

مدل سازی تغییرات موجودی کربن در ارتباط با خاک بستر زیرین خشک‌دار

سعید شعبانی^{۱*}، علی اصغر واحدی^۲، اکرم احمدی^۳ و حسن فرامرزی^۴

*- نویسنده مسئول، استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران. پست الکترونیک: saeidshabani07@gmail.com

۲- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران

۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

۴- دکتری جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

چکیده

از آنجاکه خشک‌دار حاوی مقدار قابل توجهی مواد آلی است، نقش مهمی در پویایی بوم‌سازگان جنگل ایفا می‌کند. براین اساس، در پژوهش پیش‌رو تغییرات موجودی کربن خاک در ارتباط با ویژگی‌های خشک‌دار و خاک بستر زیرین آن در توده‌های پهن‌برگ سری لوه استان گلستان با استفاده از تجزیه به مؤلفه اصلی و مدل جنگل تصادفی بررسی شد. مشخصه‌های ۱۵ خشک‌دار افتاده از گونه‌های *Merz* (*Carpinus betulus* L.)، بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.)، شیردار (*Acer cappadocicum* Gled.) و انجیلی (*Parrotia persica* C.A.Mey.) در سه درجه پوسیدگی سه تا پنج ثبت شد. سپس، نمونه‌گیری از خاک زیرین آن‌ها تا عمق ۱۵ سانتی‌متر انجام گرفت. مدل جنگل تصادفی براساس ارتباط بین متغیر وابسته (موجودی کربن) و متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر) در نرم‌افزار R و با بسته نرم‌افزاری randomForest اجرا شد. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی حدود ۵۴ درصد از تغییرات موجودی کربن خاک را با به‌کارگیری مؤلفه‌های مورد مطالعه توجیه می‌کند. براساس مدل نهایی، موجودی کربن خاک اطراف خشک‌دار اغلب تحت تأثیر سه مؤلفه نسبت کربن به نیتروژن، درصد نیتروژن و pH خاک است. به طوری که در یک روند کلی، با افزایش نسبت کربن به نیتروژن و مقدار نیتروژن کل و کاهش pH به موجودی کربن خاک اطراف خشک‌دار افزوده می‌شود. یافته‌های پژوهش پیش‌رو حاکی از آن است که خشک‌دارها به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های جنگلی کهن، پتانسیل بسیار زیادی برای ذخیره کربن خاک فراهم می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: پهن‌برگ آمیخته، جنگل هیرکانی، حوضچه کربن، درجه پوسیدگی، زی‌توده.

مقدمه

می‌شوند (Shannon et al., 2022). تخمین زده می‌شود که ۶۱±۸۶۱ گیگاتن کربن در جنگل‌های جهان ذخیره شده است که از این مقدار، ۱۱۹±۶ گیگاتن به جنگل‌های معتدله

جنگل‌ها به دلیل ذخیره کربن در خاک، زی‌توده و خشک‌دار به‌عنوان حوضچه‌های بزرگ و مهم کربن شناخته

(Mohammadnezhad Kiasari et al., 2020).

شروع تجزیه چوب در درجه اول توسط قارچ‌ها و با سرعت بسیار کم انجام می‌شود. از این رو، تجزیه کامل یک درخت ممکن است چندین دهه طول بکشد. فرایندهای اصلی درگیر در تجزیه خشک‌دار شامل تنفس، تبدیل، تکه‌تکه شدن و شست‌وشو هستند. ارزیابی الگوی جریان کربن آلی محلول از خشک‌دارهای راش اروپایی (*Fagus sylvatica* L.) به خاک در جنگل‌های آلمان بیانگر نقش پوسیدگی خشک‌دار در افزایش کربن محلول خاک بود (Kahl et al., 2012). بررسی تأثیر خشک‌دار بر ویژگی‌های زیست‌شیمیایی و ذخیره کربن خاک در جنگل‌های لهستان نشان داد که تجمع کربن در خاک، تحت تأثیر عوامل زیستی مانند نوع خشک‌دار، گونه درختی و درجه پوسیدگی است (Błońska et al., 2017). در ارزیابی اثرات فاصله و درجه پوسیدگی خشک‌دار سفیدپلت (*Populus caspica* (Bornm.) Bornm.) بر ویژگی‌های شیمیایی خاک در جنگل‌های استان گیلان، بیشینه این ویژگی‌ها به‌ویژه درصد کربن در خاک اطراف خشک‌دار با درجه پوسیدگی چهار مشاهده شد (Fallahchai et al., 2018).

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مقدار کربن خاک در توده‌های جنگلی با خشک‌دار، به‌طور معنی‌داری بیشتر از توده‌های بدون خشک‌دار بوده است (Minnich et al., 2021; Hollands et al., 2022). با این حال، ارتباط ذخیره کربن با مؤلفه‌های دیگر خاک که خود تحت تأثیر خشک‌دار هستند، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی‌های خاک مانند بافت، نوع، pH و رطوبت بر مقدار ماده آلی نگهداری‌شده در خاک (Matus, 2021) و نیز بر سرعت فرایندهای تجزیه که ممکن است کربن را آزاد کنند، تأثیر می‌گذارند. محتوای سیلت و رس خاک، ترکیبات آلی را از طریق جذب سطحی دریافت و تثبیت می‌کنند (Matus, 2021). کاهش pH و افزایش رطوبت خاک می‌تواند سبب کاهش سرعت تجزیه شود که در نتیجه آن، مقدار ماده آلی خاک افزایش می‌یابد (Hagemann et al., 2010). پژوهش‌های متعددی نیز به نقش نیتروژن در افزایش مقدار

تعلق دارد (Pan et al., 2011). مقدار کربن ذخیره‌شده در خاک‌ها و زی‌توده در انواع مختلف جنگل‌ها متفاوت است. کربن ذخیره‌شده در زی‌توده و خاک جنگل‌های استوایی به ترتیب ۵۶ و ۳۲ درصد تخمین زده است، درحالی‌که این مقدار در زی‌توده جنگل‌های شمالی و معتدله به ترتیب ۲۰ و ۳۷ درصد و در خاک آن‌ها به ترتیب حدود ۶۰ و ۴۹ درصد هستند (Morison et al., 2012). همچنین، مقداری از کربن در بستر جنگل و نیز خشک‌دارها باقی می‌ماند که این مقدار حدود هشت درصد (73 ± 6 گیگاتن) برآورد شده است (Pan et al., 2011). خشک‌دار، مخزن قابل توجهی از کربن را در بوم‌سازگان‌های جنگلی تشکیل می‌دهد (Minnich et al., 2021; Zou et al., 2021). آن‌ها به شکل سرپا، افتاده یا کنده در سطح جنگل‌ها حضور دارند. خشک‌دارها بر مبنای اهداف مورد نظر در درجه‌های مختلف پوسیدگی طبقه‌بندی می‌شوند (Shannon et al., 2022). در برنامه‌ریزی مدیریت جنگل در بسیاری از کشورهای پیشرفته و به‌منظور افزایش تنوع زیستی گیاهی و جانوری و بهبود کیفیت و حاصلخیزی خاک‌های جنگلی، حجم خشک‌دارها در طبقه‌های مختلف پوسیدگی برآورد می‌شوند.

در ایران، آمار جامعی از نوع و مقدار خشک‌دارهای موجود در مجموعه جنگل‌های هیرکانی در مرحله‌های مختلف پوسیدگی وجود ندارد، اما در پژوهش‌های موردی، وضعیت کمی و کیفی خشک‌دار در مراحل مختلف تحولی بررسی شده است (Sefidi & Mohadjer, 2009; Parhizkar et al., 2011). بررسی پراکنش درختان بادافتاده در جنگل‌های هیرکانی حاکی از حجم زیاد خشک‌دارها و ارتباط آن‌ها با مقدار کربن ذخیره‌شده در بستر این بوم‌سازگان‌ها بود (Shabani & Akbarinia, 2017). این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که پس از جلوگیری از قطع و بهره‌برداری درختان در جنگل‌های هیرکانی، حجم زیادی از خشک‌دار در سطح این جنگل‌ها باقی مانده است، درحالی‌که پیش از اجرای قانون منع قطع توصیه می‌شد که فقط ۱۰ تا ۲۰ درصد از خشک‌دارها در سطح جنگل حفظ شوند و بقیه آن‌ها با نشانه‌گذاری از جنگل خارج شوند

شالی زمین در شهرستان گالیکش و در شرق استان گلستان قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این منطقه شامل $38^{\circ} 55'$ تا $41^{\circ} 55'$ طول شرقی و $17^{\circ} 37'$ تا $21^{\circ} 37'$ عرض شمالی است (شکل ۱). توده مورد مطالعه در ارتفاع متوسط ۱۲۵۰ متر از سطح دریا، شیب بین صفر تا ۳۰ درصد و جهت عمومی شمالی قرار گرفته است. تیپ و بافت خاک غالب این منطقه به ترتیب قهوه‌ای جنگلی و لومی سیلنتی و عمق آن تا ۸۵ سانتیمتر ثبت شده است. همچنین، pH خاک، قلیایی و هوموس از نوع مول با لاش‌برگی به ضخامت دو الی سه سانتی‌متر بودند. نفوذپذیری خاک از ضعیف تا خوب متغیر است و درصد آهک فعال در خاک منطقه، ۱۵ تا ۴۲ درصد گزارش شد (Anonymous, 2013). همچنین تیپ غالب توده به صورت پهن‌برگ آمیخته با غالبیت مرز (Carpinus L. betulus) است. بلندمازو (Quercus castaneifolia C.A.Mey.)، افرا شیردار (Acer cappadocicum Gled.)، افرا پلت (Acer velutinum Boiss.)، بارانک (Sorbus Acer campestre) (L.)، افرا کرب (Acer torminalis (L.) Crantz)، افرا کرکو (Acer monspessulanum L.)، نمدار (Tilia L.)، افرا کرکو (Acer platyphyllos Scop.)، ون (Fraxinus excelsior L.) و انجیلی (Parrotia persica C.A.Mey.) نیز گونه‌های همراه را تشکیل می‌دادند (Anonymous, 2013).

روش پژوهش

به منظور مدل‌سازی تأثیر خشک‌دار افتاده بر موجودی کربن خاک، سطح یک هکتار از توده مورد نظر مشخص شد. سپس، همه خشک‌دارهای با طول بیشتر از ۱/۵ متر و قطر بیشتر از ۷/۵ سانتیمتر شناسایی و ثبت شدند (Guo et al., 2006) و مطابق طبقه‌بندی Aakala و همکاران (۲۰۰۸) در درجه بوسیدگی یک تا پنج قرار گرفتند. در صورت وجود روشنه تاجی، مساحت آن با اندازه‌گیری قطرهای کوچک و بزرگ فضای باز روشنه تاجی محاسبه شد (Runkle, 1982). در این روش، فضای منطبق بر حاشیه تاج پوشش بر روی زمین، مبنای اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. براین اساس و باتوجه به مساحت روشنه‌های ثبت‌شده، روشنه‌ها در سه

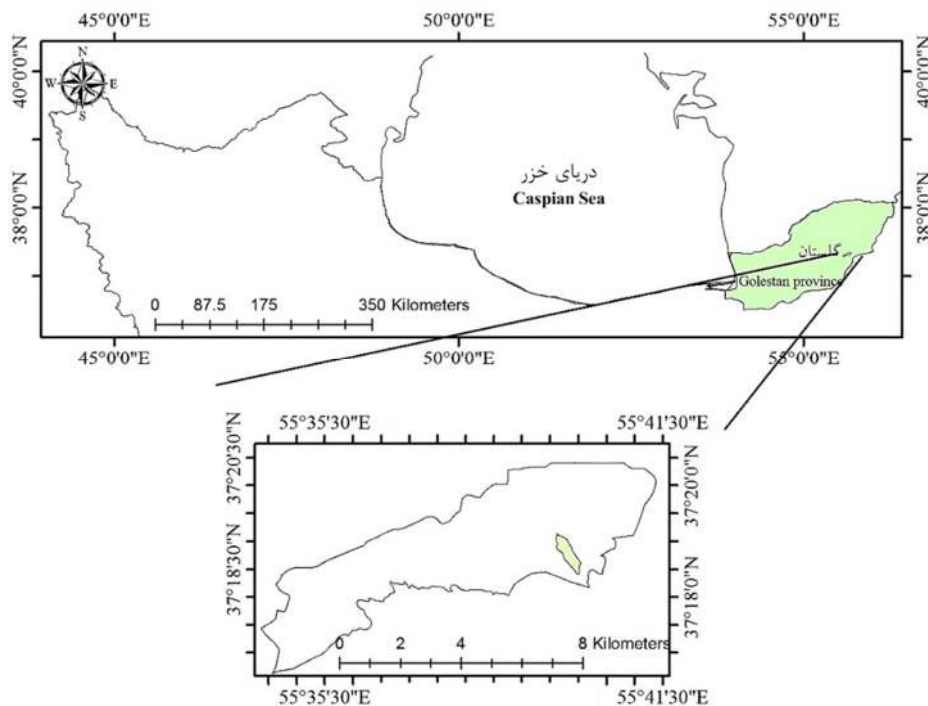
ترسیب کربن خاک اشاره کرده‌اند (Zou et al., 2021). با این حال، نتایج گزارش شده در مورد ارتباط بین مقدار موجودی کربن خاک با نیتروژن و فسفر متناقض بوده‌اند (Kicklighter et al., 2019). در این راستا به‌کارگیری روش‌های مدل‌سازی، راه‌حلی امیدوارکننده برای ارزیابی تغییر کربن و کشف ارتباط آن با مؤلفه‌های محیطی دیگر محسوب می‌شوند. در برآورد موجودی کربن خاک در اراضی کشور چک با استفاده از مدلی ترکیبی متشکل از داده‌های اقلیمی و محیط‌زیستی، نتایج بسیار موفقی گزارش شد (Balkovič et al., 2020). مدلی موسوم به مدل زراعی شبکه‌ای نیز بیانگر دقت بسیار مطلوب مدل برای برآورد موجودی کربن در مقیاس بزرگ و تکرار آزمایش‌ها بود (Smith et al., 2020). علی‌رغم عملکرد قوی مدل‌های مذکور، این نگرانی وجود دارد که دقت این روش‌ها در مقیاس محلی و با داده‌های ورودی محدود، چالش‌برانگیز باشد. روش‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی، ضمن ارائه بهترین عملکرد در مجموعه‌ای بزرگ از مشاهده‌ها، قابلیت مطلوبی در مدل‌سازی با مشاهده‌های محدود ارائه می‌کنند (Han et al., 2021). درختان تصمیم، بلوک‌های اصلی سازنده یک الگوریتم جنگل تصادفی هستند. یکی از ویژگی‌های اساسی این الگوریتم، اندازه‌گیری آسان اهمیت نسبی هر ویژگی در زمان پیش‌بینی است (Breiman, 2021). همچنین، ارائه نمودار از روند تغییرپذیری متغیر پاسخ در ارتباط با هر متغیر مستقل، امکان تجزیه و تحلیل شیب تغییرات را فراهم می‌کند. به دلیل ناهمگنی زیاد و وجود موزاییک‌های متنوع در یک سطح محدود از جنگل‌های هیرکانی، مدل‌سازی پویایی کربن خاک در مقیاس محلی، کاری دشوار است. هدف اصلی پژوهش پیش‌رو، مدل‌سازی موجودی کربن خاک تحت تأثیر تغییرپذیری ویژگی‌های خاک زیر خشک‌دار در جنگل‌های استان گلستان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۳۵ هکتار به‌عنوان قطعه مدیریت‌نشده از سری چهار طرح جنگل‌داری لوه با نام

اندازه کمتر از ۲۰۰ متر مربع (کلاس اول: روشنه کوچک)، از ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر مربع (کلاس دوم: روشنه متوسط) و بیشتر از ۴۰۰ متر مربع (کلاس سوم: روشنه بزرگ) دسته‌بندی شدند.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه واقع در پارسل ۴۴ سری چهار لوه، استان گلستان

Figure 1. Case study located in parcel 44, series 4 Loveh, Golestan Province, Iran

استفاده شد (Vahedi et al., 2017):

$$SOX_i = B_i \times BD_i \times X_i\% \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه مذکور SOX نشان‌دهنده مقدار موجودی کربن در واحد سطح (گرم بر سانتی‌متر مربع)، B عمق لایه معدنی خاک برحسب سانتی‌متر، BD چگالی ظاهری خاک برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و X بیانگر ضریب مؤثر کربن هستند. درصد کربن آلی خاک به روش والکلی- بلاک و چگالی ظاهری خاک با روش سیلندر اندازه‌گیری شد. تعیین بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری صورت گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری درصد رطوبت خاک از روش وزنی استفاده شد. درصد نیتروژن خاک با استفاده از دستگاه کج‌دال به‌دست آمد. برای

برای اندازه‌گیری کربن آلی، چگالی ظاهری، درصد رطوبت، درصد نیتروژن، pH فسفر قابل جذب و بافت خاک، نمونه‌های خاک حتی‌الامکان از بخش بستر زیرین خشک‌دارهای موجود تا عمق ۱۵ سانتی‌متر برداشت شد. همچنین در فاصله ۵۰ متری از هر خشک‌دار و در زیر تاج پوشش بسته جنگل، نمونه خاک به‌عنوان موقعیت شاهد جمع‌آوری شد. بدین ترتیب، مجموع ۳۰ نمونه خاک از منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. قابل‌ذکر است که نمونه‌های مورد نظر برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری به‌صورت جداگانه و با استفاده از سیلندرهای استاندارد برداشت شدند. برای تخمین موجودی کربن خاک با احتساب چگالی ظاهری خاک و عمق لایه معدنی نمونه‌برداری‌شده از رابطه (۱)

و انجیلی (درجه پوسیدگی پنج) هرکدام در سه تکرار بودند. بافت خاک تمامی نمونه‌های مورد بررسی، لومی سیلتی تعیین شد. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که بین خشک‌دار ممرز با درصد نیتروژن، درصد رطوبت و فسفر قابل‌جذب و نیز بین خشک‌دارهای بلندمازو و شیردار با درصد کربن و نسبت کربن به نیتروژن، ارتباط نزدیکی وجود دارد (شکل ۲-الف). درجه پوسیدگی پنج با درصد کربن و نسبت کربن به نیتروژن، همبستگی زیادی نشان داد (شکل ۲-ب). همچنین، بین روشنه‌های بزرگ و درصد نیتروژن و فسفر قابل‌جذب، رابطه معنی‌داری مشاهده شد (شکل ۲-پ). خاک موقعیت اطراف خشک‌دار نسبت به مناطق شاهد، ارتباط معنی‌داری با کربن، نسبت کربن به نیتروژن و درصد رطوبت نشان داد (شکل ۲-ت). قابل‌ذکر است که درصد توجیه تغییرات هر یک از محورهای مورد بررسی در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در جدول ۱ آمده است.

به منظور اجرای مدل جنگل تصادفی در گام نخست، مدل با همه متغیرها اجرا شد. از این بین، فقط متغیرهایی که تغییر در مقدار آن‌ها سبب افزایش خطا می‌شد، انتخاب شدند. در نهایت، مدل نهایی با نه متغیر اجرا شد. مدل جنگل تصادفی به دست آمده حدود ۵۴ درصد از تغییرات موجودی کربن خاک را با استفاده از متغیرهای منتخب مورد استفاده توجیه می‌کند (جدول ۲). اهمیت نسبی متغیرهای تبیینی در جدول ۳ ارائه شده است.

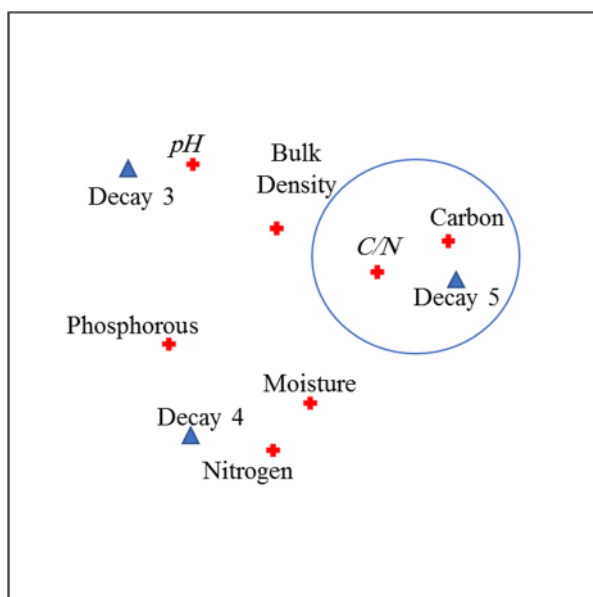
در شکل ۳، نمودار وابستگی جزئی متغیرهای مورد استفاده بر مقدار موجودی کربن خاک آمده است. بر این اساس، خاک بستر زیرین خشک‌دار شیردار و بلندمازو (شکل ۳-الف)، درجه پوسیدگی پنج (شکل ۳-ب)، کلاس یک روشنه (شکل ۳-پ) و موقعیت اطراف خشک‌دار نسبت به شاهد (شکل ۳، ت) بیشترین تأثیر را بر افزایش موجودی کربن خاک داشتند. بیشترین مقدار موجودی کربن در مناطق با درصد رطوبت بین ۳۰ تا ۳۳ درصد ثبت شده است (شکل ۳-ث). با افزایش نیتروژن تا ۰/۱۴ درصد، مقدار موجودی کربن کاهش یافت.

تعیین اسیدیته خاک، ابتدا از همه نمونه‌ها گل اشباع تهیه شد و بعد از گذشت ۲۴ ساعت با استفاده از دستگاه pH متر، pH آن‌ها در گل اشباع به دست آمد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، فسفر قابل‌جذب آن‌ها در طول موج ۷۸۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Ali Ehyaei & Behbahanizadeh, 1993).

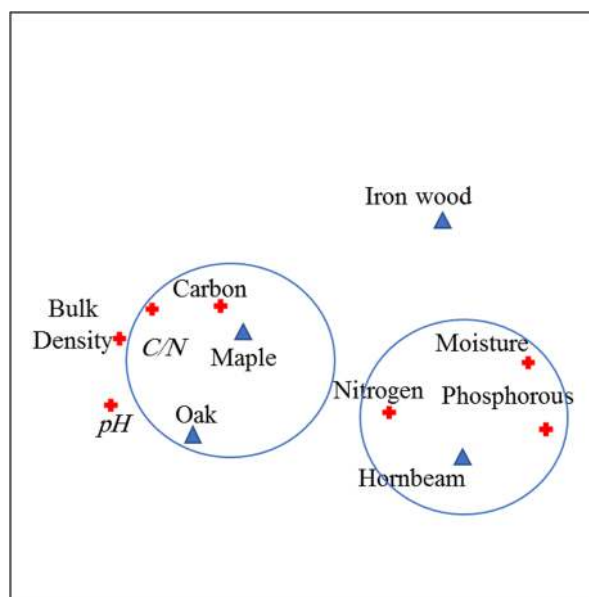
به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها ابتدا رابطه بین نوع گونه خشک‌دار، درجه پوسیدگی آن، اندازه روشنه و موقعیت‌های مورد بررسی با مؤلفه‌های خاکی ذکر شده با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بررسی شد. برازش نمونه‌ها برای روش جنگل تصادفی با استفاده از بسته randomForest انجام گرفت. بسته مذکور، رایج‌ترین روش برای پیاده‌سازی مدل جنگل تصادفی است که در کنار تنظیم‌های ساده و کاربرپسند، اهمیت نسبی متغیرهای مورد بررسی را با دقت زیادی محاسبه می‌کند (Breiman, 2001). یک جنگل تصادفی، مجموعه‌ای از درختان هرس نشده است که هر درخت با الگوریتم تقسیم بازگشتی به دست می‌آید. الگوریتم ساخت یک جنگل تصادفی با T درخت از یک مجموعه داده با n مشاهده و p متغیر تبیینی انجام می‌گیرد. به دلیل اندازه بسیار بزرگ یک جنگل تصادفی، تفسیر آن نیز بسیار دشوار است، بنابراین باید اطلاعات آن با استفاده از شاخص‌های کمی خلاصه شوند. یکی از این شاخص‌ها، اهمیت متغیر است که شاخصی برای رتبه‌بندی متغیرها برحسب اهمیت آن‌ها در اثرگذاری روی پاسخ است. در پژوهش پیش‌رو نیز براساس این شاخص، مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار انتخاب شد. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با نرم‌افزار PC-ORD نسخه ۴/۱۷ و روش جنگل تصادفی با استفاده از نرم‌افزار R نسخه ۴/۰/۲ انجام شد.

نتایج

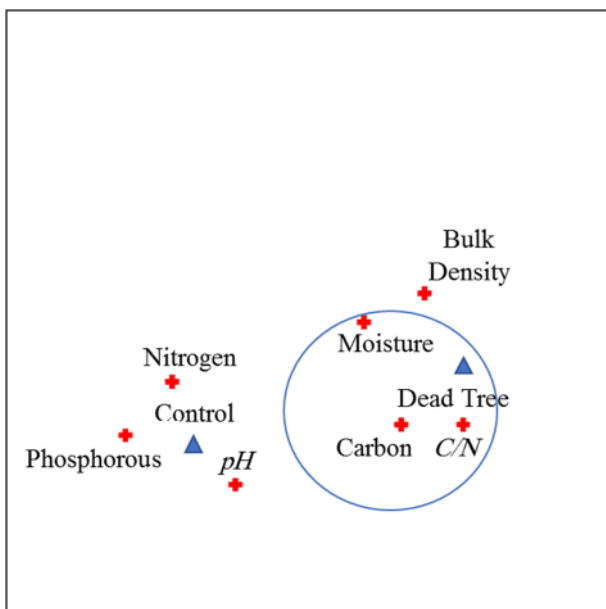
۱۵ خشک‌دار نمونه در پژوهش پیش‌رو متعلق به گونه‌های ممرز (درجه پوسیدگی چهار)، بلندمازو (در دو درجه پوسیدگی سه و پنج)، شیردار (درجه پوسیدگی سه)



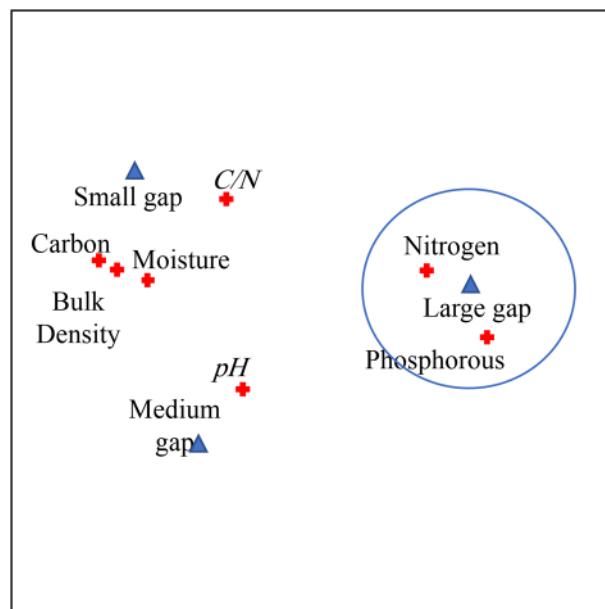
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۲- تجزیه به مؤلفه اصلی مشخصه‌های خاک مورد مطالعه

Figure 1. The principal component analysis (PCA) of studied soil properties

گفت که با افزایش pH از مقدار موجودی کربن خاک کاسته می‌شود (شکل ۳-ح). اگرچه در ابتدا با افزایش فسفر قابل جذب تا ۱۵/۵ پی‌پی‌ام، ذخیره کربن خاک افزایش می‌یابد، اما پس‌ازاین مقدار، مقدار موجودی کربن به شدت کم می‌شود (شکل ۳-خ).

پس‌ازاین مقدار تا درصد نیتروژن ۰/۲۲، منحنی موجودی کربن به شدت افزایش یافت (شکل ۳-ج). بیشترین تأثیر نسبت کربن به نیتروژن بر افزایش ذخیره کربن خاک در مقدار عددی بیشتر از هشت مشاهده شد (شکل ۳-چ). اگرچه در نسبت کربن به نیتروژن بیشتر از نه، ذخیره کربن خاک با شیبی ملایم افزایشی یافت. در مجموع با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان

جدول ۱- ارتباط بین نوع گونه خشک‌دار، درجه پوسیدگی، اندازه روشنه و موقعیت با محورهای تجزیه به مؤلفه اصلی

Table 1. Relationship between dead tree species, decay classes, gap sizes and position with PCA axes

مؤلفه Parameter	محور اول PCA 1	محور دوم PCA 2
گونه خشک‌دار Dead tree species	22.82	7.31
درجه پوسیدگی خشک‌دار Decay class	19.91	8.2
اندازه روشنه Gap size	25.52	7.29
موقعیت Position	21.19	8.62

جدول ۲- شاخص‌های عملکرد مدل جنگل تصادفی

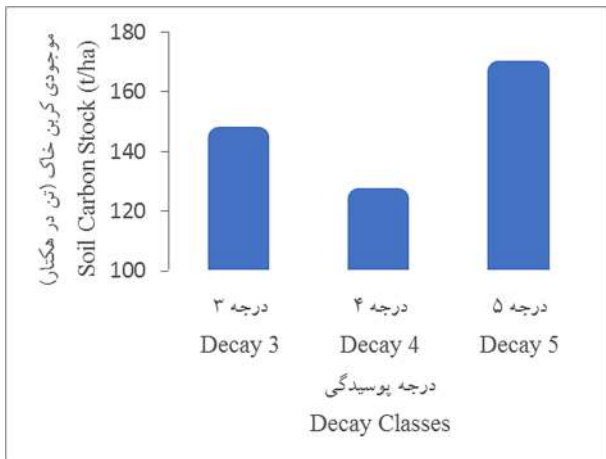
Table 2. Performance criteria of random forest model

شاخص Criteria	مقدار Quantity
ضریب تبیین R squared	0.54
ضریب تبیین تعدیل شده Adjusted R squared	0.44
مجذور میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)	0.01

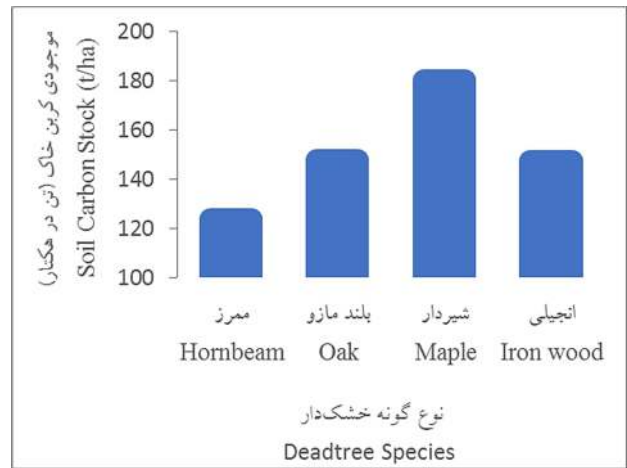
جدول ۳- اهمیت نسبی متغیرها مطابق مدل جنگل تصادفی

Table 3. Variable's importance according to random forest model

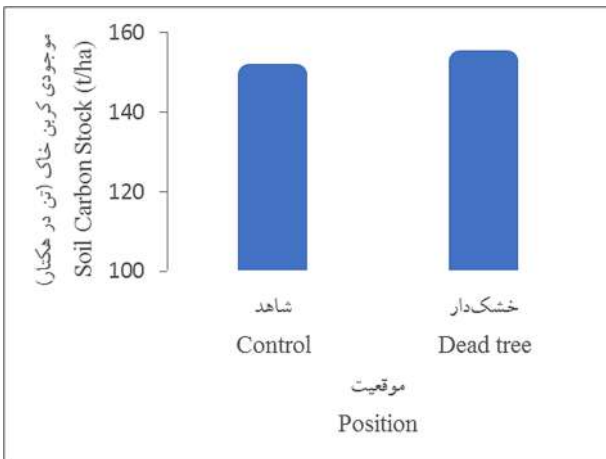
مؤلفه Parameter	اهمیت نسبی متغیر Variable's importance
نوع گونه خشک‌دار Dead tree species	1478.726
درجه پوسیدگی خشک‌دار Decay class	665.248
اندازه روشنه Gap size	496.159
موقعیت Position	115.834
درصد رطوبت خاک Soil Moisture (%)	1363.717
درصد نیتروژن Nitrogen (%)	2162.154
نسبت کربن به نیتروژن C/N ratio	4469.068
اسیدیته pH	1911.249
فسفر قابل جذب (پی‌پی‌ام) Available phosphorous (ppm)	1142.588



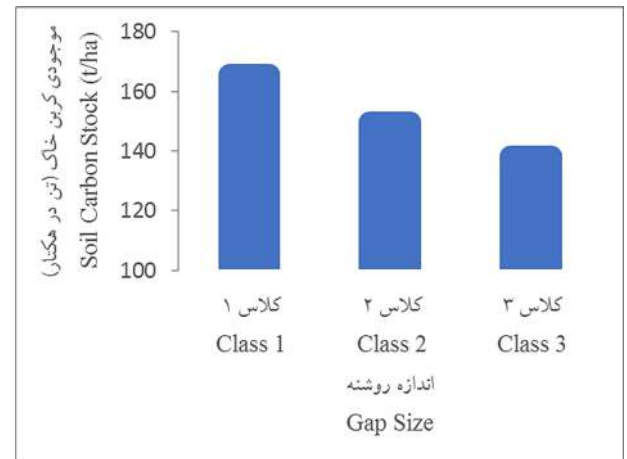
(ب)



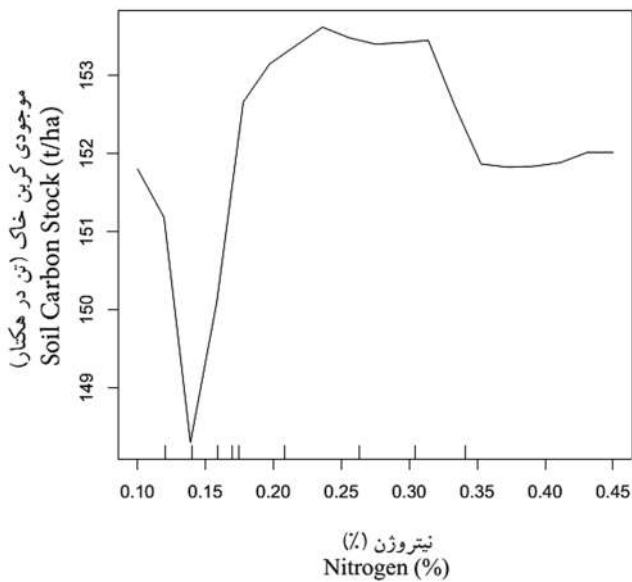
(الف)



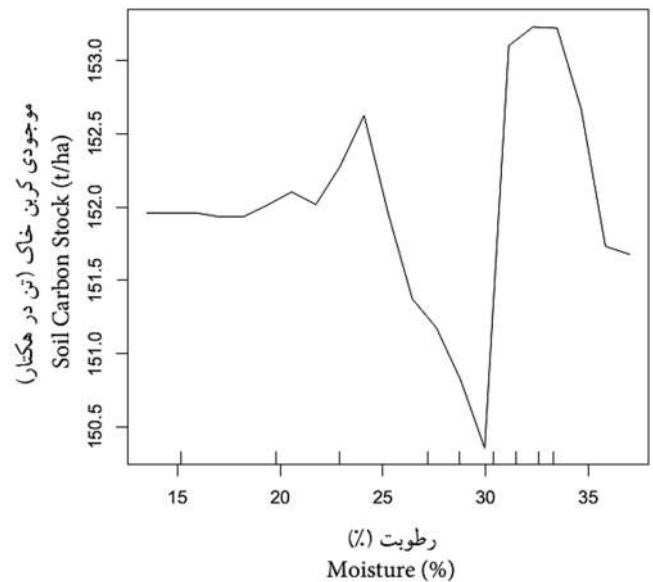
(ت)



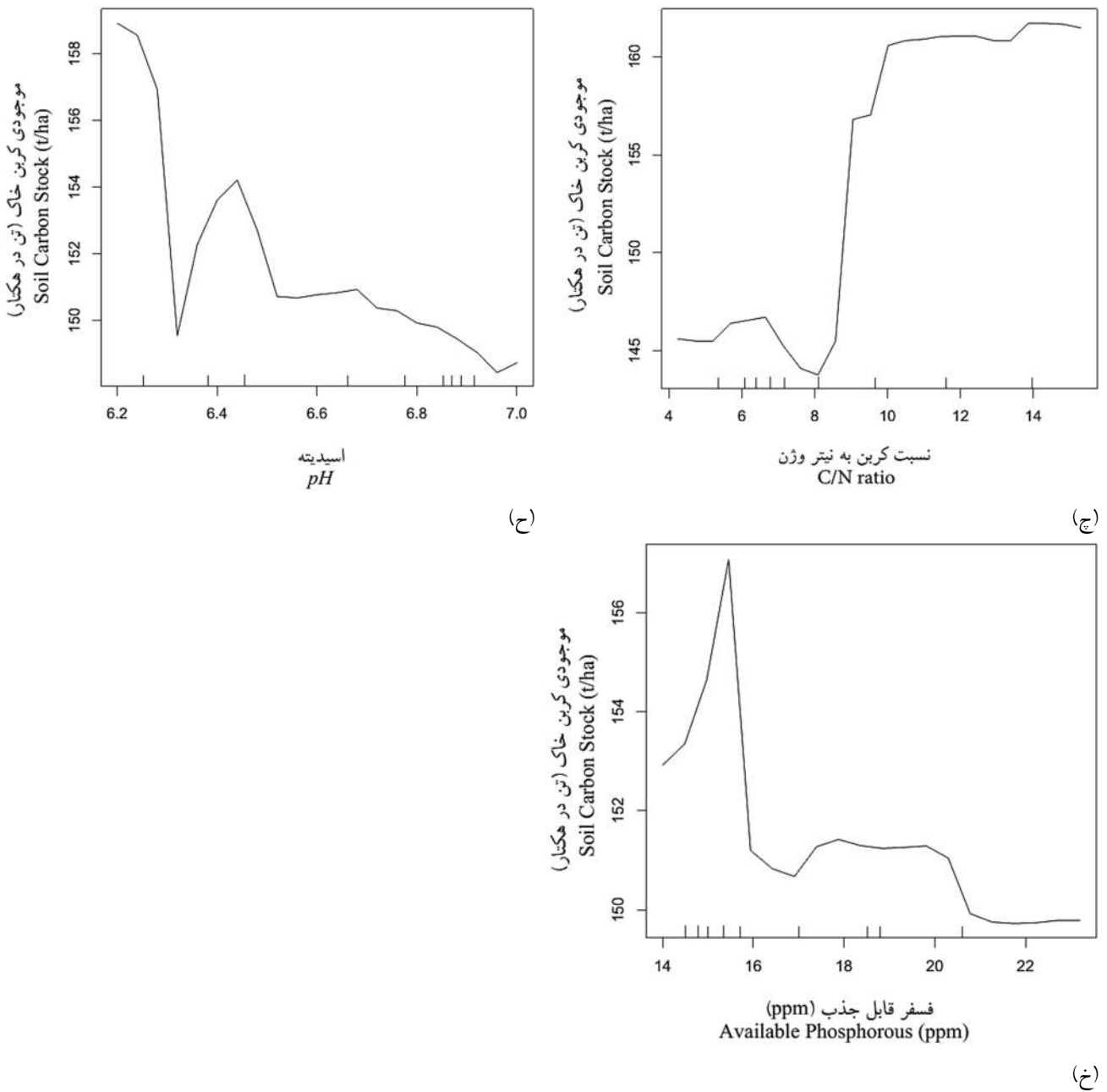
(پ)



(ج)



(ث)



شکل ۳- وابستگی جزئی متغیرهای مورد استفاده بر موجودی کربن خاک براساس مدل جنگل تصادفی
Figure 3. Partial dependency plot of variables on soil carbon stock according to random forest model

از بافت‌های ریزودرشت به خاک، هدررفت کربن کاهش و حفاظت از خاک بهبود می‌یابد (Dean et al., 2020). در پژوهش پیش‌رو، به‌منظور درک ارتباط بین مقدار ذخیره کربن و ویژگی‌های خاک اطراف خشک‌دار از روش جنگل تصادفی استفاده شد. دقت مدل برآورد شده ۵۴ درصدی و مجذور میانگین مربعات خطای آن برابر ۱/۱۲ بود. Vangi

بحث

درختان، بزرگ‌ترین منبع ذخیره کربن در بوم‌سازگان‌های خشکی محسوب می‌شوند. لاشه‌ریزی درختان و پوشش گیاهی، منبع اصلی انتقال کربن به خاک است. پس از ایجاد خشک‌دار نیز اندام‌های مختلف درختان به خاک بازگردانده می‌شوند. بر این اساس با انتقال ماده آلی و لاشه برگ بیشتر

مواد آلی از بینه به خاک ذکر کردند. Sefidi و همکاران (۲۰۱۶) نیز یکی از عوامل مؤثر بر زمان تجزیه خشک‌دار گونه‌های مختلف را ترکیب شیمیایی بینه عنوان کردند. در نتیجه، این امکان وجود دارد که برآیند عوامل ذکر شده سبب کاهش نرخ تجزیه و پوسیدگی در برخی خشک‌دارها شود. به دنبال آن، انتقال ماده آلی از بافت پوسیده به خاک با سرعت کمی انجام گیرد. همچنان‌که در پژوهش پیش‌رو، ذخیره کربن خاک زیرین خشک‌دارهای با درجه پوسیدگی چهار، کمتر از خشک‌دارهای با درجه پوسیدگی سه بود.

بر اساس نتایج دیگر پژوهش پیش‌رو، بیشینه موجودی کربن به مساحت‌های کوچک روشنه تعلق داشت. چنانچه با افزایش سطح روشنه از ذخیره کربن خاک کاسته شد. برخلاف این یافته‌ها در بررسی تنوع خاک در یک توده راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی، بیشترین مقدار ماده و کربن آلی در روشنه‌های با سطح بیشتر مشاهده شد (Kooch, 2012). در پژوهش مذکور، وجود رس بیشتر در بافت خاک روشنه‌های بزرگ، عامل حفاظت از ذخیره کربن آلی عنوان شد. در پژوهش پیش‌رو، بافت خاک منطقه مورد مطالعه از نوع لومی سیلتی بود که به علت نزدیکی محل‌های نمونه‌برداری، تغییر محسوسی بین مؤلفه‌های بافت خاک در موقعیت‌های مختلف مشاهده نشد. با این حال، خاک محدوده روشنه‌های کوچک علاوه بر جذب ماده آلی از خشک‌دارهای موجود، از لاشه‌ریزی درختان حاشیه روشنه نیز بهره‌مند می‌شود. از طرف دیگر، روشنه‌های کوچک نسبت به روشنه‌های بزرگ، آب‌شویی کمتری دارند که سبب حفظ بیشتر بقایای گیاهی می‌شود. این عامل، خود به افزایش موجودی کربن در این روشنه‌ها کمک می‌کند (Kooch, 2012).

موجودی کربن خاک اطراف خشک‌دار نسبت به مناطق شاهد، بیشتر بود. انباشت ماده آلی منتج از خشک‌دار سبب افزایش ذخیره کربن در این عرصه‌ها می‌شود. بررسی اثرات درختان بزرگ بر ذخیره کربن در جنگل‌های آمریکا حاکی از افزایش مقدار کربن در خاک نزدیک خشک‌دارها نسبت به مناطق شاهد بود (Mildrexler et al., 2020)، اما در

و همکاران (۲۰۲۳) در مدلسازی ذخیره کربن در جنگل‌های ایتالیا، دقت مدل برآورد شده با خطای ۲۸ درصد را مناسب ذکر کردند. Abebe و همکاران (۲۰۲۳) نیز با ارائه مدل تخمین پتانسیل ذخیره کربن در جنوب غرب اتیوپی، مدل‌های با ضریب تبیین کمتر از ۵۰ درصد را نیز مطلوب عنوان کردند. در علوم طبیعی، امکان جمع‌آوری همه اطلاعات مورد نیاز برای ساخت مدلی که بتواند همه پیچیدگی‌های بوم‌سازگان مورد نظر را توصیف کند وجود ندارد، بنابراین ارائه مدل‌هایی با دقت کم، طبیعی به نظر می‌رسد (Hogland & Affleck, 2021). همچنان‌که ثبت دقت‌های زیاد در پژوهش‌های علوم طبیعی می‌تواند در نتیجه بیش‌برازش مدل‌ها باشد. با استناد به نتایج پژوهش پیش‌رو، نسبت کربن به نیتروژن، درصد نیتروژن و pH خاک، بیشترین تأثیر را بر موجودی کربن خاک اطراف خشک‌دار داشتند. اگرچه این‌طور به نظر می‌رسد که با توجه به نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، هر سه متغیر تبیینی مورد نظر تحت تأثیر خشک‌دار قرار داشتند.

ذخیره‌سازی کربن خاک به نوع گونه، فرم و درجه پوسیدگی خشک‌دار وابسته است (Błońska et al., 2019). چنانچه طبق یافته‌های پژوهش پیش‌رو، بیشینه موجودی کربن در خاک بستر زیرین خشک‌دار شیردار و سپس، بلندمازو مشاهده شد. همچنین، مقدار ذخیره کربن در خاک اطراف خشک‌دار با درجه‌های مختلف پوسیدگی متغیر بود. در بررسی تأثیر تجزیه خشک‌دار بر ترسیب کربن آلی خاک در جنگل‌های استونی و لهستان نیز رابطه‌ای قوی بین آنزیم‌های تجزیه‌کننده بافت چوبی، درجه پوسیدگی و مقدار کربن خاک گزارش شد (Błońska et al., 2019). به عبارت دیگر، با افزایش تجزیه مواد آلی تنه، موجودی کربن خاک افزایش می‌یابد. گفتنی است که تجزیه مواد آلی از تنه و انتقال آن به خاک به شرایط محیطی مانند دما، رطوبت، pH و بسیاری از عوامل دیگر مانند نرخ پوسیدگی خشک‌دار وابسته است (Wiesmeier et al., 2016). Alidadi و همکاران (۲۰۱۴) تفاوت ضریب پوسیدگی بین خشک‌دار گونه‌های مختلف را عاملی اثرگذار در برگشت

کوچک طی مرحله تحولی تخریب و با ایجاد خشک‌دار و روشنه استقرار می‌یابند. حفظ خشک‌دارهای ایجادشده به‌ویژه خشک‌دارهای با قطر زیاد می‌توانند نقش فزاینده‌ای در یویایی چرخه نیتروژن و به‌دنبال آن، تأمین موجودی کربن خاک داشته باشند.

یافته‌های دیگر پژوهش پیش‌رو حاکی از افزایش موجودی کربن خاک در نمونه‌های با نسبت زیاد کربن به نیتروژن بود. نسبت کربن به نیتروژن خاک به‌عنوان شاخص کیفیت و حاصلخیزی خاک جنگلی، ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی خاک دارد (Lehmann & Kleber, 2015). در تناقض با نتایج پژوهش پیش‌رو، ارزیابی اثرات اقلیم و نسبت کربن به نیتروژن بر تجمع کربن آلی خاک در جنگل‌های چین حاکی از تأثیر منفی این نسبت بر ذخیره کربن خاک بود (Zhou, Q. et al., 2019). در پژوهش مذکور، نوع بافت خاک، شرایط تنوع گیاهی و نسبت کربن به نیتروژن گیاهان زیرآشکوب به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده در کربن آلی خاک عنوان شد. از این‌رو، حضور درختان تثبیت‌کننده نیتروژن می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش نسبت کربن به نیتروژن و افزایش تجمع مواد آلی خاک داشته باشند (Johnson & Curtis, 2001). در پژوهشی دیگر، بررسی اثرات ترشح ریشه گیاهان بر کربن خاک نشان داد که اگرچه افزایش گونه‌های گیاهی تثبیت‌کننده نیتروژن سبب کاهش نسبت کربن به نیتروژن در خاک شد، اما تجمع کربن خاک افزایش نیافت (Keiluweit et al., 2015).

مطابق نتایج دیگر پژوهش پیش‌رو، موجودی کربن خاک به‌دنبال افزایش pH کاهش یافت. در تأیید این یافته‌ها، Dai و همکاران (۲۰۱۹) و W. Zhou و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که همبستگی منفی معنی‌داری بین مقدار ماده و کربن آلی با pH خاک وجود دارد. pH به‌عنوان یک ویژگی شیمیایی مهم خاک، بسیاری از ویژگی‌های خاک را کنترل می‌کند و تحت تأثیر آب‌وهوا و سیستم بافر خاک و گیاهان قرار دارد (Hong et al., 2019).

کمیت و کیفیت ماده آلی اضافه‌شده به خاک، سیستم

بررسی ذخیره کربن خشک‌دار در جنگل‌های مالزی، مقدار کربن کمتری در مناطق دارای خشک‌دار گزارش شد (Pfeifer et al., 2015). کاهش لاشه‌ریزی درختان و قرارگیری خشک‌دار در مراحل ابتدایی پوسیدگی را می‌توان دلیل کاهش ذخیره کربن خاک در آن پژوهش عنوان کرد.

بیشترین ذخیره کربن در مناطق مورد مطالعه پژوهش پیش‌رو به خاک زیرین خشک‌دار با رطوبت بین ۳۰ تا ۳۳ درصد تعلق داشت. در محدوده‌های رطوبتی کمتر و بیشتر از این مقدار، موجودی کربن خاک کمتر بود. نتایج متنوعی در مورد رابطه موجودی کربن و رطوبت خاک گزارش شده است. بررسی تأثیر انواع مدیریت جنگل بر ذخیره کربن خاک در جنگل‌های کنیا نشان داد که موقعیت‌های مرطوب و خنک نسبت به گرم و خشک، شرایط اقلیمی مناسب‌تری برای افزایش ذخیره کربن هستند (Tarus & Nadir, 2020). به‌طور کلی، بسیاری از اثرات رطوبت بر تجزیه مواد آلی خاک و تولید اولیه در یک محدوده مطالعاتی کوچک، تحت تأثیر شرایط دمایی خرداقلیم قرار دارد (Fang et al., 2022).

در بررسی خاک بستر زیرین خشک‌دارهای نمونه مشخص شد که موجودی کربن با افزایش نیتروژن زیاد می‌شود. علت آن به افزایش زیاد ماده آلی به خاک زیر خشک‌دار برمی‌گردد. کاهش نیتروژن خاک، یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده حاصلخیزی خاک‌های جنگلی شناخته می‌شود. افزایش نیتروژن خاک برای ازدیاد طولانی‌مدت ذخیره کربن به‌منظور توسعه توده‌های جنگلی ضروری است (Terrer et al., 2018). Zou و همکاران (۲۰۲۱) اقدامات مدیریتی برای بهبود نیتروژن در راستای افزایش ترسیب کربن خاک را در توده‌های جنگل‌کاری جوان به‌ویژه در ۳۰ سال اول توصیه کردند. این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که به‌طور معمول طی عملیات جنگل‌شناسی، خشک‌دارهای سرپا و افتاده از سطح توده‌های مذکور خارج می‌شوند. برخلاف جنگل‌های اروپا و آمریکای شمالی، قدمت جنگل‌های هیرکانی زیاد است. توده‌های جوان در این بوم‌سازگان به‌صورت قطعه‌های

اندازه‌گیری‌های مکرر طی مراحل مختلف تحولی نیاز دارد، اما آنچه ضرورت پژوهش‌های بیشتر در بوم‌سازگان جنگلی هیرکانی را بیش‌ازپیش نمایان می‌کند، ظرفیت قابل‌ملاحظه موجودی کربن خاک در منطقه مورد مطالعه است. میانگین این متغیر در توده مورد مطالعه حدود ۱۵۳ تن در هکتار به‌دست آمد. همچنین، این توده از نظر تنوع درختی و گیاهی، بسیار غنی است، بنابراین شرایط این قطعه شاهد، الگوی مناسبی برای مقایسه با قطعه‌های مدیریت‌شده است.

امروزه با شناخت ارزش خشک‌دارها، مدیریت همگام با طبیعت، جایگاه ویژه‌ای در سیاست جنگل دارد. حضور خشک‌دار از گونه‌ها و شکل‌های مختلف در بوم‌سازگان جنگلی کهن مانند توده جنگلی مورد مطالعه، علاوه بر حفظ تنوع زیستی گیاهی و جانوری، افزایش غنای خاک‌های جنگلی را نیز به‌دنبال خواهد داشت. در شرایط کنونی که کارشناسان و مدیران حوزه منابع طبیعی در حال نگارش طرح جایگزین برای مدیریت جنگل‌های هیرکانی هستند، تدوین هر نوع طرح جنگلداری بدون تضمین حفظ خشک‌دارها سبب اختلال در ویژگی‌های ساختاری خاک و توده در جنگل‌های هیرکانی می‌شود. در نتیجه، ممکن است بقای این بوم‌سازگان کهن در آینده با چالش‌های جدی مواجه شود. براین اساس توصیه می‌شود که علاوه بر حفظ حجم مشخص از خشک‌دار در جنگل، تغییرات ماده آلی و ذخیره کربن خاک در قطعه‌های دائمی مستقر در اطراف خشک‌دار به‌منظور تضمین حفظ کیفیت خاک جنگل پایش شوند.

سیاسگزاری

این پژوهش، بخشی از یافته‌های پروژه ملی «سنجش و پایش ذخایر کربن جنگل‌های هیرکانی و ارسباران (فاز اول)» مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی ایران با شماره ۰۰۰۶۰-۰۹-۰۴۱-۰۵۳۳ است، بنابراین از همه دست‌اندرکاران اجرای پروژه مزبور، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

گسترش ریشه، فعالیت‌های میکروبی خاک و بسیاری از عوامل دیگر بر رابطه موجودی کربن و فسفر قابل‌جذب در خاک تأثیرگذار هستند (Wu et al., 2018). با افزایش مقدار فسفر قابل‌جذب در نمونه‌های خاک مورد مطالعه از ذخیره کربن کاسته شد. در پژوهش‌های متعددی، رابطه بین فسفر و موجودی کربن خاک بررسی شده است (Chen et al., 2015). در تأیید یافته‌های پژوهش پیش‌رو، بررسی پاسخ خشک‌دارها به افزودن مواد مغذی در یک جنگل جنب‌حاره‌ای در چین نشان داد که با افزایش مقدار فسفر قابل‌جذب از موجودی کربن خاک کاسته می‌شود (Wu et al., 2020). خاک اطراف خشک‌دار به دلیل تماس مستقیم با تکه‌های متلاشی‌شده درختان پوسیده، حاوی مقدار بسیار زیادی از عناصر غذایی مانند فسفر است که از طریق تجزیه به خاک برمی‌گردند. با این حال به نظر می‌رسد که افزایش تنفس میکروبی در این شرایط می‌تواند مقدار زیادی از کربن را به صورت دی‌اکسید کربن از محیط خاک خارج کند (Wu et al., 2020). در این میان، گسترش پوشش گیاهی زیرآشکوب، توسعه ریشه و به‌دنبال آن، تبدیل فسفر قابل‌جذب به فسفر آلی را نیز باید در نظر گرفت.

نتیجه‌گیری

پژوهش پیش‌رو سعی کرد تا با روش جنگل تصادفی، درک مناسبی از رابطه بین موجودی کربن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در خاک اطراف خشک‌دار انواع گونه‌های درختی با درجه‌های مختلف پوسیدگی نمایان کند. مدل مذکور توانست ۵۴ درصد از تغییرات موجودی کربن بین لایه‌های مورد بررسی را توجیه کند. دقت این مدل با توجه به تنوع حوضچه‌های کربن در بوم‌سازگان جنگلی و محدودیت‌های فنی و هزینه‌ای موجود، مطلوب است. دریافت اطلاعات تکمیلی مانند تعیین سهم زی‌توده میکروبی از نمونه‌های خاک و بافت خشک‌دار می‌تواند دریچه‌های بیشتری از فعل‌وانفعالات انتقال ماده آلی از خشک‌دار به خاک طی مراحل مختلف پوسیدگی را آشکار کند. گفتنی است که برآورد تغییرات موجودی کربن خاک به

fields after application of high-quality amendments. *Geoderma*, 337: 1116-1125.

- Dean, C., Kirkpatrick, J.B., Doyle, R.B., Osborn, J., Fitzgerald, N.B. and Roxburgh, S.H., 2020. The overlooked soil carbon under large, old trees. *Geoderma*, 376: 114541.
 - Fallahchai, M.M., Salehi, A., Shah Maghsoud, M., Ghorbanzadeh, N. and Hemmati, V., 2018. The effect of distance and decay degree of *Populus caspica* Bornm. dead trees on some soil chemical properties. *Iranian Journal of Forest*, 10(1): 197-205 (In Persian with English summary).
 - Fang, X., Zhu, Y.L., Liu, J.D., Lin, X.P., Sun, H.Z., Tang, X.H., ... and Yi, Z.G., 2022. Effects of moisture and temperature on soil organic carbon decomposition along a vegetation restoration gradient of subtropical China. *Forests*, 13(4): 578.
 - Guo, L.B., Bek., E. and Gifford, R.M., 2006. Woody debris in a 16-year old *Pinus radiata* plantation in Australia: Mass, carbon and nitrogen stocks, and turnover. *Forest Ecology and Management*, 228: 145-151.
 - Hagemann, U., Moroni, M.T., Gleißner, J. and Makeschin, F., 2010. Accumulation and preservation of dead wood upon Burial by bryophytes. *Ecosystems*, 13: 600-611.
 - Han, S., Williamson, B.D. and Fong, Y., 2021. Improving random forest predictions in small datasets from two-phase sampling designs. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 21: 322.
 - Hogland, J. and Affleck, D.L.R., 2021. Improving estimates of natural resources using model-based estimators: Impacts of sample design, estimation technique, and strengths of association. *Remote Sensing*, 13(19): 3893.
 - Hollands, C., Shannon, V.L., Sawicka, K., Vanguelova, E.I., Benham, S.E., Shaw, L.J. and Clark, J.M., 2022. Management impacts on the dissolved organic carbon release from deadwood, ground vegetation and the forest floor in a temperate oak woodland. *Science of the Total Environment*, 805: 150399.
 - Hong, S., Gan, P. and Chen, A., 2019. Environmental controls on soil pH in planted forest and its response to nitrogen deposition. *Environmental Research*, 172: 159-165.
 - Johnson, D.W. and Curtis, P.S., 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 140: 227-238.
 - Kahl, T., Mund, M., Bauhus, J. and Schulze, E.D., 2012. Dissolved organic carbon from European beech logs: patterns of input to and retention by surface soil. *Écoscience*, 19: 364-373.
 - Keiluweit, M., Bougoure, J.J., Nico, P.S., Pett-Ridge,
- منابع مورد استفاده**
- Aakala, T., Kuuluvainen, T., Gauthier, S. and De Grandpré, L., 2008. Standing dead trees and their decay-class dynamics in the northeastern boreal old-growth forests of Quebec. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4): 410-420.
 - Abebe, S., Gebeyehu, G., Teketay, D., Long, T.T. and Jayaraman, D., 2023. Allometric models for estimating biomass storage and carbon stock potential of *Oldeania alpina* (K. Schum.) Stapleton forests of south-western Ethiopia. *Advances in Bamboo Science*, 2: 100008.
 - Ali Ehyaei, M. and Behbahanizadeh, A.A., 1993. Description of soil chemical methods. *Journal of Soil and Water Research Institute*, 892: 128p (In Persian with English summary).
 - Alidadi, F., Marvie Mohadjer, M.R., Etemad, V. and Sefidi, K., 2014. Decay dynamics of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and hornbeam (*Carpinus betulus* L.) deadwood in mixed beech stands. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(4): 624-635 (In Persian with English summary).
 - Anonymous, 2013. Revision of forestry plan, series 4 Loveh, Shalizamin. General Office of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province, Forests, Range and Watershed Management Organization, Gorgan, Iran, 368p (In Persian).
 - Balkovič, J., Madaras, M., Skalský, R., Folberth, C., Smatanová, M., Schmid, E., ... and Obersteiner, M., 2020. Verifiable soil organic carbon modelling to facilitate regional reporting of cropland carbon change: A test case in the Czech Republic. *Journal of Environmental Management*, 274: 111206.
 - Błońska, E., Kacprzyk, M. and Spólnik, A., 2017. Effect of deadwood of different tree species in various stages of decomposition on biochemical soil properties and carbon storage. *Ecological Research*, 32: 193-203.
 - Błońska, E., Lasota, J., Tullus, A., Lutter, R. and Ostonen, I., 2019. Impact of deadwood decomposition on soil organic carbon sequestration in Estonian and Polish forests. *Annals of Forest Science*, 76: 102.
 - Breiman, L., 2001. Random forests. *Machin Learning*, 45(1): 5-32.
 - Chen, F.S., Niklas, K.J., Liu, Y., Fang, X.M., Wan, S.Z. and Wang, H., 2015. Nitrogen and phosphorus additions alter nutrient dynamics but not resorption efficiencies of Chinese fir leaves and twigs differing in age. *Tree Physiology*, 35: 1106-1117.
 - Dai, X., Zhou, W., Liu, G., Liang, G., He, P. and Liu, Z., 2019. Soil C/N and pH together as a comprehensive indicator for evaluating the effects of organic substitution management in subtropical paddy

- in degraded tropical forests? *Environmental Research Letters*, 10(4): 044019.
- Runkle, J.R., 1982. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. *Ecology*, 63: 1533-1546.
 - Sefidi, K. and Mohadjer, M.R., 2009. Amount and quality of dead trees (snag and logs) in a mixed beech forest with different management histories. *Journal of Forest and Wood Products*, 62(2): 191-202 (In Persian with English summary).
 - Sefidi, K., Esfandiari Dorabad, F. and Sharari, M., 2016. The decay time and rate determination in oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) dead trees in Asalem forests. *Journal of Environmental Studies*, 42(3): 551-563 (In Persian with English summary).
 - Shabani, S. and Akbarinia, M., 2017. Prediction spatial patterns of windthrow phenomenon in deciduous temperate forests using logistic regression and random forest. *Cerne*, 23(3): 387-394.
 - Shannon, V.L., Vanguelova, E.I., Morison, J.I.L., Shaw, L.J. and Clark, J.M., 2022. The contribution of deadwood to soil carbon dynamics in contrasting temperate forest ecosystems. *European Journal of Forest Research*, 141: 241-252.
 - Smith, P., Soussana, J.F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., ... and Klumpp, K., 2020. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26: 219-241.
 - Tarus, G.K. and Nadir, S.W., 2020. Effect of forest management types on soil carbon stocks in Montane forests: A case study of Eastern Mau Forest in Kenya. *International Journal of Forestry Research*: 8862813.
 - Terrer, C., Vicca, S., Stocker, B.D., Hungate, B.A., Phillips, R.P., Reich, P.B., ... and Prentice, I.C., 2018. Ecosystem responses to elevated CO₂ governed by plant-soil interactions and the cost of nitrogen acquisition. *New Phytologist*, 217(2): 507-522.
 - Vahedi, A.A., 2017. Monitoring soil carbon pool in the Hyrcanian coastal plain forest of Iran: Artificial neural network application in comparison with developing traditional models. *Catena*, 152: 182-189.
 - Vangi, E., D'Amico, G., Francini, S., Borghi, C., Giannetti, F., Corona, P., ... and Chirici, G., 2023. Large-scale high-resolution yearly modeling of forest growing stock volume and above-ground carbon pool. *Environmental Modelling and Software*, 159: 105580.
 - Wiesmeier, M., Poeplau, C., Sierra, C.A., Maier, H., Frühauf, C., Hübner, R., ... and Kögel-Knabner, J., 2016. Projected loss of soil organic carbon in temperate agricultural soils in the 21st century: effects of climate change and carbon input trends. *Scientific Reports*, 6: 32525.
 - J., Weber, P.K. and Kleber, M., 2015. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nature Climate Change*, 5: 588-595.
 - Kicklighter, D.W., Melillo, J.M., Monier, E., Sokolov, A.P. and Zhuang, Q., 2019. Future nitrogen availability and its effect on carbon sequestration in Northern Eurasia. *Nature Communications*, 10: 324.
 - Kooch, Y., 2012. Soil variability related to pit and mound, canopy cover and individual tree in a Hyrcanian Oriental beech stand, northern Iran. PhD thesis, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, 155p (In Persian)
 - Lehmann, J. and Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528: 60-68.
 - Matus, F.J., 2021. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 11: 6438.
 - Mildrexler, D.J., Berner, L.T., Law, B.E., Birdsey, R.A. and Moomaw, W.R., 2020. Large trees dominate carbon storage in forests east of the Cascade Crest in the United States Pacific Northwest. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3: 594274.
 - Minnich, C., Peršoh, D., Poll, C. and Borken, W., 2021. Changes in chemical and microbial soil parameters following 8 years of deadwood decay: an experiment with logs of 13 tree species in 30 forests. *Ecosystems*, 24(4): 955-967.
 - Mohammadnezhad Kiasari, Sh., Sagheb-Talebi, Kh., Espahbodi, K., Shahabian, M., Amini, Sh. and Alavi, S.H., 2020. Comparison of the characteristics of dead trees in a parcel managed by the single selection method with a control parcel (case study: Haftkhal Neka forests - Mazandaran). *Sustainable Management of Hyrcanian Forests*, 2(1): 75-84 (In Persian).
 - Morison, J., Matthews, R., Miller, G., Perks, M., Randle, T., Vanguelova, E., ... and Yamulki, S., 2012. Understanding the carbon and greenhouse gas balance of forests in Britain. *Research Report*, Edinburg, UK, 159p.
 - Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., ... and Hayes, D., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045): 988-993.
 - Parhizkar, P., Sagheb-Talebi, Kh., Mattaji, A., Namirani, M., Hasani, M. and Mortazavi, M., 2011. Tree and regeneration conditions within development stages in Kelardasht beech forest (Case study: reserve area-Langa). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 19(1): 141-153 (In Persian with English summary).
 - Pfeifer, M., Lefebvre, V., Turner, E., Cusack, J., Khoo, M., Chey, V.K., ... and Ewers, R.M., 2015. Deadwood biomass: an underestimated carbon stock

- G., ... and Chen, X., 2019. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation. *National Science Review*, 6: 746-757.
- Zhou, W., Han, G., Liu, M. and Li, X., 2019. Effects of soil pH and texture on soil carbon and nitrogen in soil profiles under different land uses in Mun River Basin, Northeast Thailand. *PeerJ*, 7: e7880.
 - Zou, J., Wu, J., Osborne, B., Tobin, B. and Luo, Y., 2021. Nitrogen accumulation, rather than carbon: nitrogen stoichiometric variation, underlies carbon storage during forest succession. *Environmental Research Letters*, 16(2): 024055.
 - Wu, C., Mo, Q., Wang, H., Zhang, Z., Huang, G., Ye, Q., ... and Wang, G.G., 2018. Moso bamboo (*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau) invasion affects soil phosphorus dynamics in adjacent coniferous forests in subtropical China. *Annals of Forest Science*, 75: 24.
 - Wu, C., Zhang, Z., Shu, C., Mo, Q., Wang, H., Kong, F., ... and Liu, Y., 2020. The response of coarse woody debris decomposition and microbial community to nutrient additions in a subtropical forest. *Forest Ecology and Management*, 460: 117799.
 - Zhou, G., Xu, S., Ciais, P., Manzoni, S., Fang, J., Yu,

Modeling changes in soil carbon stock concerning the soil beneath dead tree

S. Shabani ^{1*}, A.A. Vahedi ², A. Ahmadi ³ and H. Faramarzi ⁴

1* - Corresponding author, Assistant Prof., Research Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. E-mail: saeidshabani07@gmail.com

2- Assistant Prof., Research Department of Natural Resources, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran

3- Assistant Prof., Research Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

4- Ph.D. of Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modarres University, Noor, Iran

Received: 03.03.2023

Accepted: 03.05.2023

Abstract

Since dead trees contain significant amounts of organic matter, they play an essential role in forest dynamics. In the present study, the changes in soil carbon stock were studied in relation to the dead tree features and its soil beneath in mixed broadleaf stands of Loveh forest in Golestan province, Iran using the Principal Component Analysis (PCA) and random forest model. For this purpose, the characteristics of 15 dead trees consisting of hornbeam, oak, Cappadocian maple, and ironwood were recorded in three decay classes 3 to 5, and the soil beneath them was collected from a depth of 0 to 15. The random forest model was implemented based on the relationship between the dependent variable (carbon stock) and the independent variables (effective factors) using the randomForest package in R software. The results showed that using the studied parameters, the random forest model justifies about 54% of the changes in soil carbon stock. According to the final model, the carbon stock of the soil beneath of dead tree is most affected by the three parameters of C/N ratio, nitrogen (%), and soil pH, so in a general trend with the increase of C/N ratio and nitrogen (%) and the decrease of pH, the amount of soil carbon stock around the dead tree has been increased. The present study's findings indicate that dead trees provide great potential for soil carbon storage, especially when faced with an old-growth forest ecosystem.

Keywords: Biomass, carbon pool, degree of decay, Hyrcanian forest, mixed broadleaf.