مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هفدهم، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۴۰۴
ص ۳۶۳-۳۴۷
*مقاله پژوهشی*

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2025.471597.2000
CC BY 4.0

# مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی در جنگل‌های هیرکانی

**علی فقیه عبدالهی[۱]، سید محمد حجتی[۲و۳*]، حامد اسدی[۴] و محیا تفضلی[۴]**

[۱]دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری
[۲]استاد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری
[۳]پژوهشگر میهمان، گروه جنگلشناسی و بوم‌شناسی جنگل‌های مناطق معتدله، دانشگاه گوتینگن، گوتینگن، آلمان
[۴]استادیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵)

## چکیده

**مقدمه:** جنگل‌ها از بوم‌سازگان‌های حیاتی کرهٔ زمین هستند و کارکرد مهمی در جذب و ذخیرهٔ کربن دارند و از این نظر به تعدیل تغییرات اقلیمی و حفظ تعادل زیست‌محیطی کمک می‌کنند. بنابراین شناخت تغییرات ذخیرهٔ کربن روی زمینی در ارتباط با عوامل محیطی و رویشگاهی در بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌دلیل ارائهٔ پیش‌بینی مناسب از واکنش تغییرات کربن در سطح منطقه‌ای و جهانی حائز اهمیت است. همچنین آگاهی از تغییرات ذخیرهٔ کربن روی زمینی، در تدوین برنامه‌های حفاظت، احیا و توسعهٔ منابع جنگلی کاربرد دارد. با این‌حال، پژوهش‌ها در خصوص عوامل مؤثر بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی در جنگل‌های هیرکانی محدود و پراکنده بوده و در سطوح کوچک انجام گرفته است. بنابراین هدف پژوهش حاضر، تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی در کل جنگل‌های هیرکانی است.

**مواد و روش‌ها:** این پژوهش در سراسر جنگل‌های هیرکانی شمال کشور انجام گرفت. به این منظور از بانک داده‌های آماربرداری جنگل‌های شمال کشور استفاده شد (اطلاعات موجود شامل موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت، قطر و نوع گونه برای هر قطعه نمونه است). داده‌های هواشناسی شامل مقدار بارش و دما از پروژه POWER مربوط به سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحدهٔ آمریکا (NASA Power) تهیه شد. داده‌های خاک (چگالی ظاهری، درصد شن، سیلت و رس، اسیدیته، درصد نیتروژن و کربن آلی) نیز برای هر قطعه نمونه از بانک جهانی SoilGrids 2.0 تهیه شد. برای محاسبه ذخیرهٔ کربن روی زمینی، ابتدا زی‌تودهٔ روی زمینی با استفاده از مدل آلومتریک جنگل‌های شمال کشور و سپس مقدار ذخیرهٔ کربن با احتساب ضریب ۰/۴۷ درصد مقدار زی‌توده محاسبه شد. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته و روش ارزیابی متقابل بلوکی در نرم‌افزار R و بسته‌های blockcv و caret انجام گرفت. در ادامه اهمیت نسبی متغیرهای اثرگذار بر ذخیرهٔ کربن روی زمین محاسبه شد. برای تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی ذخیرهٔ کربن در جنگل‌های شمال کشور از بستهٔ raster در نرم‌افزار R استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج مدل خطی تعمیم‌یافته نشان داد که این مدل، ارزیابی متوسط (ضریب تبیین: ۰/۰۹ ± ۰/۳۱) برای پیش‌بینی مقدار زی‌تودهٔ روی زمینی درختان در جنگل‌های هیرکانی داشت. نتایج بررسی ضرایب مدل نشان داد که متغیرهای درصد شیب، دمای هوا، درصد سیلت و نیتروژن خاک رابطهٔ مثبت و معنی‌داری با ذخیرهٔ کربن روی زمینی و متغیرهای مقدار بارش، چگالی ظاهری و درصد شن رابطهٔ منفی و معنی‌داری با ذخیرهٔ کربن روی زمینی داشتند. نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان داد که چگالی ظاهری، درصد نیتروژن و سیلت خاک، مهم‌ترین متغیرها در پیش‌بینی ذخیرهٔ کربن روی زمینی در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته هستند. براساس نقشهٔ پهنه‌بندی، مقدار ذخیرهٔ کربن روی زمینی در قسمت‌های مرکزی (غرب استان مازندران) بیشتر از بقیهٔ نقاط بود.

**نتیجه‌گیری:** بررسی تغییرات مکانی در زی‌توده و ذخیرهٔ کربن می‌تواند به اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی کمک کند. مناطق مرکزی با زی‌توده و ذخیرهٔ کربن بیشتر باید برای حفظ قابلیت‌های ذخیرهٔ کربن محافظت شوند. در مناطقی با زی‌توده و ذخیرهٔ کربن کم، شیوه‌های مدیریت پایدار جنگل، مانند جنگلکاری و مدیریت خاک، می‌تواند به بهبود ساختار خاک و در دسترس بودن مواد مغذی کمک کند و در نتیجه پتانسیل جذب کربن را افزایش دهد. به‌طور کلی حفاظت و مدیریت جنگل‌های هیرکانی می‌تواند در اقدامات مدیریتی برای ذخیرهٔ کربن در سطوح منطقه‌ای و ملی بسیار کمک‌کننده باشد. با توجه به اهمیت موضوع، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده نقش عوامل انسانی و محیطی مؤثر بر تغییرات زی‌تودهٔ روی زمینی به‌صورت جامع‌تر در نظر گرفته شود.

**واژه‌های کلیدی:** ترسیب کربن، خصوصیات خاک، زی‌تودهٔ درختی، عوامل توپوگرافی، مدل خطی تعمیم‌یافته.

*نویسندهٔ مسئول
شمارهٔ تماس: ۰۱۱۳۳۸۸۵۴۱۱
ایمیل: s_m_hodjati@yahoo.com

**مقدمه**

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در گرم شدن کرهٔ زمین، پدیدهٔ انتشار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای است (Osabohien et al., 2019). گاز دی‌اکسید کربن به‌دلیل تجمع زیاد در اتمسفر، از عوامل مهم پدیدهٔ گرمایش جهانی در زمین شناخته می‌شود. مصرف فزایندهٔ سوخت‌های فسیلی و جنگل‌زدایی از عواملی است که به افزایش دی‌اکسید کربن جو کمک می‌کند (Srivastava et al., 2012). کاهش غلظت کربن و به دام‌اندازی آن به‌کمک روش‌های مصنوعی مانند فیلترها، پرهزینه است (Cannell et al., 2003). از این‌رو برای کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفر و رسیدن به تعادل در محتوای گازهای گلخانه‌ای، کربن اتمسفر باید به اشکال مختلف جذب و جدا شود. در این میان ذخیرهٔ کربن در زی‌تودهٔ گیاهی و خاک‌های زیر آن، ساده‌ترین و از نظر اقتصادی، ارزان‌ترین راه‌حل برای کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفر است (Sheikh et al., 2009).

جنگل‌ها کربن را از طریق فتوسنتز در زی‌توده ذخیره می‌کنند و اهمیت زیادی در چرخهٔ جهانی کربن دارند. براساس منابع موجود، کربن ذخیره‌شده در زی‌تودهٔ جنگل بیش از ۸۰ درصد کربن در بوم‌سازگان زمینی است و بنابراین تغییر وضعیت ساختاری و رویشگاهی جنگل می‌تواند سبب تغییرات زیادی در مقدار کل کربن ذخیره‌شده شود. در این زمینه، بررسی مقدار زی‌توده و ذخیرهٔ کربن روی زمینی جنگل، شاخصی برای ارزیابی بهره‌وری و سلامت بوم‌سازگان جنگل و همچنین تعیین پتانسیل ذخیرهٔ کربن است (Baccini et al., 2017; Rodríguez-Soalleiro et al., 2018; Javanmiri Pour et al., 2024; Akhavan et al., 2025). ارزیابی زی‌توده و ذخیرهٔ کربن روی زمینی در جنگل کمک می‌کند که تغییرات مکانی و زمانی منبع و ذخیره‌گاه کربن جنگل و مقدار آن در زمینهٔ تغییرات جهانی آینده بهتر درک شود. تغییرات ذخیرهٔ کربن در جنگل ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های محیطی دارد، بنابراین شناخت تغییرات ذخیرهٔ کربن روی زمینی در ارتباط با عوامل محیطی و رویشگاهی به‌دلیل ارائهٔ پیش‌بینی مناسب واکنش توازن کربن در سطح منطقه‌ای و جهانی حائز اهمیت است و در تدوین برنامه‌های حفاظت، احیا و توسعهٔ منابع جنگلی کاربرد دارد.

به‌طور کلی تغییرات ذخیرهٔ کربن در جنگل‌ها ارتباط نزدیکی با عوامل محیطی مانند بارش، دما و همچنین خصوصیات خاک دارد (Hojjati & Lamersdorf, 2010; Fang et al., 2012; Poorter & van der Sande, 2017). به‌ویژه تغییرات بارندگی که اغلب بر رطوبت و pH خاک و در نتیجه بر مقدار پتانسیل آب و سرعت رشد درختان تأثیر می‌گذارد. با این‌حال، ذخیرهٔ کربن درخت در درجهٔ اول تحت تأثیر افزایش دما است (Li et al., 2022). تغییرات دما اغلب بر کارایی فتوسنتزی و رشد و رویش درختان اثرگذار است. افزون‌بر این، افزایش دما می‌تواند فصل رشد را طولانی‌تر کند که به افزایش زی‌توده و در نهایت ذخیرهٔ کربن می‌انجامد (Zobayed & Afreen, 2005). از سوی دیگر، تغییرات دما از طریق تأثیر بر دمای خاک بر سرعت تجزیهٔ مواد آلی در خاک و همراه با تغییر در رطوبت خاک (Geng et al., 2017)، بر زی‌توده و در نتیجه ذخیرهٔ کربن جنگل تأثیر می‌گذارد. همچنین عوامل توپوگرافی (شیب، جهت، ارتفاع) از طریق تأثیر مستقیم بر تابش و رطوبت، بر زی‌توده و ذخیرهٔ کربن در جنگل مؤثر است. بنابراین متغیرهای محیطی عوامل مهمی‌اند که باید در تحلیل ذخایر کربن جنگل در مقیاس ملی و منطقه‌ای در نظر گرفته شوند.

با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش‌های زیادی دربارهٔ تغییرات کربن در بوم‌سازگان‌های جنگلی در مقیاس بزرگ انجام گرفته است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که در مقیاس جهانی، تنوع اقلیم و توپوگرافی به ترتیب دو عامل اصلی کنترل‌کنندهٔ مقدار کربن آلی و سرعت چرخهٔ آن در یک منطقه مشخص است (Xu et al., 2015; Wang et al., 2019; Wang et al., 2022). خصوصیات مختلف توپوگرافی با تأثیر بر مقدار بارش و درجهٔ حرارت و نیز مقدار نور دریافتی و رطوبت نسبی از

عوامل اصلی بروز اختلاف در بوم‌سازگان است و بنابراین در پژوهش‌ها از دیرباز عاملی مهم و شناخته‌شده بوده است (Körner et al., 2017; Naderi et al., 2021). از میان خصوصیات مختلف توپوگرافی، ارتفاع از سطح دریا اثر مهمی در پاسخ عملکردهای زیستی و ترکیب پوشش گیاهی و در نتیجه بر مقدار ترسیب و ذخیرهٔ کربن روی زمینی دارد (Kumar et al., 2013; Naderi et al., 2021). پژوهش‌های داخلی اغلب در زمینهٔ محاسبهٔ مقادیر زی‌تودهٔ روی زمینی (Mohammadi et al., 2017; Amiri & Mohammadi 2021; Ghanbari et al., 2021; Hojjati et al., 2023a) و ترسیب کربن خاک و همچنین شناسایی عوامل مؤثر بر ترسیب کربن خاک بوده است (Alazmani et al., 2021; Hojjati et al., 2022; Hojjati et al., 2023b; Saeidi et al., 2023).

به‌طور کلی جنگل‌ها، به‌منزلهٔ یکی از بوم‌سازگان‌های حیاتی کرهٔ زمین، با فرایند ذخیرهٔ کربن به تعدیل تغییرات اقلیمی و حفظ تعادل زیست‌محیطی کمک می‌کنند. جنگل‌های هیرکانی نیز در جذب و ذخیرهٔ کربن تأثیر اساسی دارند. با این وجود، پژوهش‌ها در خصوص عوامل مؤثر بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی در این جنگل‌ها محدود و پراکنده بوده و در سطوح کوچک انجام گرفته است. کمبود دانش در این زمینه، چالشی بزرگ در مسیر مدیریت پایدار جنگل‌های شمال به حساب می‌آید. تحقیقات جامع و علمی در این خصوص، ضرورتی انکارناپذیر است که می‌تواند به درک بهتر فرایند ذخیرهٔ کربن و ارائهٔ راهکارهای علمی برای مدیریت این جنگل‌های ارزشمند کمک کند. بنابراین پژوهش حاضر در نظر دارد مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی را در سراسر جنگل‌های هیرکانی تعیین کند.

## مواد و روش‌ها

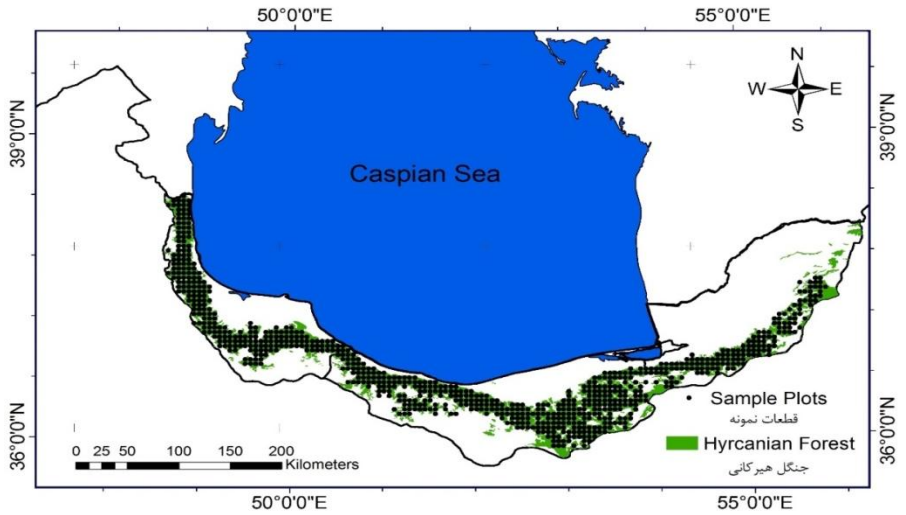
### منطقهٔ پژوهش

این پژوهش در کل جنگل‌های هیرکانی شمال ایران با مساحت تقریبی ۱/۸۵ میلیون هکتار (Sagheb Talebi et al., 2014) انجام گرفت. این جنگل‌ها که به‌عنوان میراث جهانی ثبت شده، به‌دلیل تنوع گیاهی غنی شناخته شده است. جنگل‌های هیرکانی شامل کمربند سبز باریکی از جنگل‌های خزان‌کنندهٔ معتدل است که در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز و در مرزهای جنوبی دریای کاسپین به طول حدود ۸۰۰ کیلومتر و عرض ۲۰ تا ۷۰ کیلومتر امتداد یافته است (Marvi-Mohadjer, 2006). مقدار بارش به‌طور متوسط ۶۰۰ میلی‌متر در سال است که از غرب (بیشتر از ۱۰۰۰ میلی‌متر) به شرق (کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر) کاهش می‌یابد. متوسط دمای سالانه بین ۱۵ تا ۱۸ درجهٔ سانتی‌گراد است. از نظر خاک‌شناسی، خاک جنگل‌های شمال کشور اغلب تحول‌یافته و از نظر تیپ شامل تیپ خاک راندزین و قهوه‌ای جنگلی است (Sagheb Talebi et al., 2014).

### شیوهٔ اجرای پژوهش

برای این پژوهش، از بانک داده‌های آماربرداری جنگل‌های شمال کشور استفاده شد. این بانک داده شامل ۲۷۰۰ قطعه نمونهٔ دایره‌ای ۱۰۰۰ متر مربعی با ابعاد شبکه ۱×۵ کیلومتر در کل جنگل‌های شمال کشور است که در طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۷ نمونه‌برداری شده است (شکل ۱). اطلاعات موجود برای هر قطعه نمونه شامل قطر و نوع گونه است. موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت نیز در هر قطعه نمونه ثبت شده است (Valizadeh et al., 2023). با توجه به اینکه ایستگاه هواشناسی برای کل منطقهٔ جنگل هیرکانی وجود ندارد، داده‌های هواشناسی شامل مقدار بارش و دما از پروژهٔ POWER مربوط به سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحدهٔ آمریکا (NASA Power) تهیه شد (Sparks, 2018; Sayago et al., 2020; Rodrigues et al., 2021; Hosseini et al., 2024). داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک برای هر قطعه نمونه از بانک جهانی داده‌های خاک SoilGrids 2.0 تهیه شد (de Sousa et al., 2020; Poggio et al., 2021; Wang et al., 2024; Asadi et al., 2024; Asadi et al., 2025). در نهایت بانک داده‌ها شامل متغیرهای فیزیوگرافی (درصد شیب، جهت، ارتفاع از

سطح دریا، فاصله از دره)، اقلیمی (دما و بارش) و خاک (چگالی ظاهری، درصد شن، سیلت و رس، اسیدیته، درصد نیتروژن و کربن آلی) آماده شد. مقادیر توصیفی متغیرهای مورد بررسی در جدول ۱ گزارش شد.




شکل ۱- موقعیت قطعات نمونهٔ بانک داده‌های آماربرداری جنگل‌های هیرکانی

Figure 1. The location of the sample plots in the Hyrcanian forest inventory data bank

جدول ۱- فهرست، آمار توصیفی و مخفف متغیرهای محیطی استفاده‌شده در پژوهش

Table 1. List, basic descriptive statistics, and abbreviation of environmental variables used in this study

| نام متغیر Variable name | واحد Unit | منبع تهیه Reference | میانگین Mean | بیشترین Maximum | کمترین Minimum | انحراف معیار Standard Error |
|---|---|---|---|---|---|---|
| چگالی ظاهری Bulk Density | گرم بر سانتی‌متر مکعب $g/cm^{-3}$ | SoilGrids 2.0 | 1.2340 | 1.43 | 0.38 | 0.09287 |
| شن Sand | درصد Percentage | SoilGrids 2.0 | 21.9520 | 44.90 | 0.00 | 6.03573 |
| سیلت Silt | درصد Percentage | SoilGrids 2.0 | 42.8301 | 66.43 | 0.00 | 7.11036 |
| رس Clay | درصد Percentage | SoilGrids 2.0 | 33.7127 | 48.30 | 0.00 | 6.55779 |
| اسیدیته pH | - | SoilGrids 2.0 | 6.7187 | 7.80 | 2.27 | 0.66393 |
| نیتروژن Nitrogen | درصد Percentage | SoilGrids 2.0 | 0.2977 | 0.47 | 0.12 | 0.04936 |
| کربن آلی Soil organic carbon | درصد Percentage | SoilGrids 2.0 | 2.4323 | 5.29 | 0.41 | 0.74247 |
| دما Temperature | درجهٔ سانتی‌گراد Degree Celsius | NASAPOWER | 13.5318 | 18.14 | 8.42 | 2.68672 |
| بارش Precipitation | میلی‌متر Millimeter | NASAPOWER | 578.2838 | 1004.39 | 204.72 | 231.18417 |
| ارتفاع از سطح دریا Elevation | متر Meter | داده‌های آماربرداری Inventory Data | 948.4452 | 2780.00 | -5.00 | 722.51561 |
| شیب Slope | درصد Percentage | داده‌های آماربرداری Inventory Data | 40.0357 | 110.00 | 0.00 | 21.43019 |
| جهت Aspect | - | داده‌های آماربرداری Inventory Data | 0.2649 | 1.00 | 0.00 | 0.27598 |
| فاصله از دره Distance from Valley | متر Meter | مدل رقومی ارتفاع DEM | 2532.40 | 12486.59 | 0.46 | 1691.26 |
| ذخیرهٔ کربن روی زمینی Above-ground carbon storage | تن در هکتار | مدل آلومتری Allometric model | 90.68 | 151.62 | 0.23 | 28.35 |

## روش تحلیل

یکی از روش‌های دقیق برآورد زی‌توده و در نهایت ذخیرهٔ کربن آن، قطع درختان به تفکیک گونه، اندازه‌گیری دقیق جرم آنها، محاسبهٔ دقیق جرم مخصوص و در نهایت اندازه‌گیری درصد کربن آنهاست. با این‌حال با توجه به ممنوعیت قطع درختان و مخرب بودن این روش، امکان تهیهٔ نمونه از همهٔ گونه‌ها در سراسر جنگل‌های هیرکانی وجود ندارد. بنابراین در پژوهش حاضر مقدار زی‌تودهٔ روی زمینی درختان با استفاده از مدل آلومتریک جنگل هیرکانی بر اساس رابطهٔ ۱ (ضریب تبیین مدل: ۰/۹۰) برای هر قطعه نمونه و در نهایت مقدار ذخیرهٔ کربن روی زمینی با استفاده از رابطهٔ ۲ محاسبه شد (Sharifi et al., 2013). این مدل ابتدا برای جنگل‌های اسالم طراحی شده است. با این‌حال، این مدل دارای دقت زیادی است و می‌توان از آن در مقیاس‌های وسیع‌تر استفاده کرد. براساس پژوهش‌های مشابه در جنگل‌های هیرکانی، مدل‌های آلومتریک مانند مدل پیشنهادی (Sharifi et al. 2013) می‌توانند زی‌توده و ذخیرهٔ کربن را در مقیاس‌های بزرگ‌تر (مانند جنگل‌های هیرکانی) نیز برآورد کنند (Hojjati et al., 2023a).

رابطهٔ ۱ $AGB = (a + b.DBH)^2$

رابطهٔ ۲ $C.Storage = AGB \times 0.47$

در رابطهٔ ۱، AGB مقادیر زی‌تودهٔ روی زمینی، DBH قطر برابرسینه و a و b ضرایب ثابت فرمول است که مقادیر آن به ترتیب ۷/۸۹- و ۰/۹۹ است (Sharifi et al., 2013). در رابطهٔ ۲ C.Storage مقدار ذخیرهٔ کربن روی زمین است.

در نهایت برای بررسی اثر متغیرهای فیزیوگرافی، اقلیمی و خاکی روی ذخیرهٔ کربن روی زمینی از مدل خطی تعمیم‌یافته در نرم‌افزار R و بستهٔ caret استفاده شد (Kuhn et al., 2020). مدل خطی تعمیم‌یافته در واقع نوعی مدل پارامتری و بسط‌یافتهٔ مدل‌های خطی است. برای مدل‌سازی از داده‌های مربوط به توپوگرافی، خاک و اقلیمی به‌عنوان متغیرهای مستقل و ذخیرهٔ کربن به‌عنوان متغیر وابسته استفاده شد.

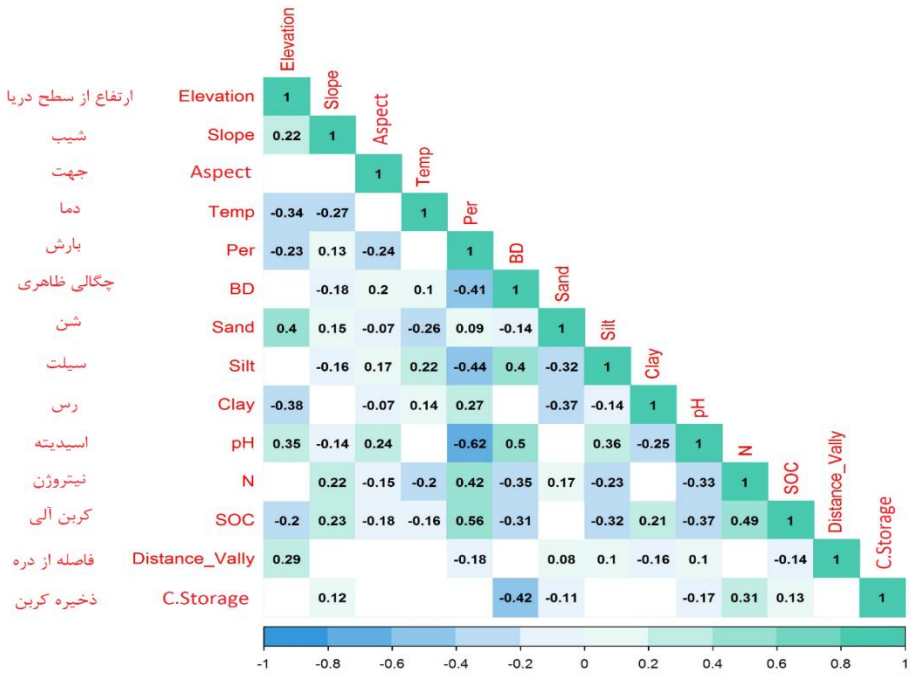
ارزیابی پیش‌بینی‌های مدل، از مهم‌ترین اقدامات در فرایند مدل‌سازی است. برای این منظور روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از آنها روش اعتبارسنجی متقابل است که متداول‌ترین آن استفاده از 10-Fold Cross Validation است. در این روش در هر مرحله، یک بخش از داده‌ها به‌عنوان مجموعهٔ ارزیابی و بقیه به‌عنوان مجموعهٔ آموزش استفاده می‌شوند و این فرایند ده بار تکرار می‌شود تا ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد مدل به دست آید. با این‌حال با توجه به اینکه داده‌های محیطی در سطوح بزرگ به‌طور معمول همبستگی مکانی دارند، استفاده از روش کاملاً تصادفی برای تفکیک این نوع از داده‌ها مناسب نیست و فرضیه‌های مربوط به توزیع یکسان را برآورده نمی‌کند (Roberts et al., 2017). چراکه ممکن است داده‌ها به‌گونه‌ای تفکیک شود که مکان‌های آزمایش یا ارزیابی بسیار نزدیک به مکان‌های آموزش باشند، یعنی در محدودهٔ طول همبستگی خود قرار داشته باشند که می‌تواند بر دقت پیش‌بینی اثرگذار باشد. بنابراین فرایند تفکیک داده‌ها برای داده‌های مکانی، به توجه ویژه در همهٔ مراحل ساخت مدل نیاز دارد. یک راهکار مناسب در این زمینه، استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع فضایی یا بلوکی برای داده‌های دارای همبستگی فضایی و مکانی است (Roberts et al., 2017; Tziachris et al., 2023). در این روش پس از ایجاد بلوک‌ها، اطمینان حاصل می‌شود که داده‌های ارزیابی در درون بلوک‌های مربوط به داده‌های آموزشی قرار نداشته باشند. بنابراین در پژوهش حاضر از روش اعتبارسنجی متقابل بلوکی برای آموزش مدل استفاده شد (Roberts et al., 2017; Tziachris et al., 2023). این رویکرد شامل دسته‌بندی داده‌ها به‌شکل استراتژیک براساس همبستگی مکانی و نه تصادفی است (Roberts et al., 2017). این کار با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری blockCV در نرم‌افزار R انجام گرفت (Valavi et al., 2019).

در روش ارزیابی متقابل بلوکی، تعیین اندازهٔ بلوک مستلزم توازن بین داشتن بلوک‌هاست؛ به‌طوری که بلوک‌ها باید به‌اندازه‌ای بزرگ باشند که بتوان به کاهش حداکثری خودهمبستگی بین داده‌های آموزشی و آزمایشی دست یافت و آن‌قدر هم بزرگ نباشند که سبب پوشش ناکافی فضای پارامتر پیش‌بینی شود. Roberts et al. (2017) اندازهٔ بلوکی را پیشنهاد کرد که به‌طور چشمگیری بزرگ‌تر از خودهمبستگی مشاهده‌شده در باقی‌مانده‌های مدل است. در این پژوهش، پس از تجزیه‌وتحلیل خودهمبستگی با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری blockCV، مقدار آن به‌طور تقریبی ۱۳ کیلومتر در طول اجرای مدل آزمایشی بود. بنابراین برای ادامهٔ پژوهش، بلوک ۲۰ کیلومتری منطقی به نظر می‌رسید. پس از ایجاد بلوک‌ها در کل سطح تحت بررسی، روش 10-Fold روی بلوک‌ها اعمال شد. به این صورت که هر بار اجرای مدل شامل ۹۰ درصد از بلوک‌ها برای آموزش و ۱۰ درصد برای ارزیابی استفاده شد و این کار در مجموع ۱۰ بار انجام گرفت.

در نهایت اهمیت نسبی متغیرها نیز با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری caret در نرم‌افزار R محاسبه شد. در ادامه به‌منظور ارزیابی دقت در مدل‌سازی از آماره‌های ضریب تبیین ($R^2$)، میانگین قدر مطلق خطا (Mean Absolute Error) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) استفاده شد (Chicco et al., 2021; Valizadeh et al., 2023). در نهایت به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی زی‌تودهٔ روی زمینی در جنگل‌های شمال کشور از بستهٔ نرم‌افزاری raster در نرم‌افزار R استفاده شد (Hijmans et al., 2013).

## نتایج

برای بررسی مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی در جنگل هیرکانی، پیش از اجرای مدل خطی تعمیم‌یافته، همبستگی متغیرهای مستقل مدنظر بررسی شد و نتایج نشان داد که متغیرها، همبستگی پیرسون معنی‌دار و زیاد (بیشتر از ۰/۸۰) نداشتند (شکل ۲). بنابراین از همهٔ متغیرها در محاسبات و مدل‌سازی استفاده شد.




شکل ۲- نتایج همبستگی پیرسون متغیرهای بررسی‌شده – رنگ‌های سبز و آبی به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ همبستگی معنی‌دار مثبت و منفی و مربع‌های خالی نشان‌دهندهٔ نبود همبستگی معنی‌دار است.

Figure 2. Results of the Pearson correlation of the studied variables - green and blue colors indicate significant positive and negative correlation, respectively, and blank squares indicate no significant correlation.

نتایج اجرای مدل خطی تعمیم‌یافته نشان داد که این مدل ارزیابی مناسبی برای پیش‌بینی مقدار زی‌تودهٔ روی زمینی درختان در جنگل‌های هیرکانی داشت (جدول ۲). در ادامه نتایج بررسی ضرایب مدل نشان داد که متغیرهای درصد شیب، دمای هوا، درصد سیلت و نیتروژن خاک رابطهٔ مثبت و معنی‌داری با زی‌تودهٔ روی زمینی در جنگل‌های هیرکانی داشتند (جدول ۳)، درحالی که متغیرهای مقدار بارش، چگالی ظاهری و درصد شن رابطهٔ منفی و معنی‌داری با زی‌تودهٔ روی زمینی داشتند (جدول ۳). نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان داد که چگالی ظاهری، درصد نیتروژن و سیلت خاک مهم‌ترین متغیرها در پیش‌بینی زی‌تودهٔ روی زمینی در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته بودند (شکل ۳).

در ادامه نقشهٔ پهنه‌بندی زی‌تودهٔ روی زمینی درختان در سراسر جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته تهیه شد (شکل ۴). روند به‌نسبت یکسانی در سراسر جنگل‌های هیرکانی از نظر مقدار ذخیرهٔ کربن روی زمینی مشاهده شد. با این‌حال مقدار ذخیرهٔ کربن روی زمینی در قسمت‌های مرکزی (غرب استان مازندران) بیشتر از بقیهٔ نقاط بود. همچنین در قسمت‌های شرقی و مرکزی، بیشترین مقدار ذخیرهٔ کربن در مناطق کم‌ارتفاع‌تر و در قسمت‌های غربی در مناطق مرتفع‌تر مشاهده شد.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل خطی تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی زی‌تودهٔ روی زمینی در جنگل‌های هیرکانی

Table 2. Evaluation results of the general linear model for predicting the above-ground biomass in Hyrcanian forests

| جذب میانگین مربعات خطا<br>Root Mean Square Error | ضریب تبیین<br>R squared | میانگین قدر مطلق خطا<br>Mean Absolute Error |
|---|---|---|
| 25.08± 3.90 | 0.31±0.09 | 19.66 ± 2.22 |

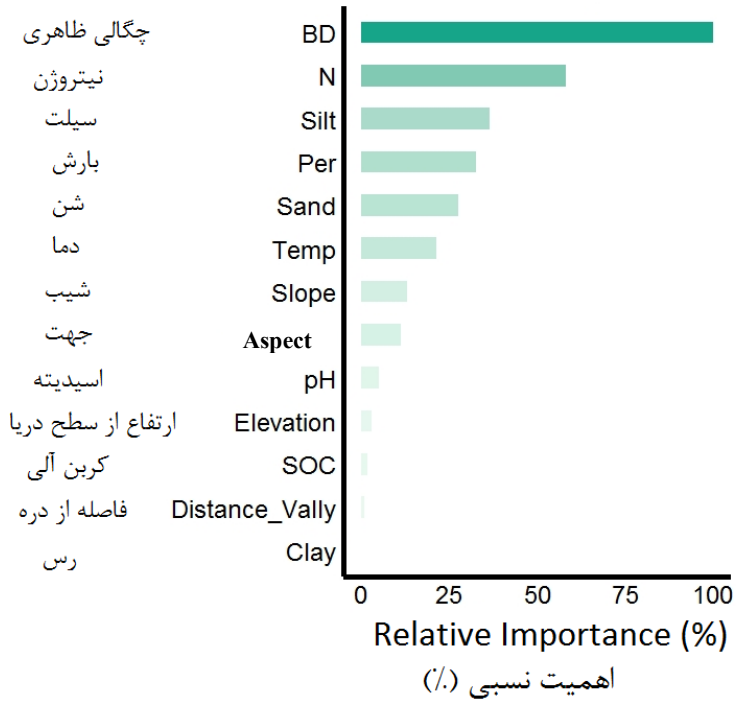
جدول ۳- مقادیر ضرایب متغیرهای تحت بررسی برای زی‌تودهٔ روی زمینی

Table 3. Values of the coefficients of the studied variables for above-ground biomass prediction

| | مقدار ضریب ± اشتباه معیار<br>Estimate ± Std. Error | آمارهٔ t<br>t value |
|---|---|---|
| ضریب ثابت<br>Constant | 90.68±0.76 | 118.614*** |
| ارتفاع از سطح دریا<br>Elevation | 0.77±1.06 | 0.731ns |
| شیب<br>Slope | 1.79±0.84 | 2.128* |
| جهت<br>Aspect | 1.5±0.8 | 1.868 ns |
| چگالی ظاهری خاک<br>Soil Bulk Density | -13.81±0.96 | -14.391*** |
| شن<br>Sand | -3.99±0.95 | -4.191*** |
| سیلت<br>Silt | 5.27±0.97 | 5.427*** |
| رس<br>Clay | 0.27±0.93 | 0.294 ns |
| اسیدیته<br>pH | -1.14±1.13 | -1.008 ns |
| نیتروژن<br>Nitrogen | 8.04±0.94 | 8.496*** |
| کربن آلی<br>Soil Organic Matter | 0.56±1.04 | 0.537 ns |
| بارش<br>Precipitation | -5.76±1.18 | -4.877*** |
| دما<br>Temperature | 2.96±0.89 | 3.324*** |
| فاصله از دره<br>Distance to valley | -0.33±0.8299 | -0.408 ns |

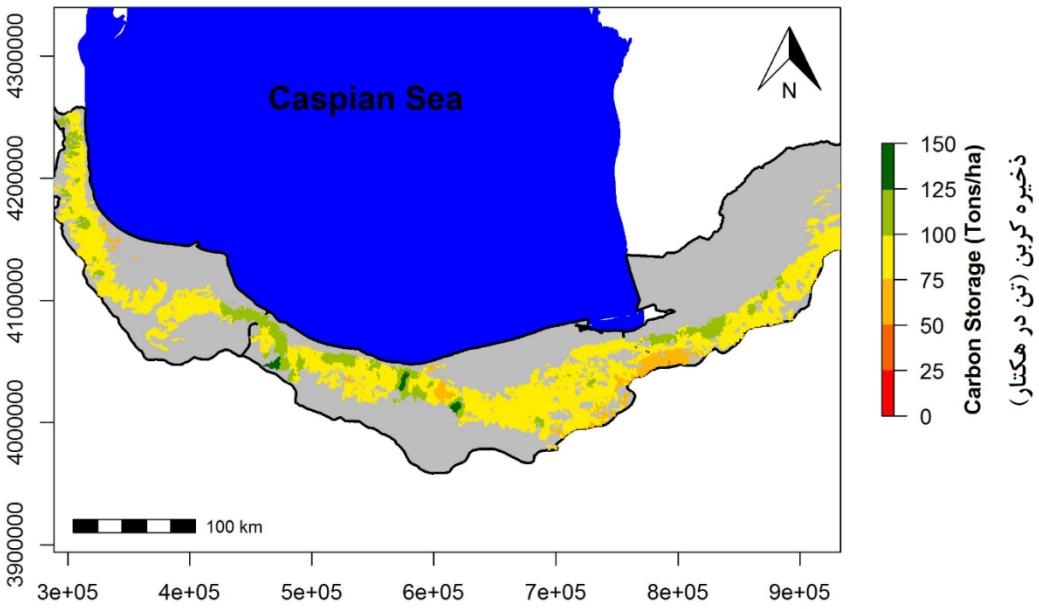
***: نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۰۱، **: نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ و ns: نشان‌دهندهٔ معنی‌دار نبودن است.

*** indicates significance at $p < 0.0001$; ** indicates significance at $p < 0.001$; ns indicates not significant




شکل ۳- اهمیت نسبی متغیرهای بررسی‌شده برای پیش‌بینی ذخیرهٔ کربن روی زمینی درختان در جنگل‌های هیرکانی

Figure 3. The relative importance of the studied variables for predicting the above-ground carbon storage of trees in Hyrcanian forests




شکل ۴- نقشهٔ پهنه‌بندی ذخیرهٔ کربن روی زمینی درختان در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته

Figure 4. Interpolation map of the above-ground carbon storage of trees in Hyrcanian forests using generalized linear model

## بحث

در پژوهش حاضر مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی در سطح جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته تعیین شد. از مدل خطی تعمیم‌یافته برای شناسایی مهم‌ترین عوامل محیطی اثرگذار بر ویژگی‌های ساختاری جنگل از جمله تعداد در هکتار درختان، سطح مقطع، حضور گونه و همچنین تنش خشکی در سراسر جنگل‌های هیرکانی

در بقیهٔ پژوهش‌ها نیز استفاده شده است (Hosseini et al., 2024; Hadinezhad et al., 2025). همچنین به‌طور کلی نتایج این نشان داد که مدل خطی تعمیم‌یافته ارزیابی متوسطی در پیش‌بینی زی‌تودهٔ روی‌زمینی دارد. نتایج دیگر پژوهش‌ها نیز نشان می‌دهد که مدل خطی تعمیم‌یافته ارزیابی متوسطی در پیش‌بینی برخی ویژگی‌های ساختاری و زی‌تودهٔ روی زمینی درختان دارد (Salinas-Melgoza et al., 2018; Hosseini et al., 2024; Hadinezhad et al., 2025).

نتایج این پژوهش نشان داد که ذخیرهٔ کربن روی زمینی با متغیرهای درصد شیب، دمای هوا، درصد سیلت و نیتروژن خاک رابطه مثبت دارد و با متغیرهای مقدار بارش، چگالی ظاهری و درصد شن رابطهٔ منفی دارد. دربارهٔ رابطهٔ مثبت درصد شیب با ذخیرهٔ کربن روی زمینی می‌توان گفت که شیب زمین می‌تواند بر مقدار رطوبت خاک تأثیر بگذارد که خود بر رشد گیاه اثرگذار است (Ribolzi et al., 2011). مناطق شیبدار ممکن است رقابت کمتری برای نور خورشید در مقایسه با زمین‌های هموار داشته باشند. درختان روی شیب به‌دلیل زاویهٔ شیب می‌توانند به نور خورشید دسترسی بهتری داشته باشند، فتوسنتز و رشد را افزایش می‌دهند و در نتیجه به افزایش زی‌توده و در نهایت ذخیرهٔ کربن کمک می‌کنند (Lang et al., 2010). یافته‌هایی همسو با پژوهش حاضر در دیگر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Salinas-Melgoza et al., 2018; Pandey, 2020). البته باید در نظر داشت که امروزه بخش بزرگی از جنگل‌های جلگه‌ای و کم‌شیب هیرکانی در پی گسترش شهرنشینی، توسعهٔ روستاها و بقیهٔ فعالیت‌های انسانی تخریب شده‌اند و به همین دلیل، پوشش جنگلی این منطقه بیشتر در نواحی کوهستانی پرشیب‌تر متمرکز شده است.

دربارهٔ اثر مثبت دمای هوا می‌توان گفت که افزایش دما می‌تواند فعالیت‌های متابولیکی را در درختان تحریک کند و رشد و تجمع زی‌توده را افزایش دهد. همان‌طور که فرایندهای متابولیک افزایش می‌یابند، درختان می‌توانند سریع‌تر رشد کنند و کربن بیشتری را در زی‌تودهٔ روی زمین خود جذب کنند (Larjavaara et al., 2021). همچنین دمای بیشتر می‌تواند فعالیت میکروبی خاک را افزایش دهد و سبب افزایش تجزیهٔ عناصر غذایی شود. این فرایند سبب می‌شود که مواد مغذی بیشتری در دسترس درختان قرار گیرد و رشد و رویش آنها افزایش پیدا کند. نتایج مشابه با یافته‌های پژوهش حاضر در بقیهٔ پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Larjavaara et al., 2021; 2024).

ذرات سیلت کوچک‌تر از شن و بزرگ‌تر از رس‌ها هستند. این اندازهٔ متوسط به خاک‌های سیلتی اجازه می‌دهد که مواد مغذی را به‌طور مؤثرتری نسبت به خاک‌های شنی نگهداری کنند؛ از طرف دیگر ظرفیت نگهداری آب کمتری نسبت به رس دارند که سبب کاهش شرایط غرقابی می‌شود. در دسترس بودن بیشتر مواد مغذی می‌تواند سبب افزایش رشد درختان، افزایش زی‌توده و ذخیرهٔ کربن بیشتر شود (Weil & Brady, 2016). ذرات سیلت در خاک سبب بهبود ساختار خاک می‌شوند که در نهایت محیط مساعدی را برای نفوذ و رشد ریشه ایجاد می‌کند (Lipiec et al., 2007). خاک‌هایی با ساختار مناسب و تخلخل کافی، سبب نفوذ عمیق ریشه‌ها و دسترسی بیشتر آنها به آب و مواد مغذی می‌شوند. این سیستم ریشهٔ عمیق و سالم از رشد در سطح زمین پشتیبانی می‌کند و پتانسیل ذخیرهٔ کربن جنگل را افزایش می‌دهد.

نیتروژن نوعی مادهٔ مغذی حیاتی برای رشد گیاه است که کارکرد مهمی در سنتز اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها، کلروفیل و اسیدهای نوکلئیک دارد. مقدار زیاد نیتروژن خاک این فرایندهای زیستی را افزایش می‌دهد و سبب افزایش نرخ فتوسنتزی، رشد و افزایش زی‌توده می‌شود. نیتروژن جزء اصلی کلروفیل است که برای فتوسنتز ضروری است (Rennenberg & Dannenmann 2015; Tafazoli et al., 2021). افزایش دسترسی زیستی نیتروژن، کارایی فتوسنتز را افزایش

می‌دهد و سبب جذب بیشتر کربن و تولید زی‌توده در سطح زمین می‌شود. پژوهش‌های متعدد رابطهٔ مثبت بین سطوح نیتروژن خاک و بهره‌وری جنگل را نشان داده‌اند (Hyvönen et al., 2008; Quinn Thomas et al., 2010; Öquist et al., 2024).

دربارهٔ اثر منفی مقدار بارش می‌توان بیان کرد که بارش بیش از حد ممکن است سبب ایجاد شرایط غرقابی در خاک شود که در دسترس بودن اکسیژن برای ریشهٔ درختان را کاهش می‌دهد. کمبود اکسیژن در ناحیهٔ ریشه می‌تواند تنفس ریشه و جذب مواد مغذی را کاهش دهد و بر رشد درخت تأثیر منفی بگذارد و در نهایت سبب کاهش زی‌توده و ذخیرهٔ کربن روی زمینی شود (Weil & Brady, 2016). همچنین بارش زیاد ممکن است سبب فرسایش خاک و هدررفت عناصر غذایی شود (Burt et al., 2016).

چگالی ظاهری زیاد، بیانگر فشردگی زیاد خاک است که می‌تواند رشد ریشه را به‌شدت محدود کند. فشردگی خاک موجب کاهش فضای منافذ می‌شود که جلوگیری از نفوذ و رشد ریشه را در پی دارد. این فرایند توانایی ریشه را برای دسترسی به آب و مواد مغذی محدود می‌کند و بر رشد درختان تأثیر منفی می‌گذارد (Weil & Brady, 2016)؛ بنابراین زی‌تودهٔ روی زمینی و ذخیرهٔ کربن کاهش می‌یابد. خاک‌های با چگالی ظاهری زیاد، نرخ نفوذ آب کمتر و تهویهٔ ضعیفی دارند که بر تنفس ریشه و سلامت کلی گیاه تأثیر منفی می‌گذارد و پتانسیل جذب و ذخیرهٔ کربن را کاهش می‌دهد. در خاک‌های با چگالی ظاهری زیاد، اغلب فعالیت میکروبی و تجزیهٔ مواد آلی کاهش می‌یابد. کاهش فعالیت میکروبی، سرعت تجزیهٔ مواد مغذی و در نتیجه، دسترسی گیاهان به مواد مغذی را کاهش می‌دهد. این وضعیت، ممکن است سبب کاهش فتوسنتز و رشد و کاهش ظرفیت جذب کربن در جنگل شود (Vicca et al., 2012). کاهش رشد ریشه و ارتفاع درختان در بقیهٔ پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Ares et al., 2007; Bulmer et al. 2007).

خاک‌های شنی اغلب دارای ذرات و فضای منافذ بزرگ هستند که سبب زهکشی سریع و ظرفیت نگهداری کم آب می‌شود؛ یعنی سرعت نفوذ آب در خاک‌های شنی بسیار زیاد است و بنابراین در دسترس ریشه‌های گیاه قرار نمی‌گیرد. کاهش دسترسی به آب، رشد درخت و ذخیرهٔ کربن را محدود می‌کند (Weil & Brady 2016). همچنین خاک‌های شنی به‌دلیل ظرفیت کم تبادل کاتیونی، در نگهداری عناصر غذایی ضعیف هستند. مواد مغذی به‌راحتی از خاک‌های شنی خارج می‌شوند و دسترسی گیاهان به آنها کاهش می‌یابد. محدود بودن مواد مغذی می‌تواند مانع فتوسنتز و رشد شود که در نهایت سبب کاهش زی‌توده و جذب کربن می‌شود (Vicca et al., 2012). رابطهٔ مثبت درصد رس خاک و ذخیرهٔ کربن روی زمینی درختان در بقیهٔ پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Heineman et al., 2011; Devi, 2021; Sheshnitsan et al., 2024).

چگالی ظاهری خاک مهم‌ترین متغیر اثرگذار بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی در جنگل‌های هیرکانی است که با توجه به مطالب بیان‌شده، دلیل آن، تأثیرات چگالی ظاهری خاک بر ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی، تهویه و رشد و رویش ریشهٔ گیاه است. درصد نیتروژن خاک نیز اثرهای زیادی بر فعالیت رویشی گیاهان دارد و دومین عامل مهم اثرگذار بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی شناسایی شده است. در پژوهشی به‌منظور شناسایی عوامل اثرگذار بر زی‌توده و ذخایر مواد مغذی در جنگل‌های خران‌کنندهٔ معتدل در مناطق مختلفی از اروپا، نیتروژن خاک عامل مهمی شناسایی شد (Landuyt et al., 2020). در پژوهش دیگری با هدف پیش‌بینی ذخیرهٔ کربن جنگل در استرالیا نیز چگالی ظاهری خاک مهم‌ترین عامل اثرگذار گزارش شد (Bennett et al., 2020).

براساس نتایج مدل خطی تعمیم‌یافته، تقریباً الگو و روند یکنواختی برای ذخیرهٔ کربن در سراسر جنگل‌های هیرکانی مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ ظرفیت به‌نسبت یکنواخت ذخیرهٔ کربن در سطح جنگل است. با این‌حال، تغییرات در برخی مناطق مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ عوامل منطقه‌ای مؤثر بر توزیع زی‌توده و ذخیرهٔ کربن است. بخش‌های مرکزی جنگل‌های هیرکانی، به‌ویژه در غرب استان مازندران، ذخیرهٔ کربن بیشتری از بقیهٔ مناطق داشت که نشان می‌دهد این منطقه دارای شرایط مساعدی برای رشد درختان و ذخیرهٔ کربن است. همچنین ذخیرهٔ کربن بیشتری در مناطق کم‌ارتفاع‌تر مشاهده شد. مناطق پست‌تر، اغلب آب‌وهوای معتدل‌تر، خاک حاصلخیزتر و دسترسی بهتری به آب دارند که به رشد درختان و تجمع زی‌تودهٔ بیشتر کمک می‌کند (Bayranvand et al., 2021).

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش ذخیرهٔ کربن روی زمینی و عوامل محیطی مؤثر بر آن در جنگل‌های شمال کشور بررسی شد. به‌طور کلی براساس نتایج به‌دست‌آمده، چگالی ظاهری، درصد سیلت و نیتروژن خاک مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر ذخیرهٔ کربن روی زمینی در جنگل‌های هیرکانی هستند. از میان متغیرهای بررسی‌شده، دمای هوا، درصد شیب، درصد سیلت و نیتروژن خاک رابطهٔ معنی‌دار مثبت و مقدار بارش، چگالی ظاهری و درصد شن رابطهٔ معنی‌دار منفی با ذخیرهٔ کربن روی زمینی داشتند. همچنین براساس نقشهٔ پهنه‌بندی، مقدار زی‌تودهٔ روی زمینی در قسمت‌های مرکزی (غرب استان مازندران) بیشتر از نقاط دیگر بود. پژوهش و بررسی تغییرات مکانی در زی‌توده و ذخیرهٔ کربن می‌تواند به اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی کمک کند. مناطق مرکزی با زی‌توده و ذخیرهٔ کربن بیشتر باید برای حفظ قابلیت‌های ذخیرهٔ کربن محافظت شوند. در مناطقی با زی‌تودهٔ کم، شیوه‌های مدیریت پایدار جنگل، مانند جنگلکاری و مدیریت خاک، می‌تواند به بهبود ساختار خاک و در دسترس بودن مواد مغذی کمک کند و در نتیجه پتانسیل جذب کربن را افزایش دهد. به‌طور کلی حفاظت و مدیریت جنگل‌های هیرکانی می‌تواند کمک مناسبی برای اقدامات مدیریتی در زمینهٔ ذخیرهٔ کربن در سطوح منطقه‌ای و ملی باشد.

با توجه به اینکه جنگل‌های هیرکانی برای مدت زمان طولانی تحت بهره‌برداری‌های انسانی قرار داشته‌اند، عوامل مختلفی همچون قطع درختان، آتش‌سوزی‌ها، جمع‌آوری گیاهان دارویی و تغییرات کاربری اراضی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر وضعیت زی‌توده و ذخیرهٔ کربن آن تأثیر گذاشته‌اند که این عوامل می‌توانند اثر مهمی در تعیین وضعیت ذخیرهٔ کربن و تغییرات آن داشته باشند. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده، افزون‌بر عوامل محیطی مانند خاک، اقلیم و نوع گونه‌ها، تأثیر فواصل از مناطق بهره‌برداری، جاده‌ها و سکونتگاه‌های انسانی نیز بررسی شود تا بتوان به تحلیل جامع‌تری از وضعیت زی‌توده و ذخیرهٔ کربن در جنگل‌های هیرکانی دست یافت. با توجه به اهمیت موضوع و نیاز به تحلیل‌های دقیق‌تر، پیشنهاد می‌شود که در آینده پژوهش‌های بیشتری با استفاده از داده‌های جدید سازمان منابع طبیعی کشور انجام گیرد. این داده‌ها می‌توانند به‌ویژه در ارزیابی تغییرات زی‌توده و ذخیرهٔ کربن در جنگل‌های شمال کشور و همچنین تحلیل روند تغییرات آن در سال‌های اخیر مفید واقع شوند. پژوهش‌های آینده با بهره‌گیری از این داده‌ها و همچنین بقیهٔ مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق می‌توانند به درک بهتر و جامع‌تری از عوامل مؤثر بر زی‌توده و ذخیرهٔ کربن و همچنین پیش‌بینی آنها در این جنگل‌ها کمک کنند.

**References**

Akhavan, R., Hassani, M., Sobh Zadedi, S., & Khorrami Katrimi, R.A. (2025). Estimation of volume stock of Hyrcanian forests of Iran using permanent sample plots and two-stage sampling method. *Iranian Journal of Forest*, *17*(1), 87-107. https://doi.org/10.22034/ijf.2025.471946.2001. (In Persian)

Alazmani, M., Hojjati, S.M., Waez-Mousavi, S.M., & Tafazoli, M. (2021). Effect of alder plantation age on soil carbon sequestration. *Forest Research and Development*, *7*(2), 279-291. https://doi.org/10.30466/jfrd.2021.121058. (In Persian)

Amiri, N., & Mohammadi Limaei, S. (2021). Valuation of carbon sequestration and estimation of CO2 emission in the Hyrcanian forests of Iran. *Forestry Ideas*, *27*(2 (62)), 318-331.

Ares, A., Terry, T., Harrington, C., Devine, W., Peter, D., & Bailey, J. (2007). Biomass removal, soil compaction, and vegetation control effects on five-year growth of Douglas-fir in coastal Washington. *Forest Science*, *53*(5), 600–610.

Asadi, H., Jalilvand, H., Tafazoli, M., & Hosseini, S.F. (2024). Modeling Suitable Habitats of *Parrotia persica* (DC.) CA Mey. in the Hyrcanian Forests Using Environmental Factors. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *33*(1), 50-68. https://doi.org/10.22092/ijfpr.2024.366708.2173. (In Persian)

Asadi, H., Jalilvand, H., Tafazoli, M., & Hosseini, S.F. (2025). Modeling habitat suitability of *Quercus castaneifolia* in the Hyrcanian forest: a comprehensive integration of environmental factors for conservation insights. *Biodiversity and Conservation*, *34*(1), 315-334. https://doi.org/10.1007/s10531-024-02973-z

Baccini, A., Walker, W., Carvalho, L., Farina, M., Sulla-Menashe, D., Houghton, R.A. (2017). Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science 358*, 230–234.

Bayranvand, M., Akbarinia, M., Salehi Jouzani, G., Gharechahi, J., & Alberti, G. (2021). Dynamics of humus forms and soil characteristics along a forest altitudinal gradient in Hyrcanian forest. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, *14*(1), 26. https://doi.org/10.3832/ifor3444-013

Bennett, A.C., Penman, T.D., Arndt, S.K., Roxburgh, S.H., & Bennett, L.T. (2020). Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale. *Ecography*, *43*(11), 1692-1705.

Bulmer, C., Venner, K., & Prescott, C. (2007). Forest soil rehabilitation with tillage and wood waste enhances seedling establishment but not height after 8 years. *Canadian Journal of Forest Research*, *37*(10), 1894–1906. doi:10.1139/X07-063. https://doi.org/10.1139/X07-063

Burt, T., Boardman, J., Foster, I., & Howden, N. (2016). More rain, less soil: long-term changes in rainfall intensity with climate change. *Earth Surface Processes and Landforms*, *41*(4), 563-566. https://doi.org/10.1002/esp.3868

Cannell, M.G.R. (2003). Carbon sequestration and biomass energy offset theoretical, potential and achievable capacities globally in Europe and UK, *Biomass and Bioenergy*, *24*, 97-116.

Chicco, D., Warrens, M.J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj computer science*, *7*, e623. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623

Cleophas, F., Isidore, F., Musta, B., Ali, B.M., Mahali, M., Zahari, N.Z., & Bidin, K. (2022). August. Effect of soil physical properties on soil infiltration rates. *Journal of physics: conference series, 1(*2314), 012020.

de Sousa, L.M., Poggio, L., Batjes, N.H., Heuvelink, G.B., Kempen, B., Riberio, E., & Rossiter, D. (2020). SoilGrids 2.0: producing quality-assessed soil information for the globe. *Soil discussions*, 1-37. https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021

Devi, A.S. (2021). Influence of trees and associated variables on soil organic carbon: a review. *Journal of Ecology and Environment*, *45*(1), 5. https://doi.org/10.1186/s41610-021-00180-3

Fang, J., Shen, Z., Tang, Z., Wang, X., Wang, Z., Feng, J., Liu, Y., Qiao, X., Wu, X., & Zheng, C. (2012). Forest community survey and the structural characteristics of forests in China. *Ecography*, *35*(12), 1059-1071.

Geng, Y., Baumann, F., Song, C., Zhang, M., Shi, Y., Kühn, P., Scholten, T., & He, J.S. (2017). Increasing temperature reduces the coupling between available nitrogen and phosphorus in soils of Chinese grasslands. *Scientific reports*, *7*(1), 43524. https://doi.org/10.1038/srep43524

Ghanbari, M.M., Babaie, K.S., Mataji, A., & Akhavan, R. (2021). Prelude on Estimation of Carbon Reserves in Beech Forests of Northern Iran. *Human and Environment*, *57*, 60-72. (in Persian).

Hadinezhad, P., Asadi, H., Hojati, S.M., Tafazoli, M., & Yousefpour, R. (2025). Factors affecting tree drought stress in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development, 10*(4), 431-451. https://doi.org/10.30466/jfrd.2024.55216.1718

Heineman, K.D., Jensen, E., Shapland, A., Bogenrief, B., Tan, S., Rebarber, R., & Russo, S.E. (2011). The effects of belowground resources on aboveground allometric growth in Bornean tree species. *Forest Ecology and Management*, *261*(11), 1820-1832. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.005

Hijmans, R.J., Van Etten, J., Mattiuzzi, M., Sumner, M., Greenberg, J.A., Lamigueiro, O.P., Bevan, A., Racine, E.B., & Shortridge, A. (2013). Raster package in R. *Version. Https://Mirro Rs. Sjtug. Sjtu. Edu. Cn/Cran/Web/Packa Ges/Rast er/Raster. Pdf*.

Hojjati, S.M., & Lamersdorf, N.P. (2010). Effect of canopy composition on soil CO2 emission in a mixed sprucebeech forest at Solling, Central Germany. *Journal of Forestry Research*, *21*, 461-464. https://doi.org/10.1007/s11676-010-0098-8

Hojjati, S.M., Tafazoli, M., Asadian, M., & Baluee, A. (2022). Estimation of carbon sequestration and forest soil respiration using machine learning models in Eastern Forests of Mazandaran Province. *Forest Research and Development*, *8*(4), 371-388. (In Persian). https://doi.org/10.30466/jfrd.2022.54304.1613

Hojjati, S.M., Tafazoli, M., Asadian, M., & Baluee, A. (2023a). Soil respiration and carbon stock responses to land use changes in the temperate forest of northern Iran. *Environmental Earth Sciences*, *82*(18), 413. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11112-w

Hojjati, S.M., Tafazoli, M., Imani, M., Alazmani, M., Fallah, A., & Pourmajidian, M.R. (2023b). Variation in carbon sequestration and soil properties in relation to stand age in maple and alder plantations. *Journal of Sustainable Forestry*, *42*(6), 640-654. https://doi.org/10.1080/10549811.2022.2059516

Hosseini, S.F., Jalilvand, H., Fallah, A., Asadi, H., & Tafazoli, M. (2024). Does the Frequency of Fog Affect the Structural Properties of Fagus orientalis in the Hyrcanian Forest?. *Ecology of Iranian Forest*, *12*(2), 15-25. (In Persian) http://dx.doi.org/10.61186/ifej.12.2.15

Hyvönen, R., Persson, T., Andersson, S., Olsson, B., Ågren, G.I., & Linder, S. (2008). Impact of long-term nitrogen addition on carbon stocks in trees and soils in northern Europe. *Biogeochemistry*, *89*, 121-137. https://doi.org/10.1007/s10533-007-9121-3

Javanmiri Pour, M., & Etemad, V. (2024). Habitat trees in mixed stands and mid-altitude elevation in Hyrcanian forests (Case study: Kheyrud forest, Nowshahr). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 32*(1), 29-45. (In Persian) https://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.363743.2122

Körner, C., Jetz, W., Paulsen, J., Payne, D., Rudmann-Maurer, K., & M Spehn, E. (2017). A global inventory of mountains for bio-geographical applications. *Alpine botany*, *127*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s00035-016-0182-6

Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhardt, A., Cooper, T., Mayer, Z., Kenkel, B., & Team, R.C. (2020). Package 'caret'. *The R Journal*, *223*(7), 48.

Kumar, R., Rawat, K.S., Singh, J., Singh, A., & Rai, A. (2013). Soil aggregation dynamics and carbon sequestration. *Journal of Applied and Natural Science*, *5*(1), 250-267.

Landuyt, D., Maes, S.L., Depauw, L., Ampoorter, E., Blondeel, H., Perring, M.P., Brūmelis, G., Brunet, J., Decocq, G., Den Ouden, J., & Härdtle, W. (2020). Drivers of above-ground understorey biomass and nutrient stocks in temperate deciduous forests. *Journal of Ecology*, *108*(3), 982-997. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13318

Lang, A.C., Härdtle, W., Bruelheide, H., Geißler, C., Nadrowski, K., Schuldt, A., Yu, M., & von Oheimb, G. (2010). Tree morphology responds to neighbourhood competition and slope in species-rich forests of subtropical China. *Forest Ecology and Management*, *260*(10), 1708-1715. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.015

Larjavaara, M., Chen, X., & Luo, M. (2024). A temperature-based model of biomass accumulation in humid forests of the world. *Frontiers in Forests and Global Change*, *7*, 1142209. https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1142209

Larjavaara, M., Lu, X., Chen, X., & Vastaranta, M. (2021). Impact of rising temperatures on the biomass of humid old-growth forests of the world. *Carbon Balance and Management*, *16*, 1-9. https://doi.org/10.1186/s13021-021-00194-3

Li, T., Zou, Y., Liu, Y., Luo, P., Xiong, Q., Lu, H., Lai, C., & Axmacher, J.C. (2022). Mountain forest biomass dynamics and its drivers in southwestern China between 1979 and 2017. *Ecological Indicators*, *142*, 109289. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109289

Lipiec, J., Walczak, R., Witkowska-Walczak, B., Nosalewicz, A., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Sławiński, C. (2007). The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. *Soil and Tillage Research*, *97*(2), 239-246. https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.001

Marvie Mohadjer, M.R. (2006). Silviculture. Tehran University Press. (in Persian).

Mohammadi, Z., Mohammadi Limaei, S., Lohmander, P., & Olsson, L. (2017). Estimating the aboveground carbon sequestration and its economic value: case study: Iranian Caspian Forests. *Journal of Forest Research*, *63*(11), 511-518. (In Persian)

Naderi, M., Kialashaki, A., Veisi, R., Sheykheslami, A., & Tafazoli, M. (2021). Effect of Site on Soil Properties and Carbon Sequestration in Populus deltoids Stand in Sari. *Ecology of Iranian Forest*, *9*(18), 187-195. (In Persian). http://dx.doi.org/10.52547/ifej.9.18.187

Öquist, M.G., He, H., Bortolazzi, A., Nilsson, M.B., Rodeghiero, M., Tognetti, R., Ventura, M., & Egnell, G. (2024). Nitrogen fertilization increases N2O emission but does not offset the reduced radiative forcing caused by the increased carbon uptake in boreal forests. *Forest Ecology and Management*, *556*, 121739. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121739

Osabohien, R., Matthew, O., Aderounmu, U., & Olawande, T. (2019). Greenhouse gas emissions and crop production in West Africa: Examining the mitigating potential of social protection. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *9*(1), 57.

Pandey, H.P. (2020). Response of topographic and biodiversity variables on biomass and carbon density in community forests of himalayan foot-hills. *Journal of Forest and Livelihood*, *19*(1), 51-65.

Poggio, L., De Sousa, L.M., Batjes, N.H., Heuvelink, G.B., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D., (2021). SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, *7*(1), 217-240. https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021

Poorter, L., van der Sande, M.T., Arets, E.J., Ascarrunz, N., Enquist, B.J., Finegan, B., Licona, J.C., Martínez-Ramos, M., Mazzei, L., Meave, J.A., & Muñoz, R. (2017). Biodiversity and climate determine the functioning of Neotropical forests. *Global ecology and biogeography*, *26*(12), 1423-1434. https://doi.org/10.1111/geb.12668

Quinn Thomas, R., Canham, C.D., Weathers, K.C., & Goodale, C.L. (2010). Increased tree carbon storage in response to nitrogen deposition in the US. *Nature Geoscience*, *3*(1), 13-17. https://doi.org/10.1038/ngeo721

Rennenberg, H., & Dannenmann, M. (2015). Nitrogen nutrition of trees in temperate forests—the significance of nitrogen availability in the pedosphere and atmosphere. *Forests, 6*(8), 2820-2835. https://doi.org/10.3390/f6082820

Ribolzi, O., Patin, J., Bresson, L.M., Latsachack, K.O., Mouche, E., Sengtaheuanghoung, O., Silvera, N., Thiébaux, J.P., & Valentin, C. (2011). Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos. *Geomorphology*, *127*(1-2), 53-63. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.004

Roberts, D.R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M.S., Elith, J., Guillera-Arroita, G., Hauenstein, S., Lahoz-Monfort, J.J., Schröder, B., Thuiller, W., & Warton, D.I. (2017). Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*, *40*(8), 913-929. https://doi.org/10.1111/ecog.02881

Rodrigues, G.C., & Braga, R.P. (2021). Evaluation of NASA POWER reanalysis products to estimate daily weather variables in a hot summer mediterranean climate. *Agronomy*, *11*(6), 1207. https://doi.org/10.3390/agronomy11061207

Rodríguez-Soalleiro, R., Eimil-Fraga, C., Gómez-García, E., García-Villabrille, J.D., Rojo- Alboreca, A., Muñoz, F., Oliveira, N., Sixto, H., & Pérez-Cruzado, C. (2018) Exploring the factors affecting carbon and nutrient concentrations in tree biomass components in natural forests, forest plantations and short rotation forestry. *Forest Ecosystem*, *5*, 35. https://doi.org/10.1186/s40663-018-0154-y

Saeidi, M., Hojjati, S., & Fallah, A. (2023). Variations of soil carbon storage according to age in reforested stands of Acer velutinum Boiss.(case study: Neka-Zhalmroud forests). *Iranian Journal of Forest*, *15*(3), 293-311. (In Persian) https://doi.org/10.22034/ijf.2023.357277.1885

Sagheb Talebi, K.S., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran. *A treasure from the past, a hope for the future*, Springer Netherlands.

Salinas-Melgoza, M.A., Skutsch, M., & Lovett, J.C. (2018). Predicting aboveground forest biomass with topographic variables in human-impacted tropical dry forest landscapes. *Ecosphere, 9*(1), e02063. https://doi.org/10.1002/ecs2.2063

Sayago, S., Ovando, G., Almorox, J., & Bocco, M. (2020). Daily solar radiation from NASA-POWER product: assessing its accuracy considering atmospheric transparency. *International Journal of Remote Sensing*, *41*(3), 897-910. https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1650986

Sharifi, A., Amini, J., & Pourshakouri, F. (2013). Allometric model development for Above-Ground Biomass estimation in Hyrcanian forests of Iran. *World Applied Sciences Journal*, *28*(9), 1322-1330. https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.28.09.1575

Sheikh, M.A., Kumar, M., & Bussmann, R.W. (2009). Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. *Carbon balance and management, 4,* 1-6. https://doi.org/10.1186/1750-0680-4-6

Sheshnitsan, S., Odnoralov, G., Tikhonova, E., Gorbunova, N., Sheshnitsan, T., Murariu, O.C., & Caruso, G. (2024). Influence of Soil Texture on Carbon Stocks in Deciduous and Coniferous Forest Biomass in the Forest-Steppe Zone of Oka–Don Plain. *Soil Systems*, *8*(4), 118. https://doi.org/10.3390/soilsystems8040118

Sparks, A.H. (2018). nasapower: a NASA POWER global meteorology, surface solar energy and climatology data client for R. *Journal of Open Source Software*, *3*(30), 1035. https://doi.org/10.21105/joss.01035

Srivastava, A.K., Gaiser, T., Paeth, H., & Ewert, F. (2012). The impact of climate change on Yam (Dioscorea alata) yield in the savanna zone of West Africa. *Agriculture, ecosystems & environment, 153,* 57-64. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.004

Tafazoli, M., Hojjati, S.M., Jalilvand, H., Lamersdorf, N., & Tafazoli, M. (2021). Effect of nitrogen addition on soil CO2 efflux and fine root biomass in maple monocultures of the Hyrcanian region. *Annals of Forest Science*, *78*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s13595-021-01050-7

Tziachris, P., Nikou, M., Aschonitis, V., Kallioras, A., Sachsamanoglou, K., Fidelibus, M.D., & Tziritis, E. (2023). Spatial or random cross-validation? The effect of resampling methods in predicting groundwater salinity with machine learning in Mediterranean Region. *Water*, *15*(12), 2278. https://doi.org/10.3390/w15122278

Valavi, R., Elith, J., Lahoz-Monfort, J.J., & Guillera-Arroita, G. (2019). blockCV: An r package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*, *10*(2), 225-232. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13107

Valizadeh, E., Asadi, H., Jaafari, A., & Tafazoli, M. (2023). Machine learning prediction of tree species diversity using forest structure and environmental factors: a case study from the Hyrcanian forest, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(11), 1334. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11969-1

Vicca, S., Luyssaert, S., Peñuelas, J., Campioli, M., Chapin Iii, F.S., Ciais, P., Heinemeyer, A., Högberg, P., Kutsch, W.L., Law, B.E., & Malhi, Y. (2012). Fertile forests produce biomass more efficiently. *Ecology letters*, *15*(6), 520-526. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01775.x

Wang, G., Guan, D., Xiao, L., & Peart, M.R. (2019). Forest biomass-carbon variation affected by the climatic and topographic factors in Pearl River Delta, South China. *Journal of environmental management*, *232*, 781-788. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.130

Wang, L., Li, Z., Wang, D., Liao, S., Nie, X., & Liu, Y. (2022). Factors controlling soil organic carbon with depth at the basin scale. *Catena*, *217*, 106478. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106478

Wang, R., Wan, S., Chen, W., Qin, X., Zhang, G., & Wang, L. (2024). A novel finer soil strength mapping framework based on machine learning and remote sensing images. *Computers & Geosciences*, *182*, 105479. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2023.105479

Weil, R.R., & Brady, N.C. (2016). The nature and properties of soils. Pearson, Ohio.

Xu, Y., Franklin, S.B., Wang, Q., Shi, Z., Luo, Y., Lu, Z., Zhang, J., Qiao, X., & Jiang, M. (2015). Topographic and biotic factors determine forest biomass spatial distribution in a subtropical mountain moist forest. *Forest ecology and management*, *357*, 95-103. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.010

Zobayed, S.M.A., Afreen, F., & Kozai, T. (2005). Temperature stress can alter the photosynthetic efficiency and secondary metabolite concentrations in St. John's wort. *Plant Physiology and Biochemistry*, *43*(10-11), 977-984. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.05.002

Iranian Journal of Forest
Vol. 17, No. 3, Autumn 2025
pp. 347-363
*Research Article*

DOI: 10.22034/ijf.2025.471597.2000
CC BY 4.0

# The most important environmental factors affecting above-ground carbon storage in Hyrcanian forests

**A. Faghi Abdollahi[1], S. M. Hojjati[2&3*], H. Asadi[4], and M. Tafazoli[4]**

[1]Ph.D. Student of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran
[2]Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran
[3]Visiting scientist, Dept. of Silviculture and Forest Ecology of the Temperate Zones, University of Göttingen, Göttingen, Germany
[4]Assistant Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran

(Received: 13 August 2024; Accepted: 5 May 2025)

## Abstract

**Introduction:** As one of the vital ecosystems of the planet, forests play a key role in sequestering and storing carbon, and the process of storing carbon helps to moderate climate changes and maintain environmental balance. Therefore, knowledge of the changes in above ground carbon storage in relation to environmental and ecological factors is important because of providing a suitable prediction of the carbon balance at the regional and global levels, in relation to the changes in the future climate characteristics, and knowledge of them is important and can be used in order to prepare programs for the protection, restoration and development of forest resources. However, the studies about the factors affecting carbon storage in these forests are limited, and carried out on small areas. Therefore, the purpose of this research was to determine the most important factors affecting the above ground storage carbon in the entire area of Hyrcanian forests.

**Material and Methods:** This research was carried out in the entire area of Hyrcanian forests in the north of the country. For this purpose, the database of forest inventory in the north of the country was used (available data include: coordinate, height above sea level, slope and aspect, diameter at breast height, and type of species and total height of trees for each sample plot). Meteorological data, including precipitation and temperature, were obtained from the POWER project of the National Aeronautics and Space Administration of the United States of America (NASA Power). Soil data (bulk density, percentage of sand, silt and clay, pH, percentage of nitrogen and organic carbon) were also prepared for each sample plot from SoilGrids 2.0. In order to calculate carbon storage, biomass was first calculated using allometric models of forests in the north of the country, and finally the amount of carbon storage was calculated by taking into account the coefficient of 0.47% of biomass value. Finally, the data analysis was done using the generalized linear model and block cross validation method in R software using blockcv and caret packages. Then, the relative importance of the variables affecting on the carbon storage was calculated. Finally, in order to prepare an interpolation map of carbon storage in the forests of the north of the country, the raster package in R software was used.

**Results:** The results of the running of the generalized linear model showed that this model had a suitable evaluation ($R^2$: 0.31 ± 0.09) for predicting the above-ground biomass of trees in Hyrcanian forests. The results of the model coefficients showed that slope, air temperature, silt percentage and soil nitrogen had a positive and significant relationship with above-ground biomass of trees in Hyrcanian forests. While precipitation, bulk density and percentage of sand had a negative and significant relationship with above-ground biomass of trees. The results of the relative importance of the variables showed that bulk density, nitrogen percentage, and silt were the most important variables in predicting above-ground biomass of trees in Hyrcanian forests using a generalized linear model. Also, according to the interpolation map, the above-ground biomass of trees was higher in the central parts (west of Mazandaran province) than in other parts of the Hyrcanian forests.

**Conclusion:** Studying the spatial changes in above-ground tree biomass and carbon storage can help to prioritize conservation measures. Central areas with higher biomass and carbon storage should be protected to maintain carbon storage capabilities. In low biomass areas, sustainable forest management practices, such as afforestation and soil management, can help improve soil structure and nutrient availability, thereby increasing carbon sequestration and storage potential. In general, the protection and management of Hyrcanian forests can be a significant help for management of carbon storage at the regional and national levels. Given the importance of the topic, it is recommended that future studies do a more thorough analysis of the anthropogenic and environmental factors affecting above-ground biomass dynamics.

**Keywords**: Carbon sequestration, Generalized linear model, Soil properties, Topographic factors, Tree biomass.

*Corresponding author Tel: +98 1133885411 Email: s_m_hodjati@yahoo.com