل ۶ نشان می‌دهد که میانگین رویش کل در سال ۱۳۹۴ دارای کمترین میانگین رویش می‌باشد در این سال میانگین دمای سالانه افزایش داشته است و میانگین رویش کل در سال ۱۳۸۱ نیز دارای بیشترین میانگین رویش بوده است. میانگین مجموع بارش در دره شهر در سال ۱۳۸۷ دارای کمترین



شکل ۶- مقایسه رویش کل و بارندگی سالانه در منطقه مورد مطالعه

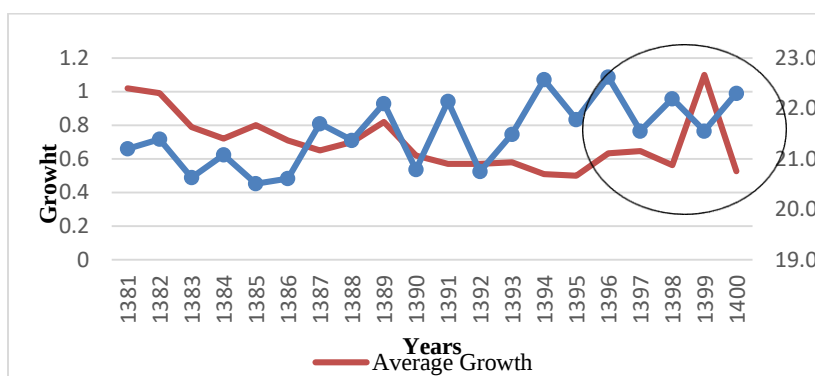
Figure 6- Comparison of total growth and annual rainfall in study area

میانگین رویش کل در سال‌های ۸۵ و ۸۹ دارای بیشترین میانگین بود. میانگین دما در سال ۸۵ دارای کمترین میانگین و میانگین دما در سال ۹۴

یافته‌های شکل ۷ نشان می‌دهد که میانگین رویش کل در سال‌های ۹۱ و ۹۵ دارای کمترین میانگین و

کرده است و در سال های بعد با افزایش میزان بارش و در نتیجه آن افزایش رطوبت به خصوص در سال ۱۳۹۹ سیر صعودی داشت.

دارای بیشترین میانگین بود. مدل برای سال ۱۳۹۶ افزایش میزان دما و در نتیجه کاهش رویش را پیش بینی



شکل ۷- مقایسه رویش کل و میانگین دمای سالانه

Figure 7- Comparison of total growth and average annual temperature

ابتدای فصل رشد، زمینه را برای آغاز فعالیت کامبیوم و فرآیندهای فتوسنتزی فراهم می کند (Cherubini et al., 2003; Sheng et al., 2007). این وابستگی در مناطق خشکی مانند زاگرس بسیار حیاتی است (صفدری و همکاران، ۱۳۸۴؛ رادمهر و همکاران، ۱۳۹۶). در مقابل، افزایش دما با تشدید تبخیر و تعرق، تنش آبی را در درختان افزایش داده و از طریق بسته شدن روزنه ها و کاهش جذب کربن، رشد را محدود می سازد (Van der Werf et al., 2012; Stanooosh et al., 2009). این پاسخ منفی به دمای بالا، یک الگوی منطقه ای مشترک است و در مطالعات دیگر روی گونه های زاگرس مانند بلوط و سرو نیز مشاهده شده است (Arsalani et al., 2022). البته، در برخی رویشگاه های خاص (مانند ارتفاعات بالا) یا برای گونه های دیگر، رابطه مثبت رشد با دما نیز گزارش شده است (Alipoorfard et al., 2023) که نشان دهنده اهمیت شرایط اکولوژیک ویژه هر رویشگاه است.

همان طور که در این مطالعه مشاهده شد، رطوبت نسبی نیز تأثیر مثبت و معناداری بر رشد بنه داشت. این متغیر با کاهش فشاربخار می تواند از میزان تعرق

بحث و نتیجه گیری

تغییر اقلیم به عنوان یکی از مهم ترین چالش های قرن حاضر (Ray, 2008)، از طریق نوسانات متغیرهای کلیدی مانند دما و بارش، تأثیرات عمیقی بر ساختار و عملکرد اکوسیستم های جنگلی دارد. (Itter et al., 2016) مطالعه حاضر به بررسی اثر کمی این نوسانات بر رشد قطری گونه بنه (*Pistacia atlantica*) در جنگل های نیمه خشک زاگرس و مدل سازی این رابطه با استفاده از شبکه عصبی پیشرفته GMDH پرداخت. یافته ها نشان داد که رشد شعایی بنه به طور معناداری تحت تأثیر عوامل اقلیمی قرار دارد، به طوری که بارندگی و رطوبت نسبی اثر مثبت و دما (میانگین و حداکثر) اثر منفی بر آن دارند (جدول ۴). این الگوی کلی با درک کنونی از فیزیولوژی رشد درختان در مناطق محدود شده توسط آب و نتایج بسیاری از مطالعات دندروکرونولوژی در رویشگاه های مشابه همخوانی دارد (Cedro et al., 2002; Pourtahmasbi et al., 2008; Banj Shafiei et al., 2011; Radmehr et al., 2015; Ghodskhah Daryaei et al., 2021).

بارندگی به عنوان اصلی ترین عامل تسهیل کننده رشد، با تأمین رطوبت خاک به ویژه در فصول سرد و

بررسی کارایی مدل GMDH در مقایسه با روش‌های کلاسیک: نوآوری روش‌شناختی این تحقیق، به‌کارگیری مدل شبکه‌عصبی ساختار گروهی داده‌ها (GMDH) برای مدل‌سازی رابطه اقلیم-رشد بود. عملکرد برجسته این مدل با شاخص‌های ارزیابی $(R=0.9, RMSE=3.86)$ نه‌تنها قابلیت پیش‌بینی قوی آن را تأیید می‌کند، بلکه برتری ذاتی رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین را در پردازش روابط غیرخطی و پیچیده موجود در داده‌های زیست‌محیطی نشان می‌دهد (Maxwell et al., 2018). این نتیجه، یافته‌های تحقیقاتی را که مدل‌های هوش مصنوعی را برای پیش‌بینی رشد موفق‌تر از روش‌های رگرسیونی خطی دانسته‌اند، تأیید و تقویت می‌کند (Samarasinghe, 2006; Salehnia & Ahn, 2022). نکته حائز اهمیت این است که مدل GMDH می‌تواند با مکانیسم خودسازمان‌دهی از مشکل بیش‌برازش که از چالش‌های رایج در مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی است، جلوگیری کند (Zhang et al., 2000). مقایسه نتایج مدل GMDH با تحلیل همبستگی پیرسون اولیه در این پژوهش (جدول ۴) به‌وضوح نشان می‌دهد که رویکرد غیرخطی توانسته است با در نظر گرفتن تعامل پیچیده متغیرها، مدلی با خطای کمتر و قدرت تعمیم بالاتر تولید نماید.

محدودیت‌ها و پیشنهادات: این مطالعه با محدودیت‌هایی همراه بود که مسیر را برای تحقیقات آینده روشن می‌سازد. نخست، دوره زمانی نسبتاً کوتاه داده‌ها (۱۵ سال) برای بررسی روندهای بلندمدت تغییر اقلیم کافی نیست. توسعه گاه‌شناسی‌های طولانی‌مدت‌تر برای بنه می‌تواند بینش ارزشمندی فراهم کند (Naghypour Borj et al., 2019). دوم، این مدل بر متغیرهای اقلیمی کلان متمرکز بود. ادغام داده‌های محلی مؤثر مانند رطوبت واقعی خاک، شاخص‌های رقابت درون‌توده‌ای، و اثرات فیزیولوژیکی انباشته (Itter et al., 2016) می‌تواند دقت مدل را افزایش دهد. سوم، به‌کارگیری معماری‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق که در مدل‌سازی مسائل پیچیده منابع طبیعی موفق عمل کرده‌اند (Qin

کاسته و کارایی مصرف آب را در درختان بهبود بخشد، که برای گونه‌های مناطق خشک مزیت محسوب می‌شود (Lebourgeois, 2004). این یافته با نتایج برخی مطالعات داخلی همخوانی دارد (Habibi Bibalani et al., 2008).

یافته‌های این پژوهش نشان داد که رشد شعایی درخت بنه (*Pistacia atlantica*) در جنگل‌های نیمه‌خشک زاگرس به‌طور معناداری تحت تأثیر نوسانات اقلیمی قرار دارد. این نتایج با مطالعات پیشین در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بارندگی را عامل اصلی محدودکننده رشد می‌دانند، همسو است (Cherubini et al., 2003; Pourtahmasbi et al., 2008). مطابق با انتظار در چنین رویشگاه‌هایی، بارندگی سالانه بیشترین همبستگی مثبت را با پهنای دواپر رویشی نشان داد (جدول ۴). این موضوع تأیید می‌کند که حتی مقادیر کم بارش، به ویژه در فصول سرد و ابتدای بهار، برای تأمین رطوبت مورد نیاز شروع فعالیت کامبیوم و فرآیندهای فتوسنتزی در گونه‌های مقاوم به خشکی مانند بنه حیاتی است (Radmehr et al., 2015). از سوی دیگر، افزایش دما، به ویژه میانگین و بیشینه دمای سالانه، اثر بازدارنده قوی بر رشد داشت. این رابطه منفی می‌تواند ناشی از افزایش تبخیر و تعرق و تشدید تنش آبی در فصل رشد باشد که منجر به بسته شدن روزنه‌ها، کاهش جذب کربن و در نهایت محدودیت رشد می‌گردد (Sheng et al., 2007; Van der Werf et al., 2012). این الگوی پاسخ منفی به دمای بالا به‌طور مشابه در مطالعات دندروکرونولوژی روی دیگر گونه‌های جنگلی زاگرس، از جمله بلوط ایرانی و سرو کوهی نیز گزارش شده است (Arsalani et al., 2022). که نشان می‌دهد این یک پاسخ اکولوژیک منطقه‌ای مشترک به تغییر اقلیم است. لازم به ذکر است که در برخی رویشگاه‌های خاص، مانند ارتفاعات بالا یا برای گونه‌هایی با اکولوژی متفاوت، رابطه رشد با دما می‌تواند مثبت باشد برای مثال (Alipoorfar et al., 2023). که بر اهمیت در نظر گرفتن شرایط ویژه هر رویشگاه تأکید دارد.

رشد آینده این گونه بارزش است. مهم ترین دستاورد روش شناختی این تحقیق، اثبات کارایی و دقت بالای مدل شبکه عصبی GMDH در مدل سازی و پیش بینی رابطه رشد-اقلیم بود. این مدل با توانایی درک روابط غیرخطی و تعاملات پیچیده، ابزاری قدرتمندتر نسبت به روش های خطی مرسوم برای ارزیابی آسیب پذیری اکوسیستم های جنگلی در برابر نوسانات اقلیمی فراهم می کند. در مجموع، تلفیق دانش بوم شناسی سنتی با روش های پیشرفته مدل سازی هوش مصنوعی، همان طور که در این پژوهش نشان داده شد، راهکاری امیدبخش برای درک بهتر پیچیدگی های پاسخ جنگل ها به تغییر اقلیم و تدوین راهبردهای مدیریتی تطبیقی، پیش گیرانه و پایدار در جنگل های زاگرس است.

می تواند گام بعدی برای بهبود مدل سازی باشد. در نهایت، بررسی پاسخ های فیزیولوژیکی دقیق تر (مانند تبادلات گازی) به نوسانات اقلیمی می تواند مکمل ارزشمندی برای یافته های دندروکرونولوژیک باشد.

نتیجه گیری کلی

این پژوهش به طور کمی تأیید کرد که در جنگل های نیمه خشک زاگرس، بارندگی و رطوبت نسبی به عنوان عوامل تسهیل گر، و دما (به ویژه در فصل گرم) به عنوان یک عامل محدود کننده قوی، رشد قطری درخت بنه را کنترل می کنند. در بستر تغییر اقلیم و پیش بینی افزایش دما و تغییر الگوی بارش در منطقه، این یافته ها حاکی از افزایش تنش آبی و احتمال کاهش

منابع

- Alipoorfard, M., Pourtahmasi, K., Raeini Sarjaz, M. & Nadi, M. 2023. Reconstruction of Jan-Mar mean temperature using tree ring widths of Juniper trees in the east of Lorestan province. *Iranian Journal of Forest*, 15(1): 53-67. [In Persian]
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A. & Cobb, N. 2010. A global overview of drought and heat-induced forest mortality reveals emerging climate change risks. *Forest Ecology and Management*, 259: 660-684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Arsalani, M., Griebinger, J. & Bräuning, A. 2022. Tree ring based seasonal temperature reconstructions and ecological implications of recent warming on oak forest health in the Zagros Mountains, Iran. *International Journal of Biometeorology*, 66: 2553-2565. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02380-5>
- Banj Shafiei, A., Eshaghi Rad, J., Alijanpour, A. & Pato, M. 2011. The effect of the Oak bud tortricide (*Tortrix viridana*) on the width of the annual growth rings of oak (*Quercus libani* Oliv.) in the forests of Piranshahr and Sardasht. *Journal of Plant Protection*, 25(2): 178-185. [In Persian]
- Bonan, G.B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320: 1444-1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Cherubini, P., Gartner, B.L., Tognetti, R., Bräker, O.U., Schoch, W. & Innes, J.L. 2003. Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from Mediterranean climates. *Biological Reviews*, 78(1): 119-148. <https://doi.org/10.1017/S1464793102006000>

- Das, A.J. & Stephenson, N.L. 2015. Improving estimates of tree mortality probability using potential growth rate. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(8): 920-928. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0368>
- Cherubini, P., Gartner, B.L., Tognetti, R., Bräker, O.U., Schoch, W. & Innes, J.L. 2003. Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from Mediterranean climates. *Biological Reviews*, 78(1): 119-148. <https://doi.org/10.1017/S1464793102006000>
- Flower, A. & Smith, D.J. 2011. A dendroclimatic reconstruction of June-July mean temperature in the northern Canadian Rocky Mountains. *Dendrochronologia*, 29(2): 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.08.001>
- Fritts, H.C. 1976. Tree rings and Climate. Academic Press, London. 567 p.
- Ghodskhah Daryaei, M., Ahooghalandari, N. & Torkaman, J. 2021. Investigation the effect of climatic factors of temperature and precipitation on growth patterns of the cypress (*Cupressus sempervirens* Var. *Horizontalis* (Mill.) Gord) trees in Noshahr and Rudbar habitats [In Persian]. *Journal of Plant Research*, 34(3): 669-681.
- Habibi Bibalani, Gh., Bazhrang, Z., Pour-Rabi, S., Joodi, L. & Shibaie, N. 2008. Study for some climatic characters on annual ring growth for *Melia azedarach* at Ramsar [In Persian]. Proceedings of the First International Conference on Climate Change and Chronology Tree, Surrey, UK, 25-26 May, 45-52.
- Hamidi, S.K., Fallah, A., Bayat, M. & de Luis, M. 2021. The effects of climate variables (temperature and precipitation) on growth characteristics of trees (case study: Farim forest). *Journal of Forest Research and Development*, 6(4): 593-607. [In Persian]
- Itter, M.S., Finley, A.O., D'Amato, A.W., Foster, J.R. & Bradford, J.B. 2016. Variable Effects of Climate on Forest Growth in Relation to Ecosystem State. *Ecological Applications*, 27(4): 1082-1095. <https://doi.org/10.1002/eap.1518>
- Lebourgeois, F. 2004. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Annals of Forest Science*, 61(2): 155-164. <https://doi.org/10.1051/forest:2000166>
- Maaten, E.V.D. 2012. Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. *Trees*, 26(3): 777-788. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0645-8>
- Maxwell, A.E., Warner, T.A. & Fang, F. 2018. Implementation of machine learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 39(9): 2784-2817. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>
- Mirzaeizadeh, V., Mahdavi, A., Naji, H. & Ahmadi, H. 2023. Modeling the Distribution of Species *Pistacia atlantica* in Ilam Province using MaxEnt Methods [In Persian]. *Ecology of Iranian Forests*, 10(20): 129-139. <https://doi.org/10.52547/ifej.10.20.129>
- Naghipour Borj, A.A., Heidarian Aghajani, M. & Sangoni, H. 2019. Predicting the impact of climate change on the distribution of *Pistacia atlantica* in the Central Zagros. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 6(3): 197-214. [In Persian]
- Najafi Harsini, F., Pourtahmasbi, K. & Karimi, A.N. 2012. Dendrochronological Investigation of Radial Growth of *Quercus infectoria* in Kermanshah Oak Forests. *Journal of Forest and Wood Products (JFWP)*, *Iranian Journal of Natural Resources*, 65(1): 119-129. [In Persian]
- Nasseri Karimvand, S., Poursartip, L., Moradi, M. & Sosani, J. 2016. Dynamic Effects of climate variables (temperature and precipitation) on the annual diameter growth of Iranian oak

- (*Quercus brantii* Lindl) [In Persian]. *Forest Research and Development*, 2(1): 63-71. [In Persian]
- Poursartip, L. 2012. Comparison of anatomical characteristics and chronology Avery trees (*Quercus macranthera*) and Oak (*Quercus castanifolia*) (Case study: North Caspian forests). PhD Thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 80p. [In Persian]
- Pourtahmasbi, K., Parsapajouh, D., Marvi Mohajer, M. & Ali-Ahmed-Korouri, S. 2008. Evaluation of Juniper trees (*Juniperus polycarpus* C. Koch) radial growth in three sites of Iran by using dendrochronology. *Journal of Forest and Poplar Research*, 16(2): 327-342. [In Persian]
- Qin, Y., Wu, B., Lei, X. & Feng, L. 2023. Prediction of tree crown width in natural mixed forests using deep learning algorithm. *Forest Ecosystems*, 10: 100109. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100109>
- Radmehr, A., Sosani, J., Balapour, Sh., Hosseini Ghale Bahmani, S.M. & Sepahvand, A. 2014. Effects of climate variables (temperature and precipitation) on the width of Rings-growth in Persian coppice oak in the central Zagros (Case study: Khoramabad). *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 22(1): 93-110. [In Persian]
- Ray, D. 2008. Impacts of climate change on forestry in Scotland - a synopsis of spatial modelling research. Forestry Commission Research Note 101, *Forestry Commission Scotland, Edinburgh*.
- Salehnia, N. & Ahn, J. 2022. Modelling and reconstructing tree ring growth index with climate variables through artificial intelligence and statistical methods. *Ecological Indicators*, 134: 108496. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108496>
- Savva, Y., Schweingruber, F.H., Vaganov, E.A. & Milyutin, L.I. 2003. Influence of climate change on tree-ring characteristics of Scots pine provenances in Southern Siberia (Forest-Steppe). *IAWA Journal*, 24(4): 371-383. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000342>
- Sheng, D., Yamanaka, N., Yamamoto, F., Otsuki, K., Wang, S. & Hou, Q. 2007. The effect of *Quercus liaotungensis* forest trees on soil properties in the Loess Plateau, China. *Dendrochronologia*, 25(1): 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2007.01.002>
- Stanoosh, K., Bhattacharyya, A. & Chaudhary, V. 2009. Climatic influence on radial growth of *Pinus wallichiana* in Ziro Valley, Northeast Himalaya. *Current Science*, 96(5): 697-702.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., de Squeira, M.F., Grainiger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A.S., Midgley, G.F., Miles, L., Ortega-Huerta, M.A., Peterson, A.T., Phillips, O.L. & Williams, S.E. 2004. *Extinction risk from climate change*. *Nature*, 427: 145-148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>
- Trigo, R.M., García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, I.F. & Valente, M.A. 2005. How exceptional was the early August 2003 heatwave in France? *Geophysical Research Letters*, 32(10): L10701. <https://doi.org/10.1029/2005GL022410>
- Van der Werf, G.W., Sass-Klaassen, U.G.W. & Mohren, G.M.J. 2007. The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. *Dendrochronologia*, 25: 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2007.03.004>
- Zahedipour, H., Fatahi, M., Mirdavoudi Akhavan, H.R. & Azdoo, Z. 2004. Investigation, the distribution, ecology and phenology of wild pistachio in the Markazi province (case study:

Koh-e-Nazarkardeh, Saveh city). *Research and Construction* (Pajohesh and Sazandegi), 17(3): 97-103. [In Persian]

Zhang, Q., Hebda, R., Zhang, Q.J. & Alfaro, R.I. 2000. Modeling tree-ring growth responses to climatic variables using artificial neural networks. *Forest Science*, 46(2): 229-239. <https://doi.org/10.1093/forestscience/46.2.229>