

Research Paper

Prediction of Soil Carbon Sequestration in Rangelands Regarding the Depth and Elevation of Sample Locations using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) (Case Study: Lar Watershed)

Zeinab Jafarian¹ and Zhila Ghorbani²

1- Professor of rangeland engineering and science, Faculty of natural resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, (Corresponding author: z.jafarian@sanru.ac.ir)

2- Ph. D student of rangeland engineering and science, Faculty of natural resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 21 December, 2023

Accepted: 16 May, 2024

Extended Abstract

Background: Soil organic carbon is one of the important parameters to determine soil fertility, and production ability and a mind index for showing soil quality of dry and semi-dry lands. On the other hand, rangelands are one of the main dry ecosystems of carbon reservoirs. Knowing about carbon reservoir distribution and changes for detecting the controller mechanisms of the carbon world cycle and carbon stability is vital for managing ranges. Since field operations include soil sampling from different places and depths to measure the amount of soil carbon sequestration, it is very time-consuming and costly. On the other hand, different soil characteristics may be measured and available in many rangeland areas for other purposes using modeling and prediction under various inputs, including soil properties such as texture, acidity, electrical conductivity, etc. Researchers in the rangeland field can estimate and evaluate soil carbon. Novel prediction methods, including artificial intelligence, are of high interest in this field. The present research aims to study the ability of the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to predict the carbon sequestration (CS) of rangeland soil.

Methods: The studied area in this research includes the rangelands of the southwestern slopes of Mount Damavand in the Lar watershed with an area of about 2000 hectares and an altitude between 2500 and 3460. With a statistical climate period of 36 years, it is a semi-humid to ultra-cold region where the average rainfall is 550 mm. Dominant plant species in the region are *Onobrychis cornuta*, *Astragalus ochrodeucus*, *Astragalus microcephalus*, *Thymus pubescens*, etc. Considering the Lar watershed region geographic conditions, four height groups relative to sea level, including height group 1 (2500-2700 m), group 2 (2700-2900 m), group 3 (2900-3100 m), and group 4 (3100-up m) were selected for sampling soil at different depths in this research. Thirteen random points were determined at all height groups, and three samples from each point were dug at depths 0-15 cm and 15-30 cm. In total, 312 soil samples were collected in the entire region and transferred to a soil science laboratory, where soil characteristics (texture, organic carbon, and bulk gravity) were measured as an average of three repetitions. These characteristics were used to calculate the amount of soil carbon deposition. After soil sampling and measuring the amount of carbon sequestration under the effect of soil depth and height in the sampling location at the Mount Damavand rangelands at the Lar watershed region, the regression and ANFIS prediction equations were developed and their accuracy was compared together for CS prediction plus introducing the more accurate approach. The root mean square error (RMSE) and correlation coefficient (R^2) were applied to evaluate the regression and ANFIS models. The regression analysis was performed using the SPSS20 software. Excel software was used to draw descriptive charts. ANFIS modeling was created in MATLAB software and is based on the input/output dataset of a fuzzy inference system (FIS). This system is based on the combination of three components: membership functions of input and output variables (fuzzification), fuzzy rules (rule base), mechanism inference (a combination of rules with fuzzy input), output characteristics, and results of the system (de-fuzzification).

Results: The results of the analysis of variance (ANOVA) revealed that only soil sampling depth significantly affected the soil CS, but the effect of sampling location and the interaction effect of depth and height were not significant. More amount of CS was obtained at a depth of 15-30 cm than at a depth of 0-15 cm, and the utmost amount of CS was measured in gang 4 of height (3119-3545 m) at both depths. The highest amount of CS (604656) belonged to gang 4 of height and a depth of 15-30 cm. In fact, the amount of soil CS increased at higher and lower altitudes while its amount decreased at medium altitudes. After gang 4 of height, the second

most CS was recorded for the gang 1 of height. In the modeling part, the ANFIS model with higher accuracy ($R^2 = 0.4736$) and lower error (RMSE = 0.0274) predicted the soil CS related to a regression model with lower accuracy ($R^2 = 0.4308$) and higher error (RMSE = 0.069). This result indicates the higher ability of the ANFIS model than the regression model in creating a relationship between input and output and its proximity to the measured values.

Conclusion: The increase in the correlation coefficient and the reduction of the mean error deviation in the ANFIS method compared to the linear multivariate regression show that the ANFIS method is more successful in estimating the amount of soil CS under the effects of various factors in the studied land use. The better performance of the ANFIS model than statistical regression methods can be found in its estimation and prediction capability for the nonlinear estimation with a small amount of data. This is despite the fact that the performance and accuracy of regression methods strongly depend on the sample size, and a small sample size can be a limiting factor in such statistical models. The adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) satisfied operation in predicting rangeland soil CS under the different sampling depths and heights. Furthermore, it will be used as an intelligent tool for predicting different parameters in studied ranges and rangeland science, such as above and underground biomass volume, distribution of rangeland plant species, and so on.

Keywords: Artificial Intelligence, Modelling, Organic Carbon, Regression, Soil properties

How to Cite This Article: Jafarian, Z., & Ghorbani, Zh. (2024). Prediction of Soil Carbon Sequestration in Rangelands Regarding the Depth and Elevation of Sample Locations using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) (Case Study: Lar Watershed). *J Watershed Manage Res*, 15(2), 142-153. DOI: [10.61186/jwmr.15.2.142](https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.142)



مقاله پژوهشی

پیش‌بینی میزان کربن ترسیب شده در خاک مراتع در رابطه با عمق و ارتفاع محل نمونه‌ها
با استفاده از سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS)
(مطالعه موردی: حوزه آبخیز لار)زینب جعفریان^۱ و ژیلا قربانی^۲۱- استاد، گروه علوم و مهندسی مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، (نویسنده مسؤل: z.jafarian@sanru.ac.ir)
۲- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۳۰

صفحه: ۱۴۴ تا ۱۵۳

چکیده مبسوط

مقدمه: کربن آلی خاک یکی از پارامترهای مهم تعیین کننده میزان حاصل خیزی خاک، قابلیت تولید و شاخص مهمی در نشان دادن کیفیت خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است. از طرفی، مراتع یکی از مهم‌ترین بوم‌سازگان خشکی هستند که جهت ذخیره کربن به‌شمار می‌روند. آگاهی و دانش در مورد توزیع منابع کربن و تغییرات آن برای تشخیص سازوکارهای کنترلی چرخه جهانی کربن و پایداری میزان کربن فعلی در مدیریت این اراضی ارزشمند است. از آنجایی که عملیات عرصه‌ای شامل نمونه‌برداری خاک از مکان‌ها و عمق‌های مختلف به‌منظور اندازه‌گیری میزان ترسیب کربن در خاک بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است و از طرفی در بسیاری از مناطق مرتعی ویژگی‌های مختلف خاک ممکن است برای مقاصد دیگری اندازه‌گیری شده و در دسترس باشند، با کمک مدل‌سازی و پیش‌بینی آن تحت ورودی‌های مختلف من جمله خصوصیات خاک مانند بافت، اسیدیته، هدایت الکتریکی و ... محققین و پژوهشگران عرصه مرتع می‌توانند ترسیب کربن خاک را نیز برآورد و ارزیابی کنند. روش‌های جدید پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی بسیار گسترش یافته‌اند. هدف از تحقیق حاضر بررسی قابلیت پیش‌بینی میزان ترسیب کربن خاک مراتع با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) است.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل مراتع دامنه‌های جنوب غربی کوه دماوند در حوزه آبخیز لار به مساحت حدود ۲۰۰۰ هکتار بوده و ارتفاعی بین ۲۵۰۰ تا ۳۴۶۰ را تحت پوشش خود دارد. اقلیم آن با دوره آماری ۳۶ ساله اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب تا فرا سرد و متوسط بارندگی ۵۵۰ میلی‌متر است. گونه‌های گیاهی غالب در منطقه عبارتند از اسپرس کوهی (*Onobrychis cornuta*)، گون وحشی (*Astragalus ochroleucus*)، گون بوته‌ای (*Astragalus microcephalus*)، آویشن (*Thymus pubescens*)، بود. در این تحقیق با توجه به وضعیت جغرافیایی حوزه آبخیز لار، ۴ طبقه ارتفاعی از سطح دریا شامل طبقه ارتفاعی ۱ (۲۷۰۰-۲۵۰۰ متر)، طبقه ۲ (۲۹۰۰-۲۷۰۰ متر)، طبقه ۳ (۳۱۰۰-۲۹۰۰ متر) و طبقه ۴ (بیش از ۳۱۰۰ متر) معین گردید. در هر طبقه ارتفاعی، ۱۳ نقطه تصادفی مشخص و از هر نقطه، ۳ نمونه خاک (در نقش تکرار) از اعماق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متر تهیه گردید. مجموعاً ۳۱۲ نمونه خاک در کل منطقه تهیه و به آزمایشگاه خاک‌شناسی منتقل شد. در آزمایشگاه، ویژگی‌های بافت، کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری به‌صورت میانگین ۳ تکرار اندازه‌گیری شد. به‌واسطه این ویژگی‌ها، میزان ترسیب کربن خاک محاسبه شد. پس از نمونه‌برداری و اندازه‌گیری میزان ترسیب کربن تحت تأثیر عمق خاک و ارتفاع محل نمونه‌برداری در قسمتی از مراتع کوه دماوند واقع در حوزه آبخیز لار، اقدام به ایجاد معادلات رگرسیونی و مدل ANFIS شده و دقت آن‌ها در پیش‌بینی ترسیب کربن با یکدیگر مقایسه گشته و روش دقیق‌تر مشخص شد. برای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی و ANFIS از مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد. معادله رگرسیونی در بسته نرم‌افزاری SPSS20 انجام شدند. برای رسم نمودارهای توصیفی از نرم‌افزار Excel استفاده گردید. لازم به ذکر است که مدل‌سازی بر اساس ANFIS در نرم‌افزار متلب (MATLAB) ایجاد شد و بر پایه‌ای از مجموعه داده‌های ورودی/خروجی یک سیستم استنتاج فازی (FIS) است. این سیستم بر پایه قوانین ترکیبی از سه جزء توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی (فازی کردن)، قوانین فازی (پایگاه قواعد)، استنتاج مکانیزم (ترکیب قواعد با ورودی فازی) و مشخصه‌های خروجی و نتایج سیستم (غیرفازی سازی) است.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تنها عمق نمونه‌برداری، اثر معنی‌داری بر میزان ترسیب کربن خاک داشته اما اثر ارتفاع محل نمونه‌برداری و اثر متقابل عمق و ارتفاع بی‌معنی بود. در حالت کلی، میزان ترسیب کربن در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری بیش‌تر از ۱۵-۰ سانتی‌متر بوده و در هر دو عمق، طبقه ارتفاعی ۴ (۳۱۹۰-۳۵۲۵ متر) بیش‌ترین میزان ترسیب کربن خاک را داشت. بیش‌ترین میزان ترسیب کربن به‌میزان ۶۰۴۶۵۴ مربوط به طبقه ارتفاعی ۴ و عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متر بود. درواقع، در ارتفاع‌های بالاتر و پایین‌تر، میزان ترسیب کربن خاک افزایش یافته و در ارتفاع‌های متوسط، این میزان ترسیب کربن روبه کاهش گذاشته است. به‌علاوه پس از طبقه ارتفاعی ۴، بیش‌ترین میزان ترسیب کربن مربوط به طبقه ارتفاعی ۱ بود. در بخش مدل‌سازی، مدل ANFIS با دقت بالاتر ($R^2=0/4736$) و خطای کمتر ($RMSE=0/0274$) نسبت به مدل رگرسیونی با دقت کمتر ($R^2=0/4308$) و خطای بیش‌تر ($RMSE=0/069$)، میزان ترسیب کربن خاک را پیش‌بینی نمود. این نتیجه حاکی از توانایی بالاتر مدل انفیس نسبت به مدل رگرسیونی در ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی و نزدیکی آن نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است.

نتیجه‌گیری: با توجه به افزایش ضریب همبستگی و کاهش میانگین انحراف خطا در روش انفیس نسبت به رگرسیون چند متغیره خطی، به‌نظر می‌رسد روش انفیس در برآورد میزان ترسیب کربن خاک تحت تأثیر عوامل مختلف در کاربری مورد مطالعه، موفق‌تر عمل کرده است. عملکرد بهتر مدل انفیس در مقایسه با روش‌های آماری رگرسیونی را می‌توان در قابلیت تخمین و پیش‌بینی آن برای تقریب غیرخطی با حجم کم داده‌ها جستجو نمود. این در حالی است که عملکرد و دقت روش‌های رگرسیونی به‌شدت از حجم نمونه‌ها تبعیت می‌کند و حجم کم نمونه‌ها می‌تواند عامل محدودیت در چنین مدل‌های آماری گردد. سامانه‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی، نه‌تنها در پیش‌بینی میزان ترسیب کربن خاک مراتع تحت شرایط عمق و ارتفاع نمونه‌برداری متفاوت عملکرد بهتری دارد، بلکه می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری هوشمند در جهت پیش‌بینی پارامترهای مختلف در مراتع تحت بررسی مثلاً در پیش‌بینی حجم زیست‌توده زیرزمینی و روزمینی، نحوه پراکنش گونه‌های مرتعی و ... استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات خاک، رگرسیون، کربن آلی، مدل‌سازی، هوش مصنوعی

مقدمه

قابل توجهی در فرآیند چرخه جهانی کربن اتمسفر دارد (Abdi et al., 2008). از طرف دیگر، کربن آلی خاک یکی از پارامترهای مهم تعیین کننده میزان حاصل‌خیزی خاک،

خاک، منبع زمینی مهم و بالارزش در ذخیره کربن آلی است که با نگهداشت در حدود ۱۵۰۰ میلیارد تن کربن نقش

قابلیت تولید و شاخص مهمی در نشان دادن کیفیت خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است که در آن مقادیر ورودی کربن ناچیز است (Hooman et al.; Anderson et al., 1981). (al., 2007). مراتع، در حدود نیمی از خشکی‌های جهان را تشکیل می‌دهند و حاوی بیش از یک‌سوم ذخایر کربن زیست‌کره خاکی بوده و یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های خشکی هستند که جهت ذخیره کربن به‌شمار می‌روند (Azarnivand et al., 2011). اگرچه مقدار ذخیره کربن آن‌ها در واحد سطح ناچیز است، اما با توجه به وسعت بالای آن‌ها، این اراضی دارای قابلیت زیادی جهت ترسیب کربن هستند. محققین گزارش نموده‌اند که در مقیاس جهانی، مراتع سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد تن کربن ترسیب می‌کنند و مراتع ایران با وسعت ۹۰ میلیون هکتار با مدیریت صحیح قادرند معادل یک میلیارد تن کربن ترسیب نمایند (Farzi et al., 2019). مساحت مراتع مازندران ۵۸۴۷۱۲ هکتار برآورد شده است که از نظر جغرافیایی به سه منطقه مراتع بیلاقی، مراتع قشلاقی و مراتع میان‌بند تقسیم می‌شود. مراتع استان مازندران در قیاس با مراتع کشور تقریباً می‌توانند ۶/۵ میلیون تن کربن ترسیب نمایند (Jafarian et al., 2013). سه مؤلفه مهم کنترل‌کننده میزان کربن آلی خاک شامل اقلیم (دما و میزان رطوبت)، عوامل بیولوژیکی (ترکیب گیاهی و اضافه شدن بقایای گیاهی) و ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک نظیر ساختار، بافت، میزان رس، کانی‌شناسی و اسیدیته هستند (Bayat et al., 2018). آگاهی و دانش در مورد توزیع منابع کربن و تغییرات آن برای تشخیص مکانیزم‌های کنترلی چرخه جهانی کربن و پایداری میزان کربن فعلی در مدیریت این اراضی ارزشمند است. علاوه بر این، داشتن چنین دانش و اطلاعاتی برای برنامه‌ریزی سیاست‌های مختلف تغییر اقلیمی نیز بسیار مهم و سرنوشت‌ساز است. از طرفی، مطالعه رابطه متغیرهای اقلیمی، ویژگی‌های محیطی، توپوگرافی و مواد مادری با میزان ذخیره کربن آلی در مناطق مختلف می‌تواند برای پیش‌بینی میزان کربن آلی خاک مفید باشد. همچنین این امر می‌تواند در شبیه‌سازی نحوه اثرگذاری تغییرات محیطی بر میزان کربن خاک، کمک کننده باشد. در زمینه نقش خصوصیات خاک در تعیین و کنترل توان ذخیره و حفاظت کربن آلی مطالعاتی صورت پذیرفته است. نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که تغییر در کربن آلی خاک‌ها با تغییرات ساختار خاک و یا ثبات آن در ارتباط است و اجزای ذخیره‌ای کربن ذره‌ای به‌دلیل حفاظت بلند و میان‌مدت کربن در خود توسط حفاظت فیزیکی و شیمیایی، بیش‌تر حائز اهمیت است.

مرور منابع نشان می‌دهد که اطلاعات زیادی در مورد نحوه ذخیره کربن در خاک و عوامل مؤثر و ارتباط بین آن‌ها وجود ندارد. مطالعات معدودی در این خصوص انجام شده است (Farzi et al.; Azarnivand et al., 2011; Abdi et al., 2008) Jafarian et al.; Iranmanesh & Sadeghi, 2019; al., 2019 Tamartash et al., Sarkar et al., 2020; al., 2013 (2012). یافته‌های بررسی ارتباط ویژگی‌های خاک با میزان کربن آلی خاک دو نوع خاک رسی و خاک شنی بیانگر آن

است که میزان کربن آلی ذخیره‌ای خاک با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نظیر وزن مخصوص ظاهری، میزان شن، سیلت، رس و اسیدیته در ارتباط است و تفاوت در نوع خاک می‌تواند تفاوت میزان و نحوه این ویژگی‌ها را توجیه کند (Brahim et al., 2011; Boroumand, et al., 2014). (Taleshian Jeloudar, et al., 2019). در مطالعاتی با استفاده از رگرسیون چند متغیره مشخص شد که میزان کربن خاک با افزایش رطوبت خاک و میزان رس بیش‌تر می‌شود که به اثر منفی زهکشی خاک بر میزان ذخیره کربن اشاره دارد (Liu et al., 2018; Wang et al., 2012).

در داخل کشور نیز مشخص شد که خاک با سهم ذخیره میزان ۸۷/۴۳ درصد از کل ذخیره کربن اکوسیستم، مهم‌ترین منبع ذخیره کربن در اکوسیستم است و بررسی روابط رگرسیونی گام‌به‌گام نشان داده است که ترسیب کربن با ارتفاع و حجم بوته‌های گون، مقدار لاشبرگ، رطوبت اشباع خاک و کربن آلی خاک رابطه مثبت قوی دارد (Abdi et al., 2008). در مطالعه‌ای به‌منظور تعیین عامل‌های بوم‌شناختی مؤثر بر ترسیب کربن از رگرسیون چندمتغیره استفاده نمودند (Azarnivand et al., 2011). نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار کربن ذخیره‌ای در این اکوسیستم‌ها بیش‌تر تحت تأثیر زی‌توده ریشه، رس و نیتروژن خاک، عامل ارتفاع از سطح دریا و میانگین بارش سالیانه قرار دارد. به‌علاوه دریافتند که خاک با دارا بودن ۸۷ درصد کربن در خود سهم بیش‌تری در ذخیره کربن را نسبت به سایر مؤلفه‌های اکوسیستم نظیر زیست‌توده دارا است. بررسی کربن ذخیره‌شده در سه گونه گیاهی و در خاک گونه‌های مرتعی مورد مطالعه نیز نشان داد که خاک گونه درمنه کوهی با داشتن ۲۹/۴۴۵ تن در هکتار، کربن بیش‌تری را نسبت به دو گونه دیگر (استپا و آگروپایرون) در خود ذخیره کرده است (Jafarian et al., 2012). هم‌چنین مشخص شد که میزان ترسیب کربن در اندام‌های مختلف گیاه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد داشته و در گندمیان، سنبله‌ها بیش‌ترین و ریشه‌ها کم‌ترین توان ترسیب کربن را داشتند. با توجه به نتایج تحقیقات آن‌ها و سطح زیر کشت گندم در کشور، این گیاه می‌تواند با ترسیب میزان بالای کربن، نقش مؤثری در کاهش گازهای گلخانه‌ای ایفا کند (Jafarian et al., 2013). در بررسی تأثیر جنگل‌کاری پهن‌برگ و سوزنی‌برگ بر میزان ذخیره کربن خاک در جنگل برنجستانک استان مازندران مشخص شد که رویشگاه و عمق اثر معناداری بر میزان کربن خاک داشتند. هم‌چنین، عمق اول بیش‌ترین میزان ذخیره را داشته و دو عمق دیگر خاک ذخیره کم‌تری داشتند و با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند (Jalilvand et al., 2015). نتایج در ایالات‌متحده نیز مؤید همین روند است (Sarkar et al., 2020). پیش‌بینی میزان گونه‌های قابل چرا با استفاده از ANFIS در مراتع جنوب شرقی سیلان در استان اردبیل انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که انفیس می‌تواند با دقت بالایی در پیش‌بینی پارامترهای مرتبط با چرا و مرتع‌داری به‌کار گرفته شود و دقت بالایی در پیش‌بینی دارد (Ghorbani et al., 2015). در مطالعه‌ای به ارزیابی عوامل

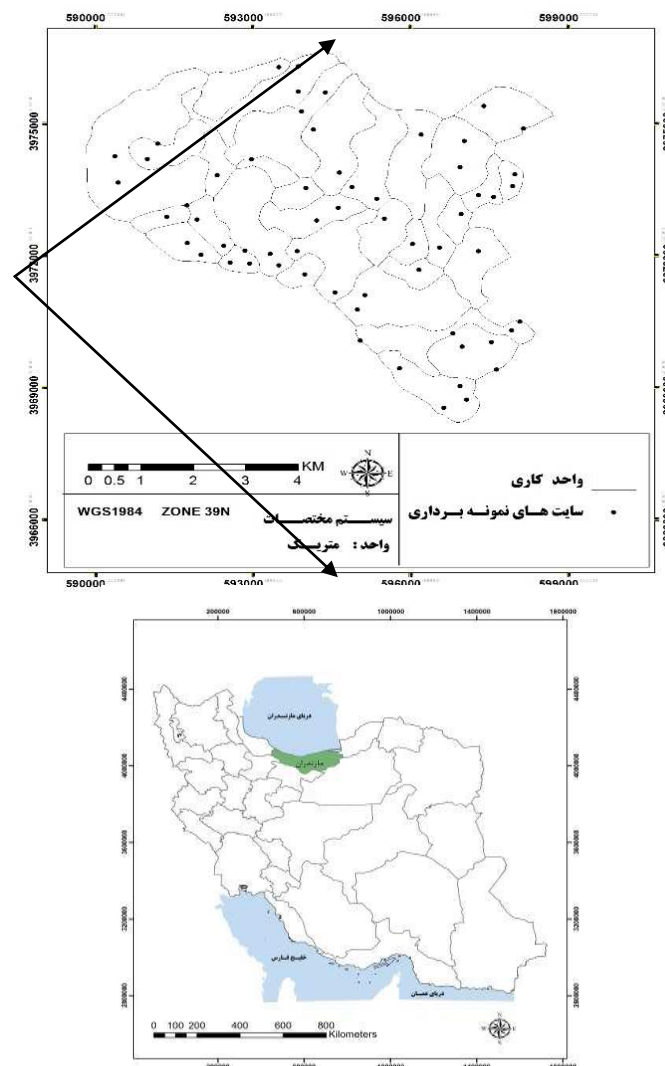
اسیدیته، هدایت الکتریکی و ... محققین و پژوهشگران عرصه مرتع می‌توانند ترسیب کربن خاک را نیز برآورد و ارزیابی کنند. روش‌های پیش‌بینی را در حالت کلی می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود: معادلات رگرسیونی، مدل‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی و مدل‌های کامپیوتری. امروزه سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) به‌عنوان یک ابزار جدید، تلفیقی از دو روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی (FIS) بوده و دارای مزایای هر دو روش است (Taghavifar & Mardani, 2014). تحقیقات بسیار کمی در خصوص بررسی توانایی انفیس به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای مختلف مرتبط با کشاورزی و منابع طبیعی انجام گردیده است (Taghavifar & Pandiyan et al., 2017; Mardani, 2014). به‌عنوان مثال، به ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، شبکه عصبی تطبیقی فازی (انفیس) و رگرسیون در پیش‌بینی کربن آلی ذره‌ای در مراتع خرابه‌سنجی ارومیه انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل انفیس، بالاترین ضریب همبستگی و کم‌ترین خطا را داشت و بهترین مدل می‌باشد (Bahrami et al., 2013). با توجه به تأیید قابلیت مدل انفیس برای مقاصد مختلف، هدف از تحقیق حاضر بررسی قابلیت پیش‌بینی میزان ترسیب کربن خاک مراتع با استفاده از سیستم استنتاجی فازی - عصبی (انفیس) است.

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل مراتع دامنه‌های جنوب غربی کوه دماوند در حوزه آبخیز لار می‌باشد. این حوزه آبخیز از شمال به کوه‌های منطقه نور مازندران، از غرب به کوه بارسنگ، از جنوب به لواسانات و از شرق به قله دماوند محدود می‌گردد. این منطقه با مختصات جغرافیایی $30^{\circ} 51'$ تا $30^{\circ} 55'$ شمالی و $52^{\circ} 2'$ تا $52^{\circ} 5'$ شرقی به مساحت حدود ۲۰۰۰ هکتار بوده و ارتفاعی بین ۲۵۰۰ تا ۳۴۶۰ را تحت پوشش خود دارد (شکل ۱). در دوره آماری ۳۶ ساله اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب تا فرا سرد و متوسط بارندگی ۵۵۰ میلی‌متر است (Bayat et al., 2018). گونه‌های گیاهی غالب در منطقه عبارتند از اسپرس کوهی (*Onobrychis cornuta*)، گون وحشی (*Astragalus ochrodeucus*)، گون بوته‌ای (*Astragalus microcephalus*)، آویشن (*Thymus pubescens*)، علف‌های دگرگشن (*Perennial grasses*)، کلهر (*Astragalus retamocarpus*) و باریجه (*Ferula gummosa*) (Jafarian et al., 2012).

خاکی مؤثر بر میزان ذخیره کربن آلی خاک پرداخته و مدلی برای تخمین توان ذخیره کربن با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مراتع استان آذربایجان شرقی ارائه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که رطوبت، درصد اشباع، اسیدیته، میزان سیلت، هدایت الکتریکی و میزان رس خاک دارای اثر مستقیم بر میزان کربن آلی ذخیره‌ای خاک داشته و وزن مخصوص ظاهری، سنگریزه و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای اثر غیرمستقیم می‌باشند. آن‌ها بیان داشتند که مدیریت صحیح مراتع از طریق حفاظت خاک از فرسایش ذرات ریز و توجه به میزان زهکشی خاک‌ها و جلوگیری از شور شدن آن سبب حفظ پتانسیل ذخیره‌ای کربن در اکوسیستم‌های مرتعی خواهد شد (Sheidai Karkaj et al., 2017). نتایج مطالعه‌ای از دانشگاه شیراز نیز مؤید این روند است (Iranmanesh & Sadeghi, 2019). پیش‌بینی میزان خردشدگی خاک در اثر چرا با استفاده از مدل‌های انفیس انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که انفیس توانایی پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به مدل رگرسیونی در پیش‌بینی میزان خردشدگی خاک دارد (Ghorbani et al., 2019). یک مطالعه مقایسه‌ای میان شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی (انفیس) از بابت سیستم توزیع با ورودی‌های نامعین در کشاورزی و منابع طبیعی انجام شد. نتایج نشان داد که انفیس با دقت بالاتری به پیش‌بینی و مدل‌سازی پارامترهای دخیل در کشاورزی و منابع طبیعی خواهد پرداخت (Okwu & Adetunji, 2018). استفاده از نرم‌افزارهای یادگیری ماشین به‌منظور پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی در استفاده‌های متفاوت از زمین انجام شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و احتمالاً ترکیب آن‌ها (انفیس) می‌تواند با دقت بالایی به پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی بپردازد (Mishra et al., 2022). در مطالعات ترسیب کربن، میزان ترسیب کربن در مناطق میان کوهی در غرب ایالات متحده تقریب زده شد. نتایج نشان داد که مقادیر بسیار بالایی از کربن در مراتع ترسیب شده و میلیارد‌ها دلار سود عاید ساکنان این مناطق می‌کند (Provencher et al., 2023).

از آنجایی که عملیات عرصه‌ای شامل نمونه‌برداری خاک از مکان‌ها و عمق‌های مختلف به‌منظور اندازه‌گیری میزان ترسیب کربن در خاک بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است و از طرفی در بسیاری از مناطق مرتعی ویژگی‌های مختلف خاک ممکن است برای مقاصد دیگری اندازه‌گیری شده و در دسترس باشند، با کمک مدل‌سازی و پیش‌بینی آن تحت ورودی‌های مختلف من جمله خصوصیات خاک مانند بافت،



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور ایران و استان مازندران
Figure 1. Location of studied area in Iran and Mazandaran province

نمونه برداری از خاک منطقه

پس از مشخص نمودن محدوده نمونه برداری بر اساس قابلیت دسترسی، شرایط آب و هوایی و ... با توجه به وضعیت جغرافیایی منطقه، ۴ طبقه ارتفاعی از سطح دریا شامل طبقه ارتفاعی ۱ (۲۷۰۰-۲۵۰۰ متر)، طبقه ۲ (۲۹۰۰-۲۷۰۰ متر)، طبقه ۳ (۳۱۰۰-۲۹۰۰ متر) و طبقه ۴ (بیش از ۳۱۰۰ متر) معین گردید (Jafarian et al., 2013). در هر طبقه ارتفاعی، ۱۳ نقطه تصادفی مشخص و از هر نقطه، ۳ نمونه خاک (در نقش تکرار) از اعماق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی متر تهیه گردید و مجموعاً ۳۱۲ نمونه خاک در کل منطقه تهیه و به آزمایشگاه خاک شناسی منتقل شد. در آزمایشگاه، ویژگی های بافت، کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری به صورت میانگین ۳ تکرار اندازه گیری شد. به واسطه این ویژگی ها، میزان ترسیب کربن خاک محاسبه شد. میزان ترسیب کربن در خاک (گرم بر متر مربع) با ضرب میزان کربن آلی خاک (درصد) در وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) و عمق مورد مطالعه (سانتی متر) در واحد هکتار (۱۰۰۰۰ مترمربع)

محاسبه شد (Jafarian et al., 2012). ورودی های مدل یا به عبارت دیگر متغیرهای ورودی در این پژوهش شامل طبقه ها یا دسته های ارتفاعی (۱، ۲، ۳ و ۴) و عمق نمونه برداری از خاک و خروجی مدل، میزان کربن ترسیب شده در خاک بود.

تجزیه و تحلیل داده ها

داده های جمع آوری شده در نرم افزار اکسل به عنوان بانک اطلاعاتی ذخیره شدند. به منظور تجزیه و تحلیل و هم چنین مقایسه داده ها، ابتدا برای اطمینان از نرمال بودن داده ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده و سپس آزمون همگنی واریانس داده ها با کمک آزمون لون انجام شد. همچنین به منظور بررسی اختلاف یا عدم اختلاف مقادیر ترسیب کربن خاک، از تجزیه واریانس یک طرفه استفاده گردید. داده های به دست آمده به منظور ایجاد مدل های رگرسیونی و انقیس مورد استفاده قرار گرفت. به عبارت دیگر، عمق و ارتفاع محل نمونه برداری از خاک مراتع به عنوان داده های ورودی و میزان ترسیب کربن خاک به عنوان خروجی

Assessment) این مدل‌های پیش‌بینی وجود دارد که به‌طور عمده بر اساس اختلاف بین خروجی‌های پیش‌بینی شده و خروجی‌های مطلوب و واقعی استوارند. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) مطابق روابط زیر، استفاده و بهترین مدل معین شد:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (P_i - P_z)(Q_i - Q_z)]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - P_z)^2 \sum_{i=1}^N (Q_i - Q_z)^2} \quad (2)$$

در روابط فوق: N تعداد نمونه، P_i مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Q_i مقادیر واقعی، P_z میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Q_z میانگین مقادیر واقعی است. به‌منظور بررسی دقت هریک از روش‌ها نسبت به دیگری، مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن‌ها نسبت به داده‌های عرصه‌ای اندازه‌گیری شده، برازش داده شد و بررسی شد که کدام روش پیش‌بینی، ضریب تبیین بالاتر و خطای کم‌تری داشته و به‌عنوان روش دقیق‌تر پیش‌بینی میزان ترسیب کربن با توجه به پارامترهای ورودی گزارش شد.

نتایج و بحث

اثر عوامل تحت بررسی بر میزان ترسیب کربن در خاک
نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به عوامل تحت بررسی بر میزان ترسیب کربن خاک در جدول زیر نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، تنها عمق نمونه‌برداری بر میزان ترسیب کربن معنی‌دار بوده (در سطح یک درصد) و اثر ارتفاع نمونه‌برداری و اثر متقابل عمق نمونه‌برداری و ارتفاع، بر میزان ترسیب کربن خاک بی‌معنی است.

مدل مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل‌های فوق و معادله رگرسیونی در بسته نرم‌افزاری SPSS20 انجام شدند. برای رسم نمودارهای توصیفی از نرم‌افزار Excel استفاده گردید. لازم به ذکر است که مدل‌سازی بر اساس ANFIS در نرم‌افزار متلب (MATLAB) ایجاد شد و بر پایه‌ای از مجموعه داده‌های ورودی/خروجی یک سیستم استنتاج فازی (FIS) است. این سیستم بر پایه قوانین ترکیبی از سه جزء توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی (فازی کردن)، قوانین فازی (پایگاه قواعد)، استنتاج مکانیزم (ترکیب قواعد با ورودی فازی) و مشخصه‌های خروجی و نتایج سیستم (غیرفازی سازی) است (Krueger et al., 2011).

سیستم استنتاج عصبی - فازی (ANFIS)

اگر پارامترهای مستقل در ورودی، پیوسته نباشند و تنها در چند سطح مشخص، مورد آزمون قرار گیرند، یک سیستم فازی-عصبی تطبیقی مانند انفیس، بهترین انتخاب برای تحلیل آن‌ها خواهد بود (Moghim et al., 2015). مدل ANFIS با ورودی‌های مختلف مثل ارتفاع محل نمونه‌برداری و عمق نمونه‌برداری از خاک و خروجی مانند میزان ترسیب کربن خاک در نرم‌افزار MATLAB R2013a (Version 8.1.0.604) و در قسمت edit ANFIS ایجاد می‌شود. مهم‌ترین گام در مدل انفیس تعریف درست توابع عضویت (Membership Functions) فازی و مقادیر مربوطه است. مدل‌های مختلفی توسط ANFIS با تغییر تعداد ورودی‌های توابع عضویت ایجاد می‌گردد. این قسمت در ماژول نرم‌افزار متلب (MATLAB) وجود دارد اما به‌منظور ایجاد ستون داده‌های پیش‌بینی شده باید از چند سطر پروگرامینگ (برنامه‌نویسی) کمک گرفت. ۸۰ درصد داده‌های ورودی به‌منظور آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای تست (ارزیابی یا Evaluation) مدل خروجی مورد استفاده قرار گرفتند. معیارهای مختلفی برای ارزیابی دقت (Accuracy)

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل تحت بررسی بر میزان ترسیب کربن خاک

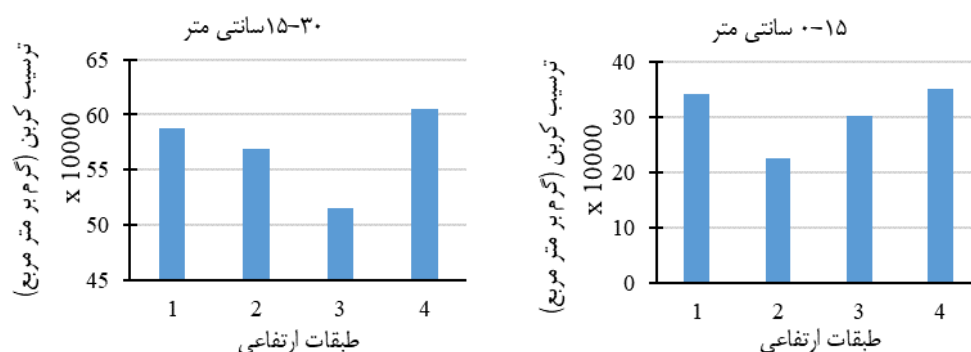
Table1. The ANOVA results of the effect of studied parameters on the soil carbon sequestration amount

منبع تغییرات Source of Variance	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of Square	معنی‌داری Significance
عمق نمونه‌برداری Depth of sampling	1	** 1.826×10 ¹²	0.000
طبقه ارتفاعی Elevation level	3	ns 4.427 ×10 ¹⁰	0.152
عمق × طبقه ارتفاعی Depth × Elevation	3	ns 2.009×10 ¹⁰	0.468
خطا Error	96	2.355×10 ¹⁰	
کل Total	103		

عمق بر میزان ترسیب کربن معنی‌دار است، مقایسه میانگین عمق‌های مختلف تحت بررسی آورده شده است.

چگونگی تغییرات مقادیر ترسیب کربن خاک تحت اثر عوامل مؤثر

شکل‌های ۲ و ۳، اثر عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از خاک را بر میزان ترسیب کربن نشان می‌دهد. همچنین چون تنها اثر



شکل ۲- اثر عمق و ارتفاع نمونه برداری بر میزان ترسیب کربن خاک
Figure 2. The effect of depth and height of sampling on the soil carbon sequestration amount (horizontal axis is sampling height group and vertical axis is soil carbon sequestration (g/m²))



شکل ۳- مقایسه میانگین عمق های تحت بررسی
Figure 3. Comparing the mean of studied depths (horizontal axis is sampling depths and vertical axis is soil carbon sequestration (g/m²))

میزان ترسیب کربن خاک افزایش یافته و در ارتفاع های متوسط، این میزان ترسیب کربن روبه کاهش گذاشته است.
مدل رگرسیونی و اعتبارسنجی آن ها
معادله رگرسیونی در جدول ۲ ارائه گردیده است. این معادله در شرایطی حاصل گردید که طبقه های ارتفاعی به صورت اعداد ۱ الی ۴ در کمیت D و عمق نمونه برداری به صورت اعداد ۱ و ۲ به ترتیب در خصوص عمق های ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی متر در کمیت H لحاظ گردیده است.

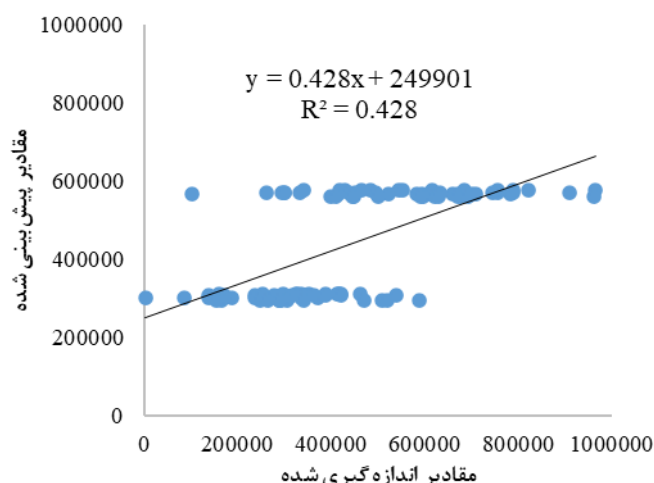
نتایج شکل های فوق نشان می دهد که در حالت کلی و براساس مقایسه میانگین، میزان ترسیب کربن در عمق دوم (۲۲۷۷۵۹۶ گرم بر مترمربع) بسیار بیش تر از عمق اول (۱۲۱۷۵۲۵ گرم بر مترمربع) بوده است. همچنین، میزان ترسیب کربن خاک در هر دو عمق نمونه برداری در طبقه ارتفاعی ۴ بیشینه بوده و بعد از آن طبقه ارتفاعی ۱ بیش تر از سایر طبقه ها می باشد. در واقع، در ارتفاع های بالاتر و پایین تر،

جدول ۲- معادله رگرسیونی و نتایج اعتبارسنجی آن

پارامتر	مدل رگرسیونی	ضریب همبستگی (R ²)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
Parameter	Regression model	Correlation coefficient	Root Mean Squar Error
ترسیب کربن	Y = 2680.689+265017.661 D+5073.224 H	0.428	0.069
Carbon sequestration			
D: عمق (۱ و ۲) و H: دسته ارتفاع نمونه برداری (۱ الی ۴)			

شده است (شکل ۴). همان گونه که ملاحظه می گردد، ضریب همبستگی (R²)، ۰/۴۲۸ است.

ارتباط بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترسیب کربن خاک با استفاده از مدل رگرسیونی در شکل زیر ارائه

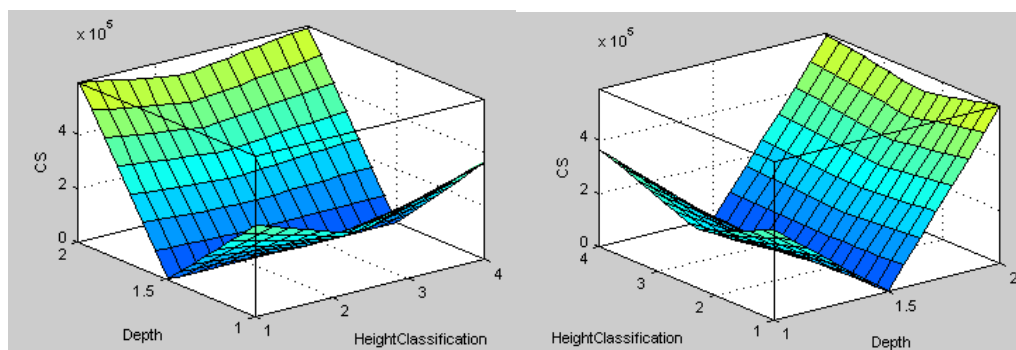


شکل ۴- ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط رگرسیون در خصوص میزان ترسیب کربن خاک
Figure 4. The relationship between measured and predicted data using regression about soil carbon sequestration amount
(horizontal axis is measured values and vertical axis is predicted values)

نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان ترسیب کربن خاک مربوط به طبقه ارتفاعی ۴ و عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. کم‌ترین میزان ترسیب کربن نیز مربوط به طبقه ارتفاعی ۲ و عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۵).

نتایج بخش انفیس

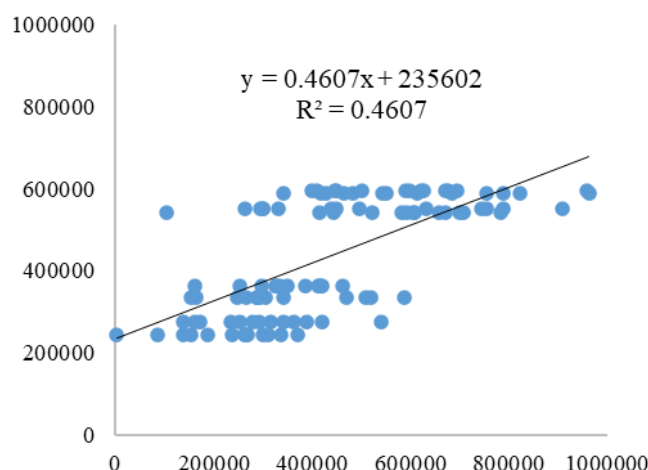
نتایج خروجی مدل انفیس به‌صورت نمودارهای سه‌بعدی برحسب پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشد که بیانگر تأثیر پارامترهای ورودی (عمق خاک و ارتفاع محل نمونه‌برداری) بر خروجی مدل (ترسیب کربن خاک) است. در شکل زیر نتایج



شکل ۵- اثر عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از خاک مراتع بر پیش‌بینی میزان ترسیب کربن. در شکل‌های فوق، Depth (عمق نمونه‌برداری به‌صورت ۱ برای ۱۵-۰ سانتی‌متر و ۲ برای ۳۰-۱۵ سانتی‌متر)، Height Classification (طبقه‌بندی ارتفاعی (۱ الی ۴)) و CS (میزان ترسیب کربن)
Figure 5. The effect of sampling depth and height from rangeland soil on the carbon sequestration prediction. At figs, depth is 1 for 0-15 cm and 2 for 15-30 cm, height classification is 1 to 4 and cs is carbon sequestration

۰/۴۶۰۷ به‌دست‌آمده آمد است. این نتیجه حاکی از توانایی بالاتر مدل انفیس نسبت به مدل رگرسیونی در ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی و نزدیکی آن نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است (شکل ۶ و جدول ۳).

ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده میزان ترسیب کربن خاک با استفاده از مدل انفیس در شرایط مختلف تحت بررسی در شکل زیر ارائه شده است. ضریب تبیین (R^2) مدل انفیس برای میزان ترسیب کربن خاک برابر



شکل ۶- ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط انفیس در خصوص میزان ترسیب کربن خاک
Figure 6. The relationship between measured and predicted data using ANFIS about soil carbon sequestration amount (horizontal axis is measured values and vertical axis is predicted values)

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی معادله انفیس

Table 3. The results of ANFIS equation validation		پارامتر
ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	ضریب همبستگی (R^2)	Parameter
Root Mean Squar Error	Correlation coefficient	
0.0274	0.4607	ترسیب کربن Carbon sequestration

استنتاج فازی- عصبی و رگرسیون چند متغیره با نتایج تحقیق حاضر کاملاً همخوانی دارد. هم‌چنین در تحقیق (Moghimi *et al.*, 2015) به‌منظور برآورد کربن آلی خاک با دو روش رگرسیون چند متغیره و شبکه عصبی مصنوعی (که بخشی از انفیس است) بیان شد که شبکه عصبی مصنوعی با توجه به میزان کم RMSE و MBE نسبت به مدل رگرسیونی دارای دقت و صحت بالاتری است.

عملکرد بهتر مدل انفیس در مقایسه با روش‌های آماری رگرسیونی را می‌توان در قابلیت تخمین و پیش‌بینی آن برای تقریب غیرخطی با حجم کم داده‌ها جستجو نمود. این در حالی است که عملکرد و دقت روش‌های رگرسیونی به‌شدت از حجم نمونه‌ها تبعیت می‌کند و حجم کم نمونه‌ها می‌تواند عامل محدودیت در چنین مدل‌های آماری گردد (Ghorbani *et al.*, 2008). در پژوهش‌های قبلی، عموماً ضریب همبستگی مدل انفیس بیش‌تر از ۸۰ درصد گزارش شده است که با نتایج تحقیق حاضر با ضریب همبستگی انفیس کم‌تر از ۵۰ درصد همخوانی ندارد. علت این اختلاف به این امر بازمی‌گردد که در تحقیق حاضر، دسته یا طبقه ارتفاعی، تعریف شده و فاصله بین ارتفاع‌ها در طبقات یا دسته‌های مختلف، به‌علت پوشش متراکم و مانع از نمونه‌برداری متفاوت است و فقط تعداد نقاط نمونه‌برداری در هر طبقه ارتفاعی برابر است. عموماً پیش‌بینی‌های با ضریب همبستگی بالا در شرایطی حاصل می‌گردد که سطوح ورودی‌ها، مشخص و ثابت باشد که در این پژوهش حادث نگردید و ضریب همبستگی پایین میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در خصوص انفیس و رگرسیون توجیه می‌گردد. سامانه‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی (انفیس)، نه‌تنها در پیش‌بینی میزان ترسیب کربن خاک مراتع

نتایج حاصل نشان داد تنها عمق نمونه‌برداری بر میزان ترسیب کربن اثر معنی‌دار داشته و ارتفاع نمونه‌برداری و اثر متقابل عمق و ارتفاع نمونه‌برداری اثر معنی‌داری بر میزان ترسیب کربن خاک ندارند. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های (Tamartash *et al.*, 2012)، (Saremi *et al.*, 2015) و (Sheidai Karkaj *et al.*, 2017) همخوانی دارد. نتایج پژوهش‌های (Mishra *et al.*, 2022) و (Provencher *et al.*, 2023) نیز نشان داد که عمق نمونه‌برداری از خاک نسبت به سایر عوامل، تأثیر بیشتری بر ترسیب کربن و ظرفیت تبادل کاتیونی دارد. هم‌چنین با نتایج پژوهش‌های (Jalilvand *et al.*, 2015) و (Sarkar *et al.*, 2020) که طبقات ارتفاعی را نیز در میزان ترسیب کربن خاک مراتع مؤثر گزارش نمودند، در تناقض است. علت اختلاف نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات فوق‌الذکر به‌دلیل فاصله ارتفاعی (انفصال) میان دسته‌های ارتفاعی است. در واقع دسته‌های ارتفاعی تعریف شده در تحقیق حاضر پیوسته نیستند و میان آن‌ها به‌دلیل نوع پوشش منطقه نمونه‌برداری و ... یک‌فاصله ارتفاعی وجود دارد. ضریب همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده توسط معادله رگرسیونی و اندازه‌گیری شده هم‌چنین میانگین مربعات خطا در این روش به‌ترتیب ۰/۴۲۸ و ۰/۰۶۹ بود. در حالی که ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا در روش انفیس به‌ترتیب ۰/۴۶۰۷ و ۰/۰۲۷۴ به‌دست آمد. با توجه به افزایش ضریب همبستگی و کاهش میانگین انحراف خطا در روش انفیس نسبت به رگرسیون چند متغیره خطی، به‌نظر می‌رسد روش انفیس در برآورد میزان ترسیب کربن خاک تحت تأثیر عوامل مختلف در کاربری مورد مطالعه، موفق‌تر عمل کرده است. نتایج تحقیق (Bahrami *et al.*, 2023) در برآورد کربن آلی ذره‌ای خاک با استفاده از سیستم

تحت شرایط عمق و ارتفاع نمونه‌برداری متفاوت عملکرد
بهبتری دارد، بلکه می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری هوشمند در
جهت پیش‌بینی پارامترهای مختلف در مراتع تحت بررسی

مثلاً در پیش‌بینی حجم زیست‌توده زیرزمینی و روزمینی، نحوه
پراکنش گونه‌های مرتعی و ... استفاده نمود.

References

- Abdi, N., Madah Arefi, H., & Zahedi Amiri, G. D. (2008). Estimation of carbon sequestration in Astragalus rangelands of Markazi province (Case study: Malmir rangeland in Shazand region). *Iranian journal of range and desert research*, 15(2), 269-282 (In Persian).
- Anderson, D. W., Saggat, S., Bettany, J. R., & Stewart, J. W. B. (1981). Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen, and sulfur. *Soil Science Society of America Journal*, 45(4), 767-772.
- Azarnivand, H., Joneidi, H., Chahooki, M. Z., & Arefi, H. M. (2011). Investigation of the effects of some ecological factors on carbon sequestration in *Artemisia sieberi* rangelands of Semnan province. *Journal of range and watershed management*, 64(1), 107-127 (In Persian).
- Bahrami, B., Dianati Tilaki, G. A., Khosro Beigi, S., Janizadeh, S., & Moetamedi, J. (2013). Evaluation of artificial neural network (ANN), adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and regression models in prediction of particulate organic matter-carbon (POM-C) in the rangelands Kharabe Sanji of Urmia. *Applied Soil Research*, 1(1), 94-106 (In Persian).
- Bayat, M., Arzani, H., Jalili, A., & Ghalij Nia, H. (2018). The effect of climatic factors on canopy cover and range forage production in semi-steppe rangelands (Case Study: Polur and Rineh-Mazandaran province). *Journal of Range and Watershed Management*, 71(2), 378-367 (In Persian).
- Boroumand, M., Ghajar Sepanlu, M., & Bahmanyar, M.A. (2014). The Effect of Land use Change on Some of the Physical and Chemical Properties of Soil (Case Study: Semeskande Area of Sari). *Journal of Watershed Management Research*, 5(9), 78-94 (In Persian).
- Brahim, N., Blavet, D., Gallali, T., & Bernoux, M. (2011). Application of structural equation modeling for assessing relationships between organic carbon and soil properties in semiarid Mediterranean region. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8, 305-320.
- Farzi, H., Tamartash, R., Jafarian, Z., & Tatian, M.R. (2019). The effect of revitalization measures on the change of vegetation performance in the pastures of the southern slopes of central Alborz. *Rangeland and Watershed Journal*, 72(2), 505-515.
- Ghorbani, A., Sharifi, J., Kavianpour, H., Malekpour, B., & Mirzaei, F. (2008). Investigating the ecological specifications of *Festuca ovina* L. in southeast of Sabalan mountain. *Journal of Iranian Forest and Desert*, 20(2), 379-396 (In Persian).
- Ghorbani, Z. H., Sefidi, K., Keyvan Behjo, F., Moammeri, M., & Soltanilarod, A. (2019). Predicting the soil fragmentation caused by grazing using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Range and Watershed Management*, 72(2), 557-568 (In Persian).
- Ghorbani, J., Sefidi, K., Keyvan Behjo, F., Moameri, M., & Soltanilarood, A. (2016). Effects of different grazing intensities on some soil physical and chemical properties in southeastern rangelands of Sabalan Mountain. *Rangeland*, 9(4), 353-366 (In Persian).
- Homann, P. S., Kapchinske, J. S., & Boyce, A. (2007). Relations of mineral-soil C and N to climate and texture: regional differences within the conterminous USA. *Biogeochemistry*, 85, 303-316.
- Iranmanesh, M., & Sadeghi, H. (2019). Effects of soil texture and nitrogen on ability of carbon sequestration in different organs of two *Tamarix* species as a good choice for carbon stock in dry lands. *Ecological Engineering*, 139, 105577.
- Jafarian, Z., & Tayefeh Seyyed Alikhani, L. (2013). Carbon sequestration potential in dry farmed wheat in Kiasar region. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 23(1), 31-41.
- Jafarian, Z., Tayefeh Seyyed Alikhani, L., & Tamartash, R. (2012). Investigation of Carbon Storage Potential of *Artemisia aucheri*, *Agropyron elongatum*, *Stipa barbata*, in Semi-Arid Rangelands of Iran (Case study: Peshert Region, Kiasar). *Journal of Range and Watershed Management*, 65(2), 191-202 (In Persian).
- Jalilvand, H., Jafarian, Z., & Yusefi, M. (2015). Effect of forestation hardwood and softwood on soil carbon storage in Berenjestanak forest at Mazandaran Province. *Journal of Natural Environment*, 68(2), 179-190 (In Persian).
- Krueger, E., Prior, S. A., Kurtener, D., Rogers, H. H., & Runion, G. B. (2011). Characterizing root distribution with adaptive neuro-fuzzy analysis. *International Agrophysics*, 25(1), 93-96.
- Liu, X., Yang, T., Wang, Q., Huang, F., & Li, L. (2018). Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 618, 1658-1664.
- Mishra, G., Sulieman, M. M., Kaya, F., Francaviglia, R., Keshavarzi, A., Bakhshandeh, E., ... & Rawat, D. (2022). Machine learning for cation exchange capacity prediction in different land uses. *Catena*, 216, 106404.
- linear regression analysis and artificial neural network methods for simulating topographic factors effect on soil organic carbon. *Watershed Engineering and Management*, 6(4), 312-322 (In Persian).

- Okwu, M. O., & Adetunji, O. (2018). A comparative study of artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) models in distribution system with nondeterministic inputs. *International Journal of Engineering Business Management*, 10, 1847979018768421.
- Pandiyan, V., Caesarendra, W., Tjahjowidodo, T., & Praveen, G. (2017). Predictive modelling and analysis of process parameters on material removal characteristics in abrasive belt grinding process. *Applied Sciences*, 7(4), 363.
- Pentoś, K., & Pieczarka, K. (2017). Applying an artificial neural network approach to the analysis of tractive properties in changing soil conditions. *Soil and Tillage Research*, 165, 113-120.
- Provencher, L., Byer, S., Frid, L., Senthivasan, S., Badik, K. J., & Szabo, K. (2023). Carbon Sequestration in Degraded Intermountain West Rangelands, United States. *Rangeland Ecology & Management*, 90, 22-34.
- Saremi, M., Rouhimoghaddam, E., & Fakhireh, A. (2015). Pasture Management Effects on Carbon Sequestration Rates of *Astragalus peristerus* in Fasham Rangelands, Tehran. *Journal of Environmental Studies*, 41(1), 193-199 (In Persian).
- Sarkar, R., Corriher-Olson, V., Long, C., & Somenahally, A. (2020). Challenges and potentials for soil organic carbon sequestration in forage and grazing systems. *Rangeland Ecology & Management*, 73(6), 786-795.
- Sheidai Karkaj, E., Sepehri, A., Barani, H., & Motamedi, J. (2017). The relationship between soil organic carbon reservoir and some soil charestristics in East azarbaijan rangeland. *Journal of Rangeland*, 11(2), 125-138 (In Persian).
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014). On the modeling of energy efficiency indices of agricultural tractor driving wheels applying adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Terramechanics*, 56, 37-47.
- Taleshian Jeloudar, F., Ghajar Sepanlou, M., & Emadi, S. M. (2019). " Technical Report" The Effects of Land use Change on Some Physical and Chemical Properties of Soil (Case Study: Babolrood watershed). *Journal of Watershed Management Research*, 10(19), 222-232 (In Persian).
- Tamartash, R., Tatian, M. R., & Yousefian, M. (2012). The effect of different plants type on the Carbon sequestration of Miankale Plain Rangelands. *Knowing the Environment*, 62(2), 45-54 (In Persian).
- Wang, S., Wang, X., & Ouyang, Z. (2012). Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China. *Journal of Environmental Sciences*, 24(3), 387-395.