Journal of Rangeland

Print ISSN: 2008-0891

Online ISSN: 2676-5039

Prediction of Soil Carbon Sequestration in Rangelands Based on Soil Sampling Depth and Elevation Using Response Surface Methodology

Zeinab Jafarian*[1], Zhila Ghorbani[2]

1. Corresponding author; Prof., Department of Rangeland Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: z.jafarian@sanru.ac.ir
2. PhD. Student in Rangeland Science, Department of Rangeland Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 02.03.2022
Revised: 02.12.2022
Accepted: 22.12.2022

Keywords:
Modeling,
Response Surface Methodology,
Regression,
Carbon Sequestration,
Optimization.

Abstract

Background and Objectives: Organic carbon is a crucial parameter for assessing soil fertility, productivity, and quality, particularly in dry and semi-dry lands. Rangelands cover approximately 50% of the Earth's land area and store over 33% of the global carbon reservoirs. Considering rangelands as significant terrestrial ecosystems and natural carbon reserves, understanding and quantifying carbon sequestration in these ecosystems is of great importance.

Methodology: This research focused on rangelands in the southern domain of Damavand Mountain. Four height groups were selected based on geographic conditions, regional plant cover, and slope. Each height group represented a different elevation range: group 1 (2504-2664 m), group 2 (2730-2896 m), group 3 (2923-3050 m), and group 4 (3119-3545 m). Soil sampling was conducted at two depths (0-15 cm and 15-30 cm) using 13 random points within each height group. Soil organic carbon and bulk density were measured, and carbon sequestration was calculated at the hectare level by multiplying organic carbon and depth. Regression equations and response surface models (RSM) were developed using design software to predict carbon sequestration and compare their accuracy.

Results: Analysis of variance (ANOVA) showed that only sampling depth significantly affected soil carbon sequestration, while sampling height and the interaction between depth and height had no significant effect. Carbon sequestration was higher at a depth of 15-30 cm compared to 0-15 cm. Among the height groups, group 4 (3119-3545 m) exhibited the highest soil carbon sequestration, followed by group 1 (2504-2664 m). The highest carbon sequestration (6046.54 g/m2) was observed in height group 4 at a depth of 15-30 cm, while the lowest (2250 g/m2) was found in height group 2 at a depth of 0-15 cm. The quadratic model of the response surface methodology demonstrated higher accuracy (R2 = 0.7363) in predicting soil carbon sequestration compared to the linear model (R2 = 0.6014) and the less accurate regression model (R2 = 0.428). The response surface method successfully optimized the inputs, suggesting a height of 3500 meters and a specific depth to achieve a soil carbon sequestration amount of 8088.117 g/m2 with a satisfaction level of 0.976.

Conclusion: The response surface methodology (RSM) proved to be a valuable tool for predicting and optimizing soil carbon sequestration in rangelands, considering different sampling depths and heights. It can also be utilized for predicting various parameters in rangeland science, such as above and underground biomass volume

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

and plant species coverage. RSM offers a novel approach for understanding and managing rangeland ecosystems.

Cite this article: Jafarian, Z., Zh. Ghorbani, 2023. Prediction of Soil Carbon Sequestration in Rangelands Based on Soil Sampling Depth and Elevation Using Response Surface Methodology. Journal of Rangeland, 17(2): 179-194.

© The Author(s).
DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3
Publisher: Iranian Society for Range Management

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

مـــرتـــع

شاپا چاپی: ۰۸۹۱-۲۰۰۸

شاپا الکترونیکی: ۵۰۳۹-۲۶۷۶

پیش‌بینی میزان کربن ترسیب شده در خاک مراتع تحت تأثیر عمق نمونه‌برداری از خاک و ارتفاع با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

زینب جعفریان*[۱]، ژیلا قربانی[۲]

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: z.jafarian@sanru.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل – پژوهشی

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۱۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۱

واژه‌های کلیدی:
مدل‌سازی،
روش سطح پاسخ،
رگرسیون،
ترسیب کربن،
بهینه‌سازی.

چکیده

سابقه و هدف: کربن آلی خاک یکی از پارامترهای مهم تعیین‌کننده میزان حاصل‌خیزی خاک، قابلیت تولید و شاخص مهمی در نشان دادن کیفیت خاک مخصوصاً خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است. مراتع، در حدود نیمی از خشکی‌های جهان را تشکیل می‌دهند و حاوی بیش از یک سوم ذخایر کربن زیست‌کره خاکی هستند. با توجه به این که مراتع به عنوان مهم‌ترین اکوسیستم‌های خشکی، ذخایر طبیعی کربن به شمار می‌روند، بسیار مورد توجه بوده و نحوه و میزان ترسیب کربن در آن‌ها مهم است.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق پس از انتخاب مراتع واقع در دامنه جنوبی کوه دماوند، با توجه به وضعیت جغرافیایی و پوشش گیاهی منطقه، ۴ طبقه ارتفاعی از سطح دریا با نوع و ترکیب پوشش گیاهی یکسان همچنین شیب متوسط به گواهی بازدید میدانی و اطلاعات اداره منابع طبیعی ناحیه شامل طبقه ارتفاعی ۱ (۲۶۶۴-۲۵۰۴ متر)، طبقه ۲ (۲۸۹۶-۲۷۳۰ متر)، طبقه ۳ (۳۰۵۰-۲۹۲۳ متر) و طبقه ۴ (۳۵۴۵-۳۱۱۹ متر) جهت نمونه‌برداری از خاک در ارتفاع‌های متفاوت، معین گردید. در هر طبقه ارتفاعی، ۱۳ نقطه تصادفی مشخص و از هر نقطه، سه نمونه خاک (در نقش تکرار) از اعماق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر تهیه گردید. پس از اندازه‌گیری میزان کربن ترسیب شده در هر نمونه خاک، داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. میزان ترسیب کربن در خاک (گرم بر متر مربع) با ضرب میزان کربن آلی خاک (درصد) در وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و عمق (سانتی‌متر) مورد مطالعه و در عدد ثابت ۱۰۰۰۰ به علت تبدیل واحد، محاسبه شد. سپس اقدام به ایجاد معادلات رگرسیونی و روش سطح پاسخ (RSM) شده و دقت آن‌ها در پیش‌بینی میزان ترسیب کربن با یکدیگر مقایسه گشته و روش دقیق‌تر مشخص شد. برای ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی و روش سطح پاسخ از ضریب تعیین (R^2) میان داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده استفاده شد.

نتایج: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فقط عمق نمونه‌برداری، اثر معنی‌داری بر میزان ترسیب کربن خاک داشته و اثر ارتفاع نمونه‌برداری همچنین اثر متقابل عمق و ارتفاع نمونه‌برداری بر میزان ترسیب کربن خاک بی‌معنی بود. در حالت کلی، میزان ترسیب کربن در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری بیشتر از ۱۵-۰ سانتی‌متر بوده و در هر دو عمق تحت بررسی، طبقه ارتفاعی ۴ (۳۵۴۵-۳۱۱۹ متر) بیشترین میزان ترسیب کربن خاک را داشت. به علاوه پس از طبقه ارتفاعی۴، بیشترین میزان ترسیب کربن مربوط به طبقه ارتفاعی۱ (۲۶۶۴-۲۵۰۴ متر) بود. بیشترین میزان ترسیب کربن به میزان ۶۰۴۶/۵۴ گرم در متر مربع مربوط به طبقه ارتفاعی۴ و عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر و کمترین میزان ترسیب کربن در حدود ۲۲۵۰ گرم در متر مربع مربوط به طبقه ارتفاعی ۲ و عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر بود. در بخش مدل‌سازی، مدل درجه دوم روش سطح پاسخ با دقت بالاتر (R^2=۰/۷۳۶۳) نسبت به مدل خطی همین روش (R^2=۰/۶۰۱۴) و مدل کم دقت‌تر رگرسیونی (R^2=۰/۴۲۸)، میزان ترسیب کربن خاک مراتع را پیش‌بینی نمود. به علاوه، روش سطح پاسخ موفق به

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

بهینه‌سازی ورودی‌ها به صورت ارتفاع ۳۵۰۰ متری و عمق دوم به منظور یافتن میزان ترسیب کربن در خاک به صورت ۸۰۸۸/۱۱۷ گرم در متر مربع با رضایتمندی ۰/۹۷۶ گردید.

نتیجه‌گیری: روش سطح پاسخ (RSM) به عنوان یک ابزار نوین نه‌تنها در پیش‌بینی و بهینه‌سازی میزان ترسیب کربن خاک مراتع تحت شرایط عمق و ارتفاع نمونه‌برداری متفاوت عملکرد مطلوبی دارد، بلکه می‌توان از آن به عنوان ابزاری هوشمند در جهت پیش‌بینی پارامترهای مختلف در علوم مرتع و مراتع تحت بررسی به عنوان مثال در پیش‌بینی حجم زیست توده زیرزمینی و روزمینی، نحوه پراکنش گونه‌های مرتعی و ... استفاده نمود.

استناد: جعفریان، ز.، ژ. قربانی، ۱۴۰۲. پیش‌بینی میزان کربن ترسیب شده در خاک مراتع تحت تأثیر عمق نمونه‌برداری از خاک و ارتفاع با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM). مرتع، ۱۷(۲): ۱۷۹-۱۹۴.

DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3

ناشر: انجمن علمی مرتعداری ایران

© نویسندگان

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

مقدمه

کربن در بخش‌های مختلف بوم‌سازگان‌های طبیعی قابل ترسیب است که مهم‌ترین آن خاک است. هرساله مقدار زیادی کربن (بیش از ۱۰۰ بیلیون تن) در مقیاس جهانی ترسیب می‌شود که ذخیره کربن آلی خاک یکی از ذخایر بزرگ کربن در سطح زمین است. به طوری که این مقدار حدود ۱۵۰۰ گیگاتن برآورد شده است. از طرفی دیگر کربن آلی خاک یکی از پارامترهای مهم تعیین‌کننده میزان حاصلخیزی خاک، قابلیت تولید و شاخص مهمی در نشان دادن کیفیت خاک مخصوصاً خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است که در آن مقادیر ورودی کربن ناچیز است (۲ و ۱۲). مراتع، در حدود نیمی از خشکی‌های جهان را تشکیل می‌دهند و حاوی بیش از یک سوم ذخایر کربن زیست کره خاکی بوده و یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های خشکی هستند که به منظور ذخیره کربن به شمار می‌روند (۴ و ۱۱). 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 (۱۸ و ۲۰). 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 (۲۵ و ۲۶). 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 (۴). همچنین این امر می‌تواند در شبیه‌سازی نحوه اثرگذاری تغییرات محیطی بر میزان کربن خاک، کمک‌کننده 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 به دلیل حفاظت بلند و میان مدت کربن در خود توسط حفاظت فیزیکی و شیمیایی، بیشتر حائز اهمیت است (۷). مروری بر منابع موجود و در دسترس نشان می‌دهد که اطلاعات زیادی در مورد نحوه ذخیره کربن در خاک و عوامل مؤثر و ارتباط بین آن‌ها وجود ندارد. مطالعات کمی در این خصوص انجام شده است. براهیم و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی ارتباط ویژگی‌های خاک با میزان کربن آلی خاک دو نوع خاک رسی و خاک شنی پرداختند. یافته‌های این مطالعه 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. وانگ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از رگرسیون چند متغیره یافتند 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.

در داخل کشور نیز عبدی و همکاران (۲۰۰۸) بیان نمودند 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 گام به گام 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. آذرنیوند و همکاران (۲۰۱۱) به منظور تعیین عامل‌های بوم‌شناختی مؤثر بر ترسیب کربن از رگرسیون چندمتغیره استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار کربن ذخیره‌ای در این اکوسیستم‌ها بیشتر تحت‌تأثیر زیست توده ریشه، رس و نیتروژن خاک، عامل ارتفاع از سطح دریا و میانگین بارش سالیانه قرار دارد. به علاوه دریافتند که خاک با دارابودن ۸۷ درصد کربن در خود سهم بیشتری در ذخیره کربن را نسبت به سایر مؤلفه‌های اکوسیستم نظیر بیوماس دارا است. جعفریان و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه ذخیره کربن در سه گونه گیاهی پرداختند. بررسی کربن ذخیره شده در خاک

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

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 در خود ذخیره کرده است. جعفریان و سید علیخانی (۲۰۱۳) دریافتند که میزان ترسیب کربن در اندام‌های مختلف گیاه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد داشته و 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. جلیلوند و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی تأثیر جنگلکاری پهن‌برگ و سوزنی برگ بر میزان ذخیره کربن خاک در جنگل برنجستانک استان مازندران یافتند که رویشگاه و عمق اثر معناداری بر میزان ذخیره 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. نتایج سرکار و همکاران (۲۰۲۰) در ایالات متحده نیز مؤید همین روند است. شیدای کرکج و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی عوامل خاکی مؤثر بر میزان ذخیره کربن آلی خاک پرداخته و مدلی را برای تخمین توان ذخیره کربن با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مراتع استان آذربایجان شرقی ارائه نمودند. 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 هستند. 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. نتایج ایرانمنش و صادقی (۲۰۱۹) نیز مؤید این روند است. معتمدی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی ارتباط ذخیره کربن گونه *Astragalus brachyanus* با صفات گیاهی، خصوصیات رویشگاهی و مدیریت مرتع در منطقه راژان آذربایجان غربی پرداختند. نتایج نشان داد که ذخیره کربن سالانه بیوماس هوایی با قطر تاج و ارتفاع پایه گیاهی، ارتباط مستقیم و با شدت چرا، ارتباط معکوس دارد. آنها پیشنهاد نمودند که عملیات پرورش گون درختچه‌ای باید در جهت افزایش صفات گیاهی و در نتیجه افزایش سطوح فتوسنتز کننده صورت گیرد. شیدای کرکج و معتمدی (۲۰۲۰) به بررسی ارتباط تنوع عملکردی و تاکسونومیکی گیاهی با کارکرد ذخیره کربن خاک در مراتع کوهستانی نازلوچای آذربایجان غربی پرداختند. نتایج نشان داد که تمامی پارامترهای تحت بررسی به جز وزن مخصوص ظاهری خاک، رابطه مثبت با ذخیره کربن داشتند. به علاوه، کربن ذخیره‌ای خاک براساس افزایش فراوانی گونه‌های با برگ دراز، افزایش یکواختی عملکردی و در نهایت تنوع گروه‌های عملکردی بالا، افزایش یافت. به علاوه گزارش نمودند که عدم توجه به کاهش تنوع در مدیریت مراتع و ضعیف‌شدن وضعیت آن، موجب کاهش توان ذخیره کربن خاک خواهد شد.

از آنجایی که عملیات عرصه‌ای شامل نمونه‌برداری خاک از مکان‌ها و عمق‌های مختلف به منظور 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 من‌جمله خصوصیات خاک مانند بافت، 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 نیمه تحلیلی و مدل‌های کامپیوتری. در میان مدل‌های کامپیوتری، تکنیک روش سطح پاسخ (RSM= Response Surface Methodology) به عنوان روشی در بستر نرم‌افزار Design Expert، روشی نسبتاً جدید بوده و تحقیقات در خصوص توانایی‌های آن در مورد پیش‌بینی و بهینه‌سازی، توسط پژوهشگران در نقاط مختلف دنیا در حال انجام است. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که جهت توسعه و بهینه‌کردن فرآیندهایی به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد و هدف، توصیه رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل توسط مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی این پاسخ است (۶). تحقیقات بسیار کمی در خصوص بررسی توانایی روش سطح پاسخ به‌منظور

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

پیش‌بینی پارامترهای مختلف مرتبط با کشاورزی و منابع طبیعی انجام گردیده است. در یکی از این تحقیقات به بررسی نیروی کششی و عمودی وارد بر تیغه باریک خاک‌ورز و بهینه‌سازی عوامل مؤثر به کمک روش سطح پاسخ پرداخته شد (۲۶) و در تحقیق دیگر، پارامترهای مرتبط با توانایی کشش تراکتور به کمک روش سطح پاسخ، پیش‌بینی شده و بهینه‌سازی شدند (۳). با توجه به منابع در دسترس، تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص استفاده از روش سطح پاسخ در پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای مرتبط با مرتع و مرتعداری انجام نشده است.

با توجه به موارد مطرح شده، هدف از تحقیق حاضر، بررسی قابلیت پیش‌بینی میزان ترسیب کربن خاک مراتع با استفاده از تکنیک روش سطح پاسخ و بهینه‌سازی توسط این روش است. در این تحقیق پس از جمع‌آوری نمونه‌های خاک از مراتع دماوند و اندازه‌گیری میزان کربن ترسیب شده در آن‌ها، نرم‌افزار Design Expert بخش روش سطح پاسخ، آموزش داده شد و مقادیر متناظر با ورودی‌های تحقیق را پیش‌بینی نمود.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

در تحقیق حاضر، روش کمی مورد استفاده قرار گرفت. بر همین اساس ابتدا منطقه موردنظر به لحاظ ویژگی‌های دسترسی و آب و هوایی و محدوده، تحت بررسی قرار گرفته و سپس داده‌های مورد نیاز به واسطه نمونه‌گیری فیزیکی، جمع‌آوری شد. مطالعه حاضر در مراتع واقع در شیب‌های جنوبی کوه دماوند با مختصات جغرافیایی″ ۳۰ ′ °۵۱ ۳۵ تا″ ۳۰ ′ °۵۵ ۳۵ شمالی و ′۲ °۵۲ تا ′۲ °۵۲ شرقی اجرا شد. منطقه مورد نظر دارای حدود ۲۰۰۰ هکتار مساحت بوده و در بازه ارتفاعی بین ۲۵۰۰ تا ۳۴۶۰ متر نسبت به آب‌های آزاد قرار داشت. در دوره آماری ۳۶ ساله اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب تا فرا سرد و متوسط بارندگی ۵۵۰ میلی‌متر است (۷). گونه‌های گیاهی غالب در منطقه عبارتند از Onorychis corunata, Astragalus ochrodeucus, Astragalus microcephalus, Thymus pubescens, Ferula gummosa, Astragalus retamocarpus (۱۶).

نمونه‌برداری از خاک منطقه

با توجه به وضعیت جغرافیایی و پوشش گیاهی منطقه، ۴ طبقه ارتفاعی از سطح دریا با نوع و ترکیب پوشش گیاهی یکسان همچنین شیب متوسط به گواهی بازدید میدانی و اطلاعات اداره منابع طبیعی ناحیه شامل طبقه ارتفاعی ۱ (۲۶۶۴-۲۵۰۴ متر)، طبقه ۲ (۲۸۹۶-۲۷۳۰ متر)، طبقه ۳ (۳۰۵۰-۲۹۲۳ متر) و طبقه ۴ (۳۵۴۵-۳۱۱۹ متر) جهت نمونه‌برداری از خاک در ارتفاع‌های متفاوت، معین گردید. در هر طبقه ارتفاعی، ۱۳ نقطه تصادفی مشخص و از هر نقطه، سه نمونه خاک (در نقش تکرار) از اعماق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر تهیه گردید و سپس نمونه‌های جمع‌آوری شده به آزمایشگاه خاک‌شناسی منتقل شدند. در آزمایشگاه، ویژگی‌های بافت، اسیدیته، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن، فسفر و وزن مخصوص ظاهری و رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. به واسطه این ویژگی‌ها، میزان ترسیب کربن خاک محاسبه شد. بدین صورت که میزان ترسیب کربن در خاک (گرم بر متر مربع) با ضرب میزان کربن آلی خاک (درصد) در وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و عمق (سانتی‌متر) مورد مطالعه و در عدد ثابت ۱۰۰۰۰ به علت تبدیل واحد سانتی‌متر مربع به متر مربع، محاسبه شد (۱۶).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های جمع‌آوری شده در نرم‌افزار اکسل (Excel) به عنوان بانک اطلاعاتی ذخیره شدند. به منظور تجزیه و تحلیل و همچنین مقایسه داده‌ها، ابتدا آزمون نرمالیته داده‌ها با استفاده از روش کولموگروف- اسمیرنوف و آزمون همگنی واریانس داده‌ها با کمک روش لِوِن انجام شد. سپس به منظور بررسی اختلاف یا عدم اختلاف مقادیر ترسیب کربن خاک، از تجزیه واریانس یک طرفه استفاده گردید. از طرف دیگر، داده‌های به دست آمده به منظور ایجاد مدل‌های رگرسیونی و روش سطح پاسخ مورد استفاده قرار گرفت. به عبارت دیگر، عمق و ارتفاع محل نمونه‌برداری از خاک مراتع از سطح دریا به عنوان داده‌های ورودی و میزان ترسیب کربن خاک به عنوان خروجی مدل مورد بررسی قرار گرفت. معادله رگرسیونی توسط نرم‌افزار SPSS و مدل‌سازی روش سطح پاسخ در نرم‌افزار Design Expert ایجاد شد. به

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

منظور 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 تعیین (R^2) بالاتری داشته و به عنوان روش دقیق‌تر پیش‌بینی میزان ترسیب کربن با توجه به پارامترهای ورودی گزارش شد. شایان ذکر است که تمامی تجزیه و تحلیل‌های آماری در بسته نرم‌افزاری SPSS نسخه ۲۰ انجام شدند. برای رسم نمودارهای توصیفی از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

تکنیک روش سطح پاسخ (RSM)

مدل مورد استفاده در روش سطح پاسخ عموماً رابطه‌ای درجه دوم است. در روش سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و متقابل فاکتورها را برای هر متغیر به صورت جداگانه بیان می‌کند. بر همین اساس، مدل چند متغیره با فرض سه متغیر در ورودی بـه صـورت رابطه۱ است:

رابطه (۱):

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3$$

در این رابطه Y پاسخ پیش‌بینی شده، a_0 ضریب ثابـت و a_1، a_2 و a_3 ضرایب خطی به تعداد و ترتیب پارامترهای ورودی مورد بررسی است. همچنین a_{11}، a_{22} و a_{33} ضرایب تأثیرات درجه دوم و a_{12}، a_{13} و a_{23} ضرایب تأثیرات متقابل هستند. در تحقیق حاضر از طرح مرکب مرکزی با دو متغیر مسـتقل در ورودی به صورت عمق نمونه‌برداری در دو سطح و سطوح ارتفاعی از سطح دریا در چهار سطح بر اساس تیمارهای خواسته شده از نرم افزار به‌منظور بررسی تأثیر متغیرهای مستقل (ورودی) بر میزان ترسیب کربن در خاک مراتع به عنوان متغیر وابسته (خروجی) استفاده شد (۱۷). مهم‌ترین مسئله این تحقیق، بررسی آثار اصلی و متقابل عوامل مؤثر و همچنین ارائه مدل و بهینه‌سازی آن‌ها بود. از این رو، روش سطح پاسخ انتخاب شد. با کمک این روش، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و تمامی ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل عوامل، قابل برآورد می‌شوند. لازم به ذکر است که برای محاسبه آماری، مدل‌سازی و بهینه‌سازی از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۷.۰.۰ استفاده شد. در این مطالعه اثر متغیرهای ورودی (مستقل) شامل عمق نمونه‌برداری از خاک مراتع (X_1) و ارتفاع محل نمونه‌برداری از سطح دریا (X_2) اولی در دو سطح و دومی در چهار سطح بر متغیر خروجی (وابسته) که میزان ترسیب کربن در خاک مراتع است، ارزیابی شد. معیارهای مختلفی برای ارزیابی این مدل‌های پیش‌بینی وجود دارد که به‌طور عمده بر اساس اختلاف بین خروجی‌های پیش‌بینی شده و خروجی‌های مطلوب و واقعی استوارند. خروجی‌های بزرگتر در روش سطح پاسخ، نمودارهای بهتری خواهند داشت. به همین منظور ورودی‌ها در روش سطح پاسخ ضرب در ۱۰۰ شدند تا خروجی‌های این بخش نیز با ضریب ۱۰۰ نمایش داده شوند. برای ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق از پارامتر ضریب تعیین (R^2) استفاده شد و بهترین مدل معین شد (رابطه ۲).

رابطه (۲):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{N}(Pi-Pz)(Qi-Qz)]2}{\sum_{i=1}^{N}(Pi-Pz)2\sum_{i=1}^{N}(Qi-Qz)2}$$

در رابطه 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.

نتایج

اثر عوامل تحت بررسی بر میزان ترسیب کربن در خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به عوامل تحت بررسی بر میزان ترسیب کربن خاک نشان داد که تنها عمق نمونه‌برداری بر میزان ترسیب کربن معنی‌دار بوده (در سطح یک درصد) و اثر ارتفاع نمونه‌برداری از خاک و اثر متقابل عمق نمونه‌برداری و ارتفاع بر میزان ترسیب کربن خاک بی‌معنی بود (جدول ۱).

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

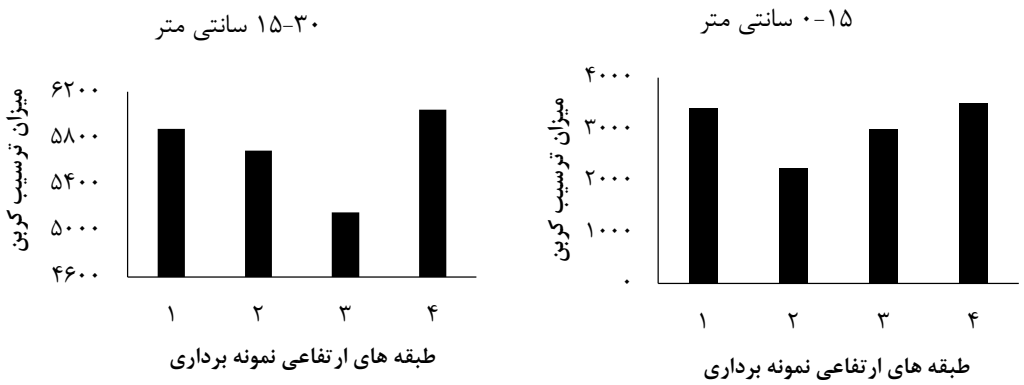
[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

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

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	معنی داری
عمق نمونه برداری	۱	۱/۸۲۶ ×۱۰^۱۰	۰/۰۰۰
طبقه ارتفاعی	۳	۴/۲۴۷ ×۱۰^۸	۰/۱۵۲
عمق × طبقه ارتفاعی	۳	۲/۰۰۹×۱۰^۸	۰/۴۶۸
خطا	۹۶	۲/۳۵۵×۱۰^۸	
کل	۱۰۳		

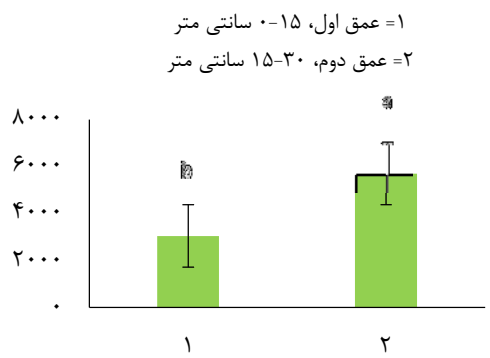
تغییرات مقادیر ترسیب کربن خاک تحت اثر عوامل مؤثر

شکل‌های زیر، اثر عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از خاک را بر میزان ترسیب کربن نشان می‌دهد (شکل ۱).



شکل۱: اثر عمق و ارتفاع محل نمونه‌برداری بر میزان ترسیب کربن خاک (گرم بر متر مربع)

از شکل (۱) دریافت می‌شود که میزان ترسیب کربن خاک در هر دوعمق نمونه‌برداری شامل ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری در طبقه ارتفاعی ۴ (ارتفاع ۳۵۴۵-۳۱۱۹ متر از سطح دریا) بیشینه بوده و بعد از آن طبقه ارتفاعی ۱ (ارتفاع ۲۶۶۴-۲۵۰۴ متر از سطح دریا) بیشتر از سایر طبقه‌ها است. در واقع، در ارتفاع‌های بالاتر و پایین‌تر، میزان ترسیب کربن خاک افزایش یافته و در ارتفاع‌های متوسط، میزان ترسیب کربن رو به کاهش گذاشته است. به علاوه در حالت کلی و براساس مقایسه میانگین، میزان ترسیب کربن در عمق دوم بسیار بیشتر از عمق اول بوده است (شکل۲).



شکل ۲: مقایسه میانگین مقادیر کربن ترسیب شده (گرم بر متر مربع) در عمق‌های تحت بررسی

مدل رگرسیونی و اعتبارسنجی آن‌ها

معادله رگرسیونی با حضور عوامل تحت بررسی یعنی عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از خاک به عنوان متغیر

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]
[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

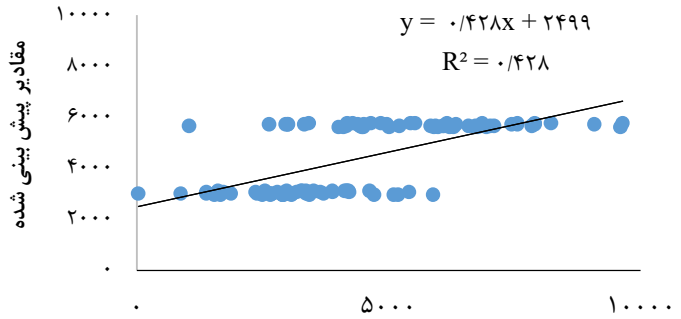
مستقل و میزان ترسیب کربن موجود در خاک به عنوان متغیر وابسته در جدول زیر ارائه گردیده است. در این معادله، عمق نمونه‌برداری به صورت اعداد ۱ و ۲ به ترتیب در خصوص عمق‌های ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر در کمیت (Depth) D و طبقه‌های ارتفاعی به صورت اعداد ۱ الی ۴ در کمیت (Height) H لحاظ گردیده است.

جدول ۲: معادله رگرسیونی و نتایج اعتبارسنجی آن

پارامتر	مدل رگرسیونی	ضریب تعیین (R^2)
ترسیب کربن	$Y = \{ ۲۶۶۸۰/۶۸۹ + ۲۶۵۰۱۷/۶۶۱\ D + ۵۰۷۳/۲۲۴\ H\}/۱۰۰$	۰/۴۲۸

در روابط فوق، D : عمق (۱ و ۲) و H: طبقه ارتفاع نمونه‌برداری (۱ الی ۴)

ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به کمک مدل رگرسیونی در خصوص ترسیب کربن خاک در شکل زیر ارائه گردیده است (شکل ۳). همانگونه که ملاحظه می‌گردد، ضریب تعیین (R^2) میان دو سری داده، ۰/۴۲۸ است که عدد بزرگی نیست و بیانگر عدم دقت بالای مدل رگرسیونی در پیش‌بینی میزان ترسیب کربن خاک باتوجه به عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از خاک است.



شکل ۳: ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی در خصوص میزان ترسیب کربن خاک (گرم بر متر مربع)

نتایج روش سطح پاسخ

ضرورت استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) در این پژوهش، بررسی قابلیت این روش جدید در پیش‌بینی و بهینه‌سازی میزان ترسیب کربن در مراتع تحت پارامترهای مؤثر من جمله عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از سطح دریا است. نتایج خروجی روش سطح پاسخ در خصوص ارائه مدل‌های خطی و درجه دوم که بیانگر تأثیر پارامترهای ورودی (عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از خاک) بر خروجی مدل (ترسیب کربن خاک) است، در جداول (۳، ۴ و ۵) ارائه شده است. در جدول (۳) نتایج مربوط به تجزیه واریانس مدل خطی، در جدول (۴) ضرایب تعیین قطعی، تطبیقی و پیش‌بینی شده و سایر کمیت‌های آماری و در جدول۵ ضرایب تخمین ارتفاع و عمق در معادله پیش‌بینی را مشاهده می‌فرمایید. منظور از معنی‌دار بودن مدل خطی روش سطح پاسخ مندرج در جدول(۳) این است که چندین مدل خطی به منظور پیش‌بینی مقادیر خروجی ارائه می‌گردد و اثر این مدل‌ها بر خروجی، معنی‌دار است. برای مدل، درجه آزادی ۲ درج شده که نشان می‌دهد ۳ مدل خطی با تفاوت معنی‌دار در خروجی توسط نرم‌افزار ارائه شده است.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

جدول ۳: تجزیه واریانس مدل خطی ارائه شده توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت بخش روش سطح پاسخ

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	P	معنی داری
مدل	۳/۲۷۷ ×۱۰^{۹}	۲	۱/۶۳۹ ×۱۰^{۹}	۹/۰۵	۰/۰۰۴	معنی دار است
ارتفاع	۶/۶۱۸ ×۱۰^{۸}	۱	۶/۶۱۸ ×۱۰^{۸}	۳/۶۶	۰/۰۸	
عمق	۲/۴۹۲ ×۱۰^{۹}	۱	۲/۴۹۲ ×۱۰^{۹}	۱۳/۷۶	۰/۰۰۳	
باقیمانده	۲/۱۷۲ ×۱۰^{۹}	۱۲	۱/۸۱۰ ×۱۰^{۸}			
کاهش تناسب	۱/۸۰۸ ×۱۰^{۹}	۷	۲/۵۸۳ ×۱۰^{۹}	۳/۵۵	۰/۰۹۱۱	معنی دار نیست
خطای خالص	۳/۶۴۱ ×۱۰^{۸}	۵	۷/۲۸۲ ×۱۰^{۷}			
خطای تصحیح شده	۵/۴۵۰ ×۱۰^{۹}	۱۴				

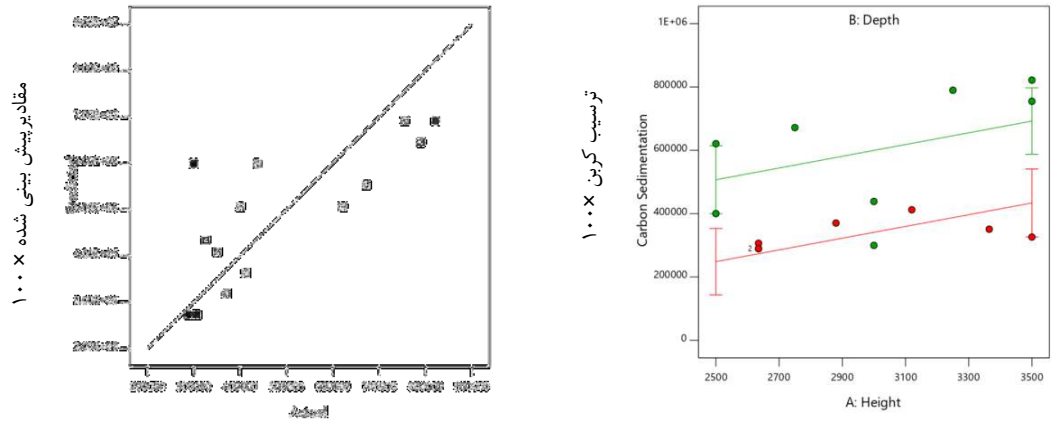
جدول ۴: ضرایب تعیین قطعی، تطبیقی و پیش‌بینی شده توسط روش سطح پاسخ

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
انحراف معیار	۱/۳۴۵ ×۱۰^{۳}	ضریب تعیین	۰/۶۰۱۴
میانگین	۴/۷۶۱ ×۱۰^{۳}	ضریب تعیین تطبیقی	۰/۵۳۴۹
ضریب تغییرات (درصد)	۲۸/۲۶	ضریب تعیین پیش‌بینی شده	۰/۴۱۳۹
		کفایت دقت	۶/۹۶۰۳

جدول ۵: ضرایب تخمین ارتفاع و عمق در معادله پیش‌بینی به دست آمده توسط روش سطح پاسخ

پارامتر	ضریب تخمین	درجه آزادی	خطای معیار
ارتفاع × عمق	۴/۷۰۴ ×۱۰^{۳}	۱	۳۴۸۵۴/۲۵
ارتفاع	۹۲۶۰۷/۵۱	۱	۴۸۴۳۶/۰۵
عمق	۱/۲۹۳ ×۱۰^{۳}	۱	۳۴۸۵۴/۲۵

با در نظر گرفتن ضرایب تخمین به دست آمده در جدول (۵)، تمامی مقادیر پیش‌بینی شده با توجه به ورودی‌های مرتبط در یک نمودار (شکل ۴- الف) رسم شدند. به علاوه، همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در خصوص میزان ترسیب کربن موجود در خاک مراتع (شکل ۴- ب) ارائه گردیده است.



شکل ۴: (الف) مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل خطی با توجه به ورودی ها (در این شکل، مقادیر قرمز و سبز رنگ به ترتیب مربوط به عمق اول و دوم می‌باشند) و (ب) همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل خطی در خصوص میزان ترسیب کربن موجود در خاک مراتع

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

همانگونه که ملاحظه می‌گردد با وجود بالاتر بودن ضریب تعیین مدل خطی روش سطح پاسخ نسبت به مدل رگرسیون، این مدل خطی خیلی دقیق نیست. بنابراین سراغ مدل درجه دوم رفتیم تا دقت آن را بیابیم. نتایج مربوط به تجزیه واریانس مدل درجه دوم، ضرایب تعیین قطعی، تطبیقی و پیش‌بینی شده و مقدار ثابت به همراه ضرایب ارتفاع، عمق و ترکیبات آن‌ها در معادله پیش‌بینی را به ترتیب در جداول (۶، ۷ و ۸) مشاهده می‌فرمایید.

جدول ۶: تجزیه واریانس مدل درجه دوم ارائه شده توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت بخش روش سطح پاسخ

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	P	معنی داری
مدل	۴/۰۱۳ ×۱۰^{۹}	۵	۸/۰۲۵ ×۱۰^{۸}	۵/۰۳	۰/۰۱۷۹	معنی دار است
ارتفاع	۶/۰۱۹ ×۱۰^{۸}	۱	۶/۰۱۹ ×۱۰^{۸}	۳/۷۷	۰/۰۸۴۱	
عمق	۱/۴۴۲ ×۱۰^{۸}	۱	۱/۴۴۲ ×۱۰^{۸}	۰/۹۰۲۹	۰/۳۶۶۸	
ارتفاع × عمق	۱/۳۹۵ ×۱۰^{۸}	۱	۱/۳۹۵ ×۱۰^{۸}	۰/۸۷۳۳	۰/۳۷۴۴	
ارتفاع^{۲}	۷/۶۶۷ ×۱۰^{۶}	۱	۷/۶۶۷ ×۱۰^{۶}	۰/۰۴۸۰	۰/۸۳۱۴	
ارتفاع^{۲} × عمق	۳/۵۴۸ ×۱۰^{۸}	۱	۳/۵۴۸ ×۱۰^{۸}	۲/۲۲	۰/۱۷۰۲	
باقیمانده	۱/۴۳۷ ×۱۰^{۹}	۹	۱/۵۹۷ ×۱۰^{۸}			
کاهش تناسب	۱/۰۷۳ ×۱۰^{۹}	۴	۲/۶۸۳ ×۱۰^{۸}	۳/۶۸	۰/۰۹۲۶	معنی دار نیست
خطای خالص	۳/۶۴۱ ×۱۰^{۸}	۵	۷/۲۸۲ ×۱۰^{۷}			
خطای تصحیح شده	۵/۴۵۰ ×۱۰^{۹}	۱۴				

جدول ۷: ضرایب تعیین قطعی، تطبیقی و پیش‌بینی شده توسط روش سطح پاسخ

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
انحراف معیار	۱/۲۶۴ ×۱۰^{۳}	ضریب تعیین	۰/۷۳۶۳
میانگین	۴/۷۶۱ ×۱۰^{۳}	ضریب تعیین تطبیقی	۰/۵۸۹۸
ضریب تغییرات (درصد)	۲۶/۵۴	ضریب تعیین پیش‌بینی شده	۰/۴۰۶۲
		کفایت دقت	۶/۴۳۲۷

جدول ۸: ضرایب تخمین ارتفاع و عمق در معادله پیش‌بینی به دست آمده توسط روش سطح پاسخ

پارامتر	ضریب تخمین	درجه آزادی	خطای معیار
ارتفاع × عمق	۴/۵۰۸ ×۱۰^{۳}	۱	۵۸۴۰۹/۳۲
ارتفاع	۹۲۱۸۷/۴۳	۱	۴۷۴۸۶/۰۸
عمق	۵۵۵۰۱/۲۲	۱	۵۸۴۰۹/۳۲
ارتفاع × عمق	۴۴۳۷۵/۴۲	۱	۴۷۴۸۶/۰۸
ارتفاع^{۲}	۲۱۲۶۱/۸۷	۱	۹۷۰۳۴/۹۴
ارتفاع^{۲} × عمق	۱/۴۴۶ ×۱۰^{۳}	۱	۹۷۰۳۴/۹۴

با در نظر گرفتن ضرایب تخمین به دست آمده در جدول (۸)، تمامی مقادیر پیش‌بینی شده با توجه به ورودی‌های مرتبط در یک نمودار (شکل ۵- الف) رسم شدند. به علاوه، همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در خصوص میزان ترسیب کربن موجود در خاک مراتع (شکل ۵- ب) ارائه گردیده است.

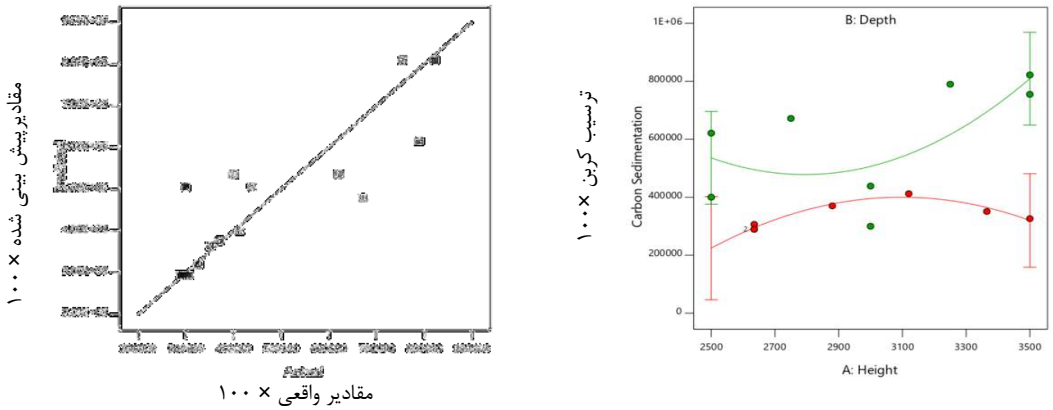
نتایج بهینه‌سازی توسط روش سطح پاسخ

حل کردن معادله رگرسیونی به کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت منجربه یافتن مقادیر بهینه در ورودی‌ها برای داشتن بهترین خروجی خواهد شد. در این تحقیق ورودی‌ها شامل عمق و ارتفاع نمونه‌برداری و خروجی شامل کربن ترسیب شده در خاک مراتع است. این مقادیر بهینه در جدول (۹) ارائه شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، عمق دوم (۳۰-۱۵ سانتی متری) و ارتفاع ۳۵۰۰ متری، بهینه‌ترین بوده و مقدار ترسیب کربن در این حالت حدوداً ۸۰۸۸/۱۱ گرم بر متر مربع است. همچنین نمودارهای مربوط به نحوه یافتن مقادیر بهینه توسط نرم‌افزار نیز در شکل (۶) ارائه گردیده است. این نمودارها بیان می‌کنند که چگونه ارتفاع ۳۵۰۰ متری و عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر به عنوان مقادیر بهینه، انتخاب شده‌اند. میزان بالای رضایتمندی (۰/۹۷۶) درج شده در جدول زیر بیانگر دقت بالای بهینه‌سازی است. همانگونه که در این جدول ملاحظه

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

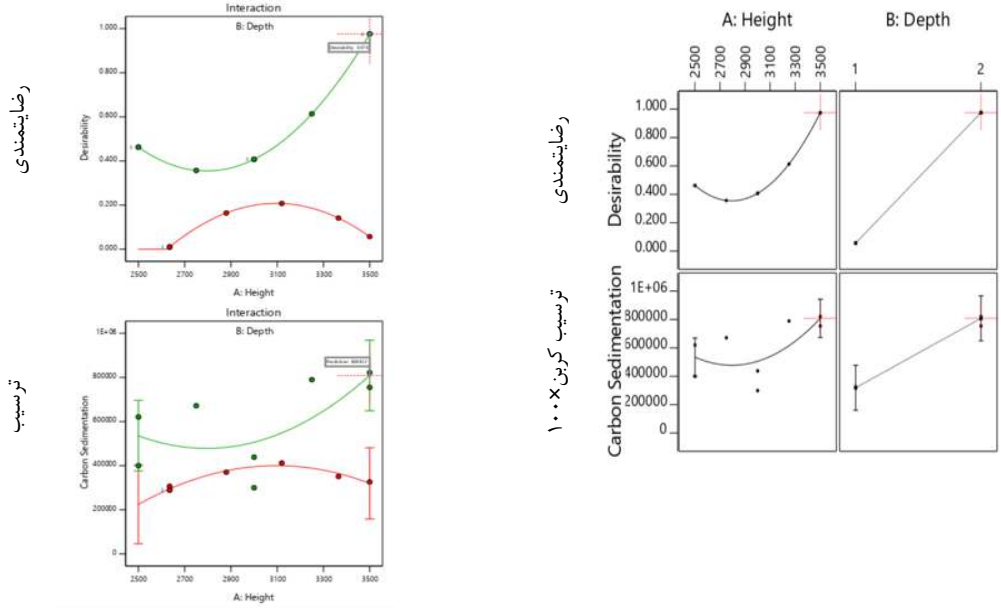
می‌گردد، سایر بهینه‌سازی‌ها، رضایتمندی کمتری داشته و در نتیجه بهینه‌سازی با بیشترین رضایتمندی به عنوان بهترین بهینه‌سازی انتخاب گردید.



شکل ۵: (الف) مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل درجه دوم با توجه به ورودی ها (در این شکل، مقادیر قرمز و سبز رنگ به ترتیب مربوط به عمق اول و دوم می‌باشند) و (ب) همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل درجه دوم در خصوص میزان ترسیب کربن موجود در خاک مراتع

جدول ۹: نتایج بهینه سازی حاصل از روش سطح پاسخ

شماره مدل بهینه	ارتفاع	عمق	ترسیب کربن	رضایتمندی	نتیجه
۱	**۳۵۰۰**	**۲**	**۸۰۸۸/۱۱۶۹**	**۰/۹۷۶**	**انتخاب شد**
۲	۲۵۰۰	۲	۵۳۵۶/۸۶	۰/۴۶۳	
۳	۳۰۹۶/۹۶۱	۱	۳۹۹۹/۷۳۷۵	۰/۲۰۸	



شکل ۶: نحوه بهینه سازی متغیرهای ورودی و مقدار خروجی متناظر با آنها توسط روش سطح پاسخ

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی قابلیت تکنیک روش سطح پاسخ (RSM) به منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی میزان ترسیب کربن خاک تحت اثر عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از خاک در مراتع کوه دماوند در استان مازندران اجرا شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان ترسیب کربن نشان داد که 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 ندارد. این نتیجه با نتایج تمرتاش و همکاران (۲۰۱۲)، صارمی و همکاران (۲۰۱۵) و شیدای کرکج و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد. همچنین با نتایج جلیلوند و همکاران (۲۰۱۵) و سرکار و همکاران (۲۰۲۰) 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 فوق الذکر به‌دلیل انفصال (فاصله ارتفاعی میان طبقه‌های) ارتفاعی است. در واقع طبقه‌های ارتفاعی تعریف شده در تحقیق حاضر پیوسته نیستند و میان آن‌ها به دلیل نوع پوشش منطقه نمونه‌برداری و ... یک فاصله ارتفاعی وجود دارد.

مدل‌های خطی و درجه دوم پیشنهادی توسط روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی میزان ترسیب کربن خاک مراتع، مقادیر تحت شرایط ورودی‌های تحت بررسی (عمق و ارتفاع نمونه‌برداری از خاک) را با دقت بالاتری نسبت به مدل رگرسیونی پیش‌بینی نمودند. مدل‌های رگرسیونی، خطی و درجه دوم روش سطح پاسخ به ترتیب ضرایب تعیین برابر با ۰/۴۲، ۰/۶ و ۰/۷۳ دارند که بیانگر پیش‌بینی دقیق‌تر توسط مدل‌های روش سطح پاسخ است. به علاوه در میان مدل‌های ارائه شده توسط روش سطح پاسخ، مدل درجه دوم با داشتن ضریب تعیین بالاتر، مقادیر ترسیب کربن موجود در خاک مراتع را بهتر پیش‌بینی نموده است.

همانگونه که قبلاً نیز ذکر گردید تاکنون از روش سطح پاسخ در پیش‌بینی پارامترهای مرتبط با مراتع استفاده نشده است بنابراین مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات قبلی در این رابطه مقدور نیست اما هرکجا که روش سطح پاسخ به منظور پیش‌بینی استفاده شده است، از رگرسیون عملکرد بهتری داشته است و در حالت کلی مدل‌های کامپیوتری از رگرسیون بهتر پیش‌بینی نموده‌اند. در همین راستا، نتایج تحقیق بهرامی و همکاران (۲۰۱۳) در برآورد کربن آلی ذره‌ای خاک با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی (انفیس) و رگرسیون چند متغیره همچنین مقیمی و همکاران (۲۰۱۵) به منظور برآورد کربن آلی خاک با دو روش رگرسیون چند متغیره و شبکه عصبی مصنوعی بیان کردند که مدل‌های کامپیوتری مذکور با توجه به ضریب تعیین بالاتر با داده‌های واقعی و خطای کمتر نسبت به مدل رگرسیونی دارای دقت و صحت بالاتری هستند.

عملکرد بهتر روش سطح پاسخ در مقایسه با روش 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 به شدت از حجم نمونه‌ها تبعیت می‌کند و حجم کم نمونه‌ها می‌تواند عامل محدودیت در چنین مدل‌های آماری گردد (۹ و ۱۰). در پژوهش‌های قبلی، عموماً ضریب تعیین مدل روش سطح پاسخ بیشتر از ۹۰ درصد گزارش شده است که با نتایج تحقیق حاضر با ضریب تعیین بیشینه ۷۳ درصد همخوانی ندارد. علت این اختلاف به این امر باز می‌گردد که در تحقیق حاضر، طبقه ارتفاعی، تعریف شده و فاصله بین ارتفاع‌ها در طبقات مختلف، متفاوت است چون تصادفی هستند و فقط تعداد آن‌ها در هر طبقه برابر است. عموماً پیش‌بینی‌های با ضریب تعیین بالا در شرایطی حاصل می‌گردد که سطوح ورودی‌ها، مشخص و ثابت باشد که در این پژوهش حادث نگردید و ضریب تعیین پایین میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در خصوص روش سطح پاسخ و رگرسیون توجیه می‌گردد. در درون روش سطح پاسخ نیز مدل درجه دوم نسبت به مدل خطی، ضریب تعیین بالاتری را ارائه می‌نماید. تکنیک روش سطح پاسخ (RSM) نه‌تنها در پیش‌بینی میزان ترسیب کربن خاک مراتع تحت شرایط عمق و ارتفاع نمونه‌برداری متفاوت عملکرد مطلوبی دارد، بلکه می‌توان از آن به عنوان ابزاری هوشمند در جهت پیش‌بینی پارامترهای مختلف در علوم مرتع و مراتع تحت بررسی به عنوان مثال در پیش‌بینی حجم زیست توده زیرزمینی و روزمینی، نحوه پراکنش گونه‌های مرتعی و ... استفاده نمود.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

نتایج پژوهش حاضر مؤید این نکته است که کارکرد اکوسیستم مرتع از نظر تنظیم گازها که پیامدهای غیرمحلی و یا حتی غیرملی را در پی داشته و فواید ناشی از حفظ اکوسیستم‌های مرتعی که با تنظیم گازهای حیاتی و جلوگیری از مشکلات مربوط به گرم‌شدن کره زمین و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای سر و کار دارد، دارای ابعاد بین المللی بوده و مستلزم مطالعات فراوان و اطلاع‌رسانی جمعی در این خصوص است. مثلاً در راستای افزایش آگاهی روستائیان و بهره‌برداران می‌توان به بررسی میزان و سرعت پیشروی تغییر کاربری اراضی مرتعی به همراه مدل‌سازی کامپیوتری و پیش‌بینی میزان تغییر کاربری در آینده پرداخت. به علاوه، ارائه راهکارهای بازدارنده مانند آگاهی بخشیدن به مرتعداران، دامداران، کشاورزان و سایر بهره‌برداران اراضی کشاورزی و منابع طبیعی در خصوص اهمیت حفظ کاربری اراضی و عدم تغییر کاربری، تصویب قوانین سختگیرانه در خصوص مجازات عاملان تغییر کاربری اراضی و خریداران و فروشندگان این اراضی و .... اعمال گردد. به علاوه، امروزه اندازه‌گیری و برآورد ترسیب کربن به عنوان یک خدمت تنظیم اقلیم و ارزیابی پتانسیل آنها در به دام انداختن و نگهداشت کربن اتمسفری با توجه به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی اکسیدکربن اهمیت بسزایی در فرآیندهای مدیریتی برای برنامه‌ریزی هدفمند و توسعه محور در اکوسیستم‌های طبیعی دارد. روند افزایشی انتشار گازهای گلخانه‌ای موجبات افزایش گرمایش کرۀ زمین و تغییرات اقلیمی را مهیا کرده است و از آنجا که زیست توده جنگلی و مرتعی بخش اعظمی از ذخیره کربن در بوم نظام‌های خشکی را به خود اختصاص می‌دهد، نباید از اهمیت مدیریت و بهره‌برداری از اراضی جنگلی و پوشش‌های گیاهی طبیعی و خودرو غافل بود. مناطق مرتعی و جنگلی البرز شمالی به عنوان بخش بزرگی از پوشش ایران نقشی مهم در ترسیب کربن دارد و می‌توان اظهار کرد که هزینۀ محیط زیستی تغییر کاربری اراضی/پوشش گیاهی در جهت منافع اقتصادی بهره‌برداری از سرزمین با کاهش عرضۀ خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن همراه بوده است.

References

1. Abdi, N., H. Maddah Arefi & Gh. Zahedi Amiri, 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).
2. Anderson, D.W., S. Saggar., J.R. Bettany & J.W.B. Stewart, 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.
3. Askari, M., Y. Abbaspour-Gilandeh, E. Taghinezhad, A.M. El Shal, R. Hegazy & M. Okasha, 2021. Applying the Response Surface Methodology (RSM) Approach to Predict the Tractive Performance of an Agricultural Tractor during Semi-Deep Tillage. Agriculture, 11: 1043, 1-14.
4. Azarnivand, H., H. Joneidi., M.A. Zare Chahooki & H. Maddah Arefi, 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).
5. Bahrami, B., G.A. Dianati Tilaki, S.K. Beigi, S. Janizadeh & J. Moetamedi, 2013. Evaluation of Artificial Neural Network (ANN), Adative Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and Regression Models in Prediction of Particulate Organic Matter-Carbon (POM-C) in the Rangelands Kharabe Sanji of Urmia. Operational Researches about Soil, 1(1): 94-106.
6. Bas, D., H. Boyaci & H. Smail, 2007. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. Journal of Food Engineering, 78(3): 836-845.
7. Bayat, M., H. Arzani, A. Jalili & H. Ghalij Nia, 2018. The effect of climatic factors on canopy cover and range forage production in semi-steppe rangelands (Case Study: Polur and Rineh-Mazandaran province, 71(2): 367-378.
8. Brahim, N., D. Blavet, T. Gallali & M. Bernoux, 2011. Application of structural equation modeling for assessing relationships between organic carbon and soil properties in semiarid Mediterranean region. International Journal of Environment Science Technology, 8(2): 305-320.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]

9. Ghorbani, Zh., K. Sefidi, F. Keivan Behjo, M. Moameri & A. Soltanitolarod, 2016. The effect of different intensities of grazing on soil physical and chemical properties in southeastern rangelands of Sabalan. Journal of Rangeland, 9(4): 353-366.
10. Ghorbani, Zh., K. Sefidi, F. Keivan Behjo, M. Moameri & A. Soltanitolarod, 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.
11. Hasanvand H., M. Azimi, H. Niknahad Ghermakher & G. Rahbar, 2020. Quantifying of carbon sequestration for the ecosystem by dominant species in Tilabad rangelands, Golestan province. Journal of Rangeland, 14(4): 673-684.
12. Homann, P.S., J.S. Kapchinske & A. Boyce, 2007. Relations of mineral-soil C and N to climate and texture: regional differences within the conterminous USA. Biogeochemistry, 85(3): 303-316.
13. Iranmanesh, M & H. Sadeghi, 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.
14. Jafarian, Z & L. Tayefeh Seyyed Alikhani, 2013. Carbon Sequestration Potential in Dry Farmed wheat in Kiasar Region. Agricultural scince and sustainable development, 23(1): 31-41.
15. Jafarian, Z., L. Tayefeh Seyyed Alikhani & R. Tamartash, 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.
16. Jalilvand, H., Z. Jafarian & M. Yousefi, 2015. The effect of forest planting of wide and narrow leafs on the amount of soil carbon reservoir in Berenjestanak Forest at Mazandaran province. Iran natural resources, 68(2): 179-190.
17. Kargozari, M., S. Moini & Z. Emam Djomeh, 2010. Prediction of some physical properties of osmodehydratied carrot cubes using response surface methodology. Journal of Food Processing and Preservation, 34(2): 1041-1063.
18. Kohestani, N., S. Rastgar, G. Heydari, S. Shetaee Jouibary & H. Amirnejad, 2021. Monitoring the spatial distribution of soil carbon sequestration for four decades based on changes in rangeland vegetation conditions (Case study: Noorrud watershed in Mazandaran province). Journal of Rangeland, 15(2): 344-356.
19. Moghimi, S., Y. Parvizi, M.H. Mahdian & M.H. Masihabadi, 2015. Comparison of applying multi- linear regression analysis and artificial neural network methods for simulating topographic factors effect on soil organic carbon. Journal of Watershed Engineering and Management, 6(4): 312-322. (In Persian).
20. Motamedi, J., Sh. Ebrahimi & E. Sheidai Karkaj, 2020. The relation of sequestrated carbon at Astragalus brachyanus with plant charactristics and rangeland management (Razhan, West Azarbaijan). Journal of Range and Watershed Management, 73(2): 423-438. (In Persian).
21. Salar, M. R & S. H. Karparvardfar, 2017. Modeling and Optimization of Wing Geometry Effect on Draft and Vertical Forces of Winged Chisel Plow. Journal of Agricultural Machinery, 7(2): 468-479. (In Persian).
22. Saremi, M., E. Rouhi Moghaddam & A. Fakhireh, 2015. The effect of Rangeland Management on the amount of Carbon Sequestration of mountain Gavan (*Astragalus peristerus*) at Fasham Rangelands (Tehran Province). Knowing the environment, 41(1): 193-199. (In Farsi).
23. Sarkar, R., V. Corriher-Olson, C. Long & A. Somenahally, 2020. Challenges and Potentials for Soil Organic Carbon Sequestration in Forage and Grazing Systems. Rangeland Ecology and Management, doi:https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.04.002
24. Sheidai Karkaj, E., A. Sepehri., H. Barani & J. Motamedi, 2017. The relationship between soil organic carbon reservoir and some soil charestristics in East azarbaijan rangeland. Journal of Rangeland, 11(2): 125-138.
25. Sheidai Karkaj, E & J. Motamedi, 2020. The relation of operation diversity and plant taxonomic with the soil sequestrated carbon at mountain rangelands of Nazloochai, West Azarbaijan. Journal of Rangeland, 14(4): 715-730. (In Persian)
26. Tamartash, R., M. R. Tatian & M. Yousefian, 2012. The effect of different plants type on the Carbon sequestration of Miankale Plain Rangelands. Knowing the Environment, 62(2): 45-54. (In Farsi).
27. Wang. Sh., X. Wang & Zh. Ouyang, 2012. Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the UpstreamWatershed of Miyun Reservoir, North China. Journal of Environmental Sciences, 24(3): 387-395.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-08-22]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.2.2.3]