University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

Investigation the volume and carbon content of woody debrisees in the Naw forests of Asalem

Hamid Kocheki Bodagh[1] | Mehrdad Nikooy[2] | Farzam Tavankar[3*] | Ramin Naghdi[4]

1. Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: godarzkochaki@gmail.com
2. Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: nikooy@Guilan.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Forestry, Kha.C., Islamic Azad University, Khalkhal, Iran. Email: fa.tavankar@iau.ac.ir
4. Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: maghdi@guilan.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 16 December 2025
Revised: 02 February 2026
Accepted: 03 May 2026
Published online: 10 June 2026

Keywords:
Carbon storage,
Decay,
Ecosystem restoration,
Forest conservation,
Forest management,
Hyrcanian forests.

ABSTRACT

Introduction: Woody debris (coarse and fine woody debris) is a key component of forest ecosystems, playing an important role in carbon storage, nutrient cycling, and habitat provision. However, the effects of different forest management practices on the volume, decay dynamics, and carbon content of these stocks, particularly in the Hyrcanian forests of Iran, have rarely been investigated simultaneously and comparatively. This study aimed to assess and compare the volume, abundance, decay classes, biomass, and carbon content of fine woody debris (FWD: 2–10 cm diameter) and coarse woody debris (CWD: ≥10 cm diameter) in four stands with different management histories in the Nav Asalem forests of Gilan Province, northern Iran.

Method: Four forest stands were selected: (1) a shelterwood stand with 40 years since the last harvest, (2) a single-selection cutting stand with 10 years since the last harvest, (3) a single-selection cutting stand combined with salvage logging of windthrown trees, and (4) a conservation stand (no harvesting) as a control. Sampling was conducted using a systematic random grid of 100 × 100 m. Circular plots of 1000 m² were used for CWD, and concentric circular plots of 500 m² were used for FWD. For each sample plot, the diameter and length of each woody piece were measured, and its decay class (1 to 4) was recorded based on visual and tactile criteria. The volume of each piece was calculated using Huber's formula. To determine basic density, three wood samples per decay class per stand were collected, and their dry weight was determined after oven-drying at 105°C. Biomass was obtained by multiplying volume by basic density, and carbon content was estimated using a conversion factor of 0.5. Additionally, distance from the road, slope percentage, and a stand accessibility index were recorded.

Results: The frequency of fine woody debris (507 pieces per hectare) in the protected stand was significantly lower than that in the other stands. The frequency of coarse woody debris in the shelterwood and single-selection stands was significantly higher than that in the protected stand. The shelterwood and protected stands had the highest volumes of fine woody debris, with 4.61 and 4.47 m³ per hectare, respectively, while the protected stand had the highest volume of coarse woody debris, at 14.25 m³ per hectare. The protected stand exhibited the highest frequency of highly decayed woody debris (30.8%) and the lowest frequency of low-decay woody debris (15.5%). The shelterwood stand had the highest fine woody debris biomass (1062 kg per hectare), and the protected stand had the highest coarse woody debris biomass (3028 kg per hectare). The highest carbon content of fine woody debris was found in the shelterwood stand (531 kg per hectare), while the highest carbon content of coarse woody debris was observed in the protected stand (1989 kg per hectare). The forest accessibility index showed the strongest negative correlation with coarse woody debris volume. Additionally, fine woody debris volume had a significant positive correlation with slope gradient and distance from the road.

Conclusion: This study demonstrated that lower-intensity management practices with longer harvest cycles (such as the shelterwood method with a 40-year interval) can largely maintain the carbon storage capacity and natural decay dynamics of woody debris, allowing recovery to conditions close to those of the conservation stand. In contrast, repeated human disturbances (especially the combined harvesting of standing and windthrown trees) rapidly deplete these vital stocks and shift their dynamics toward fresh, fast-decomposing material. Forest accessibility was identified as the strongest determinant of woody debris quantity. It is recommended that forest management plans in the Hyrcanian region prioritize the preservation of areas with difficult access, avoid the complete removal of logging residues, and favor close-to-nature silvicultural practices to maintain carbon sequestration functionss and biodiversity.

Cite this article: Kocheki Bodagh, H., Nikooy, M., Tavankar, F., Naghdi, R. (2026). Investigation the volume and carbon content of woody debrisees in the Naw forests of Asalem. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (1), 51-65. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.408252.1382

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.408252.1382

دانشگاه تهران

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

بررسی حجم و محتوی کربن خشک‌دارهای درشت و خرد در جنگل‌های ناو اسالم

حمید کوچکی بداغ[۱] | مهرداد نیکوی[۲] | فرزام توانکار[۳*] | رامین نقدی[۴]

۱. گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: godarzkochaki@gmail.com

۲. گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: nikooy@Guilan.ac.ir

۳. نویسنده مسئول،گروه جنگلداری، واحد خلخال، دانشگاه آزاد اسلامی، خلخال ایران. رایانامه: fa.tavankar@iau.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: rnaghdi@Guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

کلیدواژه:
بازیابی بوم‌سازگان،
پوسیدگی،
جنگل‌های هیرکانی،
حفاظت جنگل،
ذخیرهٔ کربن،
مدیریت جنگل.

چکیده

مقدمه: ضایعات چوبی (خشک‌دار درشت و خرد) از اجزای کلیدی بوم‌سازگان‌های جنگلی هستند که نقش مهمی در ذخیره‌سازی کربن، چرخهٔ مواد مغذی و تأمین زیستگاه دارند. با این حال، اثر شیوه‌های مختلف مدیریت جنگل بر حجم، پویایی تجزیه و محتوای کربن این ذخایر، به‌ویژه در جنگل‌های هیرکانی ایران، کمتر به‌صورت تطبیقی و همزمان بررسی شده است. پژوهش حاضر با هدف سنجش و مقایسه حجم، فراوانی، طبقات پوسیدگی، زی‌توده و محتوای کربن خشک‌دار خرد (قطر ۲ تا ۱۰ سانتی‌متر) و درشت (قطر ≥۱۰ سانتی‌متر) در چهار توده با سابقهٔ مدیریتی متفاوت در جنگل‌های ناو اسالم (استان گیلان) طراحی و اجرا شد.

روش پژوهش: چهار تودهٔ جنگلی شامل: (۱) تودهٔ تحت مدیریت تدریجی پناهی با ۴۰ سال فاصله از آخرین برداشت، (۲) تودهٔ تک‌گزینی با ۱۰ سال فاصله، (۳) تودهٔ تک‌گزینی همراه با برداشت درختان بادافتاده و (۴) تودهٔ حفاظتی (بدون بهره‌برداری) به‌عنوان شاهد انتخاب شدند. نمونه‌برداری به‌صورت شبکه‌ای منظم تصادفی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر انجام گرفت. برای خشک‌دار درشت از قطعات دایره‌ای ۱۰ آری (۱۰۰۰ مترمربع) و برای خشک‌دار خرد از قطعات دایره‌ای هم‌مرکز ۵ آری (۵۰۰ مترمربع) استفاده شد. برای هر قطعه‌نمونه، قطر و طول خشک‌دار اندازه‌گیری و طبقهٔ پوسیدگی آن (۱ تا ۴) براساس معیارهای بصری و لمسی ثبت شد. حجم هر قطعه با روش هوبر محاسبه گردید. برای تعیین چگالی بحرانی، از هر طبقهٔ پوسیدگی در هر توده، ۳ نمونهٔ چوبی برداشت و وزن خشک آن پس از خشک شدن در آون (۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد) تعیین شد. زی‌توده از حاصلضرب حجم در چگالی بحرانی و محتوای کربن با اعمال ضریب ۰/۵ بر زی‌توده برآورد شد. همچنین فاصله از جاده، شیب زمین و شاخص قابلیت دسترسی توده ثبت شد.

یافته‌ها: فراوانی خشک‌دار خرد در تودهٔ حفاظتی (۵۰۷ قطعه در هکتار) به‌طور معنی‌داری کمتر از سایر توده‌ها بود. فراوانی خشک‌دار درشت در توده‌های پناهی و تک‌گزینی به‌طور معنی‌داری بیشتر از فراوانی آن در تودهٔ حفاظتی بود. توده‌های پناهی و حفاظتی به‌ترتیب با مقدار ۴/۶۱ و ۴/۴۷ متر مکعب در هکتار بیشترین حجم خشک‌دار خرد را داشتند در حالی‌که تودهٔ حفاظتی با ۱۴/۲۵ متر مکعب در هکتار بیشترین حجم خشک‌دار درشت را داشت. تودهٔ حفاظتی بیشترین فراوانی خشک‌دار با پوسیدگی زیاد (۳۰/۸ درصد) و کمترین فراوانی پوسیدگی با شدت کم (۱۵/۵) را داشت. تودهٔ پناهی بیشترین مقدار زی‌تودهٔ خشک‌دار خرد (۱۰۶۲ کیلو گرم در هکتار) و تودهٔ حفاظتی بیشترین مقدار زی‌تودهٔ خشک‌دار درشت (۳۰۲۸ کیلوگرم در هکتار) را داشتند. بیشترین محتوای کربن خشک‌دار خرد در تودهٔ پناهی (۵۳۱ کیلوگرم در هکتار) و بیشترین محتوای کربن خشک‌دار درشت در تودهٔ حفاظتی (۱۹۸۹ کیلو گرم در هکتار) به‌دست آمد. شاخص قابلیت دسترسی به جنگل، قوی‌ترین همبستگی منفی را با حجم خشک‌دار درشت نشان داد. همچنین حجم خشک‌دار خرد با شیب زمین و فاصله از جاده همبستگی مثبت معنی‌دار داشت.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که شیوه‌های مدیریتی با شدت کمتر و چرخهٔ بهره‌برداری طولانی‌تر (مانند روش پناهی با ۴۰ سال فاصله) می‌توانند ظرفیت ذخیرهٔ کربن و پویایی طبیعی خشک‌دارها را تا حد زیادی حفظ کرده و به شرایط نزدیک به تودهٔ حفاظتی بازیابی کند. در مقابل، اختلالات مکرر انسانی (به‌ویژه برداشت همزمان درختان سرپا و بادافتاده) این مخازن حیاتی را به‌سرعت تخلیه و پویایی آن را به‌سمت مواد تازه با سرعت تجزیهٔ بالا سوق می‌دهد. قابلیت دسترسی به جنگل به‌عنوان قوی‌ترین عامل تعیین‌کنندهٔ کمیت خشک‌دارها شناسایی شد. پیشنهاد می‌شود در برنامه‌های مدیریت جنگل‌های هیرکانی، حفظ عرصه‌های با دسترسی دشوار، پرهیز از پاکسازی کامل ضایعات برداشت و اولویت‌دهی به شیوه‌های نزدیک به طبیعت به‌منظور حفظ کارکردهای ترسیب کربن و تنوع زیستی در دستور کار قرار گیرد.

استناد: کوچکی بداغ؛ حمید، نیکوی؛ مهرداد، توانکار؛ فرزام، نقدی؛ رامین (۱۴۰۵). بررسی حجم و محتوی کربن خشک‌دارهای درشت و خرد در جنگل‌های ناو اسالم. *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۹ (۱)، ۶۵-۵۱. DOI: https://10.22059/jfwp.2026.408252.1382

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
https://doi.org/10.22059/jfwp.2026.408252.1382

۱. مقدمه

ضایعات چوبی[1] به‌عنوان یکی از اجزای سازندهٔ کلیدی در بوم سازگان‌های جنگلی، نقش‌های بوم‌شناختی متعددی از جمله حفاظت از خاک، تأمین زیستگاه برای گونه‌های وابسته، تسهیل چرخهٔ مواد مغذی و تنظیم جریان انرژی ایفا می‌کنند [۶-۱]. این بقایا براساس ابعاد به دو دستهٔ اصلی خشک دار درشت[2] با قطر بیش از ۱۰ سانتی‌متر و خشک دار خرد[3] با قطری بین ۲ تا ۱۰ سانتی‌متر تقسیم‌بندی می‌شوند [۸-۷]. در دهه‌های اخیر، نقش این خشک‌دارها به‌عنوان مخزن مهم کربن در چرخهٔ جهانی این عنصر مورد تأکید قرار گرفته است. ضایعات چوبی می‌توانند سهم قابل توجهی (تا ۲۰ درصد) از کل ذخیرهٔ کربن جنگل را در خود نگه دارند و نرخ تجزیه و آزادسازی تدریجی کربن آنها بر تعادل کربن بوم‌سازگان تأثیر می‌گذارد [۸]. بنابراین، برآورد کمی حجم و ذخیرهٔ کربن آنها نه تنها برای درک کارکردهای بوم‌سازگان، بلکه برای برنامه‌ریزی مدیریت پایدار و مشارکت در برنامه‌های بین‌المللی مقابله با تغییر اقلیم حائز اهمیت است [۹].

مدیریت و بهره‌برداری از جنگل به شیوه‌های مختلف، یکی از عمده‌ترین عوامل تغییردهندهٔ مقدار، توزیع و پویایی این ذخایر است. فعالیت‌هایی مانند برداشت درختان، جاده‌سازی و حتی تردد، می‌توانند به‌طور مستقیم با خارج کردن چوب از چرخه و یا به‌طور غیرمستقیم با تغییر ریزاقلیم کف جنگل، بر میزان تولید، تجمع و نرخ تجزیهٔ خشک‌دار درشت و خرد تأثیر بگذارند. در این میان، ارزیابی تطبیقی اثرات بلندمدت شیوه‌های متداول مدیریتی بر این ذخایر، برای تدوین رهنمودهای بهره‌برداری سازگار با حفظ کارکردهای بوم سازگان ضروری به‌نظر می‌رسد.

بررسی مطالعات مرتبط با خشک‌دارهای درشت و خرد در در جنگل‌های شمال ایران نشان می‌دهد که مطالعات میدانی کمی به بررسی جامع و همزمان خشک‌دار درشت و خرد با تأکید بر ذخیرهٔ کربن پرداخته‌اند. اغلب تحقیقات پیشین در منطقه، بر اثرات عوامل طبیعی مانند شیب [۱۰] و روش‌های مختلف نمونه‌برداری [۱۱] بر فراوانی و حجم خشک‌دار، و عوامل تأثیرگذار بر پویایی خشک‌دار درشت و خرد [۱۲] متمرکز بوده‌اند. با این حال، مطالعه‌ای که به‌صورت کمی اثرات گذشت زمان و شیوه‌های مدیریتی متفاوت (از قبیل تدریجی پناهی، تک‌گزینی و حفاظتی) را بر حجم، پویایی تجزیه (طبقهٔ پوسیدگی) و به‌ویژه محتوای کربن ذخیره شده در خشک‌دار درشت و خرد مورد مقایسه قرار دهد، بسیار اندک است. پر کردن این شکاف دانشی می‌تواند مبنای علمی محکمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم آورد تا در کنار بهره‌وری اقتصادی، کارکردهای حیاتی بوم سازگان مانند ذخیرهٔ کربن و حفظ تنوع زیستی نیز حفاظت شود.

از این‌رو این پژوهش با هدف کلی سنجش و مقایسهٔ گذشت زمان، همزمان با تأثیر شیوه‌های مختلف مدیریت جنگل بر حجم، ویژگی‌های پویایی و ذخیرهٔ کربن خشک‌دار خرد و درشت در جنگل‌های هیرکانی ناو اسالم طراحی و اجرا شد. اهداف جزئی به شرح زیر هستند: الف) برآورد و مقایسهٔ حجم، فراوانی و زی‌تودهٔ خشک‌دار خرد و درشت در توده‌های جنگلی تحت مدیریت با شیوه‌های تدریجی پناهی با تمرکز بر زمان سپری شده بعد از مدیریت برداشت (با ۴۰ سال فاصله از برداشت)، تک‌گزینی (با ۱۰ سال فاصله از برداشت)، تک‌گزینی+باد افتاده (با فاصلهٔ برداشت ۱۰ سال) و حفاظتی (بدون برداشت)، ب) بررسی و مقایسهٔ ساختار درجهٔ پوسیدگی (از ۱ تا ۴) خشک‌دار خرد و درشت در زمان‌های مختلف توده‌های با سابقهٔ مدیریتی متفاوت، ج) محاسبه و مقایسهٔ مقدار کربن ذخیره شده در خشک‌دار خرد و درشت در این توده‌ها و د) بررسی رابطهٔ بین مشخصات توده (فاصله از جاده، شیب و قابلیت دسترسی) با حجم و فراوانی خشک‌دار درشت و خرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقهٔ مورد مطالعه

این پژوهش در سال ۱۴۰۳ در جنگل‌های هیرکانی واقع در منطقهٔ ناو اسالم در استان گیلان، شمال ایران، انجام شد. منطقه‌ای با عرض جغرافیایی ″۲۳ °۳۷ تا ″۲۵ °۳۷ شمالی و طول جغرافیایی ″۵۳ °۴۸ تا ″۵۵ °۴۸ شرقی و ارتفاعی بین ۱۱۰۰ تا ۱۷۰۰ متر از

[1] Woody Debris
[2] Coarse Woody Debris (CWD)
[3] Fine Woody Debris (FWD)

سطح دریا. آب‌وهوا مطابق با سیستم طبقه‌بندی آمبرژه، معتدل مرطوب با میانگین بارش سالانه حدود ۱۴۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۲ درجهٔ سانتی‌گراد است. تیپ جنگلی منطقه، راشستان آمیخته با گونه‌های غالب راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky)، ممرز (*Carpinus betulus* L.)، افرا (*Acer velutinum* Boiss.) و توسکا (*Alnus subcordata* C.A.Mey.) می‌باشد. این مطالعه در پارسل‌های ۲۶۹ و ۲۷۱ از سری دو ناو و پارسل‌های ۳۱۹ و ۳۲۰ از سری سه حوزهٔ آبخیز ناو اسالم در استان گیلان انجام گرفت. چهار تودهٔ جنگلی با سابقهٔ مدیریتی متفاوت و مجزا از یکدیگر انتخاب شدند (جدول ۱):

الف) تودهٔ پناهی: تحت بهره‌برداری با روش تدریجی پناهی، با فاصلهٔ زمانی ۴۰ سال سپری شده از آخرین قطع، ب) تودهٔ تک‌گزینی تحت بهره‌برداری با روش تک‌گزینی، با ۱۰ سال سپری شده از آخرین قطع.ج) تودهٔ تک‌گزینی+بادافتاده: توده‌ای با سابقهٔ بهره‌برداری تک‌گزینی که پس از آن نیز، ۱۰ سال پیش، درختان باد افتاده از آن خارج شده است، د) تودهٔ حفاظتی: فاقد هر گونه سابقهٔ بهره‌برداری چوب (شاهد).

این توده‌ها به‌عنوان واحدهای اکولوژیک–مدیریتی منحصربه‌فرد (مجموعه‌ای از اثرات مدیریت، زمان سپری‌شده از آخرین اختلال، ساختار و شرایط توده) در نظر گرفته شدند. علی‌رغم اینکه متغیرهایی مانند زمان سپری‌شده از آخرین دخالت، حجم در هکتار تودهٔ سرپا، تغییرات مکانی بین توده‌ها و .... متفاوت است ولی فرض تحقیق بر این است که این متغیرها به‌طور ذاتی با رژیم مدیریتی درهم‌تنیده‌اند. بنابراین، تفسیر تفاوت‌های مشاهده‌شده بین توده‌ها، همواره به‌عنوان حاصل تعامل این مجموعه عوامل بود و در تفکیک اثر خالص و مستقل هر یک از این عوامل (مانند مدیریت به تنهایی) انجام نشد. این رویکرد، امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌ای از پیامدهای بلندمدت روش‌های مدیریتی متداول در منطقه را فراهم ساخت.

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و مدیریتی توده‌های مورد بررسی در جنگل‌های ناو اسالم

روش مدیریت و برداشت چوب	تدریجی پناهی	تک‌گزینی	تک‌گزینی+باد افتاده	حفاظتی
شماره پارسل	۲۶۹	۲۷۱	۳۱۹	۳۲۰
تعداد در هکتار	۲۹۴	۲۸۸	۲۸۱	۲۰۸
حجم در هکتار (مترمکعب)	۲۶۶	۲۶۴	۳۱۱	۳۹۲
مساحت (هکتار)	۴۶	۵۱	۵۴	۴۳
ارتفاع از سطح دریا (متر)	۱۷۰۰	۱۶۵۰	۱۱۰۰	۱۱۲۰
تیپ رویشی	راش	راش	راش–ممرز	آمیخته
طول جاده (متر)	۱۴۲۸	۱۸۷۶	۸۰۰	۷۴۱

۲–۲. طراحی تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها

الف) طراحی نمونه‌برداری:

در هر یک از چهار توده، یک شبکهٔ آماربرداری منظم تصادفی با ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ متر پیاده شد. محل تقاطع خطوط شبکه به‌عنوان مرکز قطعه‌نمونه در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از اثر لبه، قطعات نمونه با فاصلهٔ مناسب از مرز توده‌ها مستقر شدند. قطعات دایره‌ای ثابت با مساحت ۱۰ آری (۱۰۰۰ مترمربع) برای شمارش و اندازه‌گیری خشک‌دار درشت (قطعات چوبی با قطر حداقل میانهٔ ۱۰ سانتی‌متر و طول حداقل ۱ متر) مستقر شد [۸–۷]. در همان مرکز، یک قطعهٔ دایره‌ای هم‌مرکز با مساحت ۵ آری (۵۰۰ مترمربع) برای خشک‌دار خرد (قطعات چوبی با قطر میانه بین ۲ تا ۱۰ سانتی‌متر و طول حداقل ۴۰ سانتی‌متر) مستقر شد [۸–۷]. برای هر قطعه خشک‌دار درشت و خرد، قطر در دو سر و وسط با استفاده از کالیپر دیجیتال (دقت میلی‌متر) و طول با استفاده از متر نواری (دقت ۱ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد. درجهٔ پوسیدگی هر قطعه براساس معیارهای بصری و لمسی در چهار طبقه (۱: سالم تا ۴: بسیار پوسیده) ثبت شد [۷، ۱۳] (جدول ۲).

ب) اندازه‌گیری خشک‌دار درشت و خرد

حجم هر قطعه خشک‌دار درشت و خرد (برحسب سانتی‌متر مکعب) با استفاده از رابطهٔ هوبر محاسبه شد (رابطهٔ ۱) که در آن A_m سطح مقطع در وسط قطعه و L طول قطعه است. برای تبدیل حجم به زی‌توده، از هر طبقهٔ پوسیدگی در هر توده، ۳ نمونهٔ چوبی به‌صورت

تصادفی جمع‌آوری شد. حجم نمونه‌ها با روش جابجایی در آب و وزن خشک آنها پس از خشک شدن در آون در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد تا حصول وزن ثابت، تعیین شد. چگالی بحرانی هر طبقه (برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب) از رابطهٔ ۲ محاسبه شد [۱۴]. زی‌تودهٔ هر قطعهٔ خشک‌دار درشت و خرد (برحسب گرم) از حاصلضرب حجم آن در چگالی بحرانی طبقهٔ پوسیدگی متناظرش به‌دست آمد (رابطهٔ ۳). مقادیر زی‌توده در سطح هکتار (کیلوگرم در هکتار) ارائه شد. محتوای کربن هر قطعه (برحسب گرم) با اعمال ضریب کربن ثابت ۰/۵ بر زی‌تودهٔ آن برآورد شد (رابطهٔ ۴) [۱۵]. مقادیر کربن نیز در سطح هکتار (کیلوگرم کربن در هکتار) گزارش شد.

رابطهٔ ۱ $V = A_m \times L$

رابطهٔ ۲ $\rho = \frac{W_d}{V}$

رابطه ۳ $B = V \times \rho$

رابطه ۴ $C = B \times 0.5$

جدول ۲. طبقه‌بندی خشک‌دار درشت و خرد براساس شدت پوسیدگی

طبقهٔ پوسیدگی	توضیح
درجه ۱	قطعه با تکیه‌گاه بالای سطح زمین، شاخه‌های ریز افتاده و بیش از ۵۰ درصد شاخه‌های بزرگ، هنوز برروی درخت باقیمانده است. پوست در حال شل شدن است، رنگ چوب طبیعی، نفوذ تیغهٔ چاقو حدود چند میلی‌متر.
درجه ۲	قطعهٔ نزدیک سطح زمین، شاخه‌های ریز کاملاً از بین رفته و بخش اندکی از شاخه‌های قطور تاج باقیمانده است. پوست در بخش‌هایی از تنهٔ درخت جدا شده و افتاده است، رنگ چوب کمی تغییر یافته، نفوذ تیغهٔ چاقو کمتر از ۲ سانتی‌متر.
درجه ۳	کل قطعه بر روی زمین، هیچ شاخهٔ بزرگی بر روی تنهٔ درخت باقی نمانده و پوست ممکن است تا حد زیادی جدا شده باشد، رنگ چوب تا اندازهٔ زیادی تغییر یافته، نفوذ تیغهٔ چاقو کمتر از ۲ تا ۵ سانتی‌متر.
درجه ۴	کل قطعه بر روی زمین، ساختار کلی قطعهٔ چوبی درخت از هم پاشیده است، پوست چندانی بر تنه نمانده و چوب پوسیده و نرم و پودری شده است، رنگ چوب کاملاً تغییر یافته، تیغهٔ چاقو کاملاً نفوذ می‌کند.

در رابطهٔ ۱، V حجم خشک‌دار به متر مکعب، A_m سطح مقطع در حد میان طول خشک‌دار به متر مربع، و L طول خشک‌دار به متر است. در رابطهٔ ۲، ρ جرم مخصوص بحرانی خشک‌دار به کیلوگرم بر متر مکعب، W_d جرم خشک‌دار به کیلوگرم، و V حجم خشک‌دار به متر مکعب است. در رابطهٔ ۳، B زی‌تودهٔ خشک‌دار به کیلوگرم، V حجم خشک‌دار به متر مکعب، و ρ جرم مخصوص بحرانی خشک‌دار به کیلوگرم بر متر مکعب است. در رابطهٔ ۴، C محتوی کربن خشک‌دار به کیلوگرم، B زی‌تودهٔ خشک‌دار به کیلوگرم، و ۰/۰۵ ضریب تبدیل کربن است. برای هر قطعه‌نمونه، شیب زمین (درصد)، فاصله از نزدیک‌ترین جادهٔ جنگلی (متر) و شاخص قابلیت دسترسی توسط (از ۱ تا ۴، یعنی از آسان‌ترین تا سخت‌ترین، به‌عنوان یک متغیر رتبه‌ای) ثبت شد. برای رتبه‌بندی قطعه‌نمونه از لحاظ قابلیت دسترسی از روش Wisdom و Bate (۲۰۰۸) [۱۶] با اصلاحات به شیوهٔ Lo Monaco و همکاران (۲۰۲۲) [۱۴] استفاده شد. در رتبه‌بندی قابلیت دسترسی توده از چهار مشخصهٔ فاصله از جاده، شیب زمین، موقعیت نسبت به جاده (بالادست یا پایین دست) و نوع جاده (جنگلی یا بین شهری) استفاده و توده‌ها به چهار طبقهٔ DC1، DC2، DC3 و DC4 از قابلیت کم تا قابلیت زیاد طبقه‌بندی شدند.

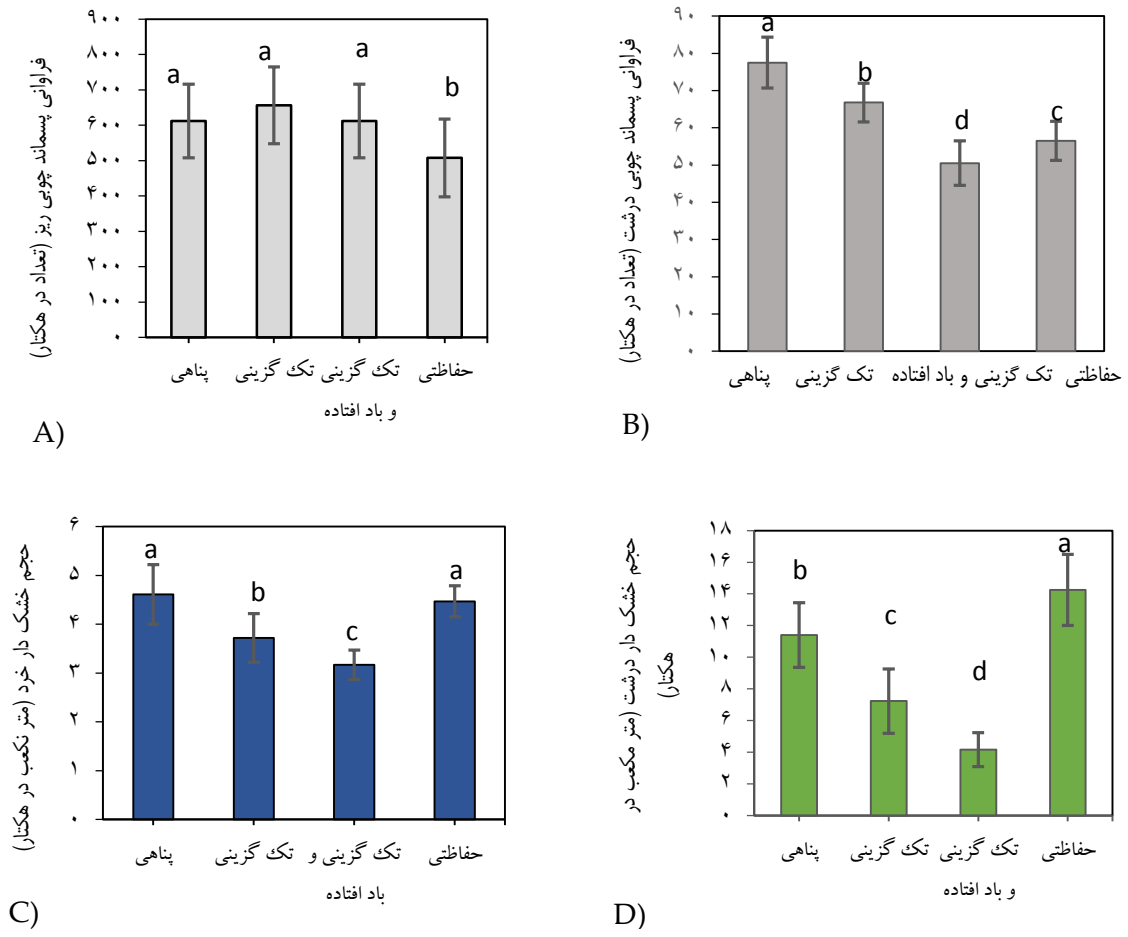
۲-۳. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها

تمامی تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخهٔ ۲۶ انجام شد. برای بررسی تأثیر نوع توده (مدیریت) بر متغیرهای وابسته (حجم، فراوانی، زی‌توده و کربن خشک‌دار درشت و خرد) از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده شد. در صورت معنی‌دار بودن اختلاف، مقایسهٔ میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای توکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P\leq$۰/۰۵) انجام گرفت. از آزمون کای اسکوئر برای آزمودن وجود تفاوت در نسبت‌های طبقهٔ پوسیدگی در تیمارها (توده‌ها) استفاده شد. برای بررسی رابطهٔ خطی بین متغیرهای حجم و فراوانی خشک‌دار درشت و خرد با سه مشخصهٔ توده (شیب زمین، فاصله از جاده و شاخص قابلیت دسترسی) از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. سطح معنی‌داری همبستگی‌ها نیز در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ گزارش شد. نرمال بودن داده‌ها و برابری واریانس‌ها پیش از تحلیل به‌ترتیب از طریق آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و لون بررسی شدند.

۳. یافته‌های پژوهش

۳–۱. فراوانی و حجم خشک‌دار درشت و خرد

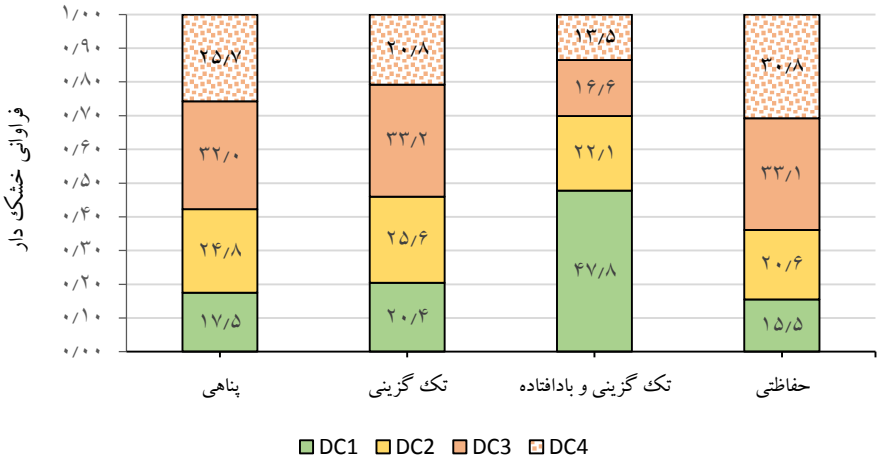
نتایج تجزیه واریانس نشان داد نوع توده تأثیر معنی‌داری بر فراوانی خشک‌دار خرد ($F=۴/۳۶$، $P<۰/۰۵$)، حجم خشک‌دار خرد ($F=۱۱/۲۰$، $P<۰/۰۱$)، فراوانی خشک‌دار درشت ($F=۳۰/۱۰$، $P<۰/۰۱$) و حجم خشک‌دار درشت ($F=۴۷/۰۵$، $P<۰/۰۵$) داشت. فراوانی خشک‌دار خرد در تودهٔ حفاظتی (۵۰۷ قطعه در هکتار) به‌طور معنی‌داری کمتر از سایر توده‌ها بود (شکل A–۱)، فراوانی این خشک‌دارها در توده‌های پناهی (۶۱۲ قطعه در هکتار)، تک‌گزینی (۶۵۶ قطعه در هکتار) و تک‌گزینی+باد افتاده (۶۱۲ قطعه در هکتار) تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. در حالی‌که، تودهٔ پناهی بیش‌ترین فراوانی خشک‌دار چوبی درشت و تودهٔ تک‌گزینی+باد افتاده کمترین فراوانی خشک دار درشت را داشت (شکل B–۱). فراوانی خشک‌دار درشت در توده‌های پناهی (۷۷ فراوانی خشک‌دار درشت) و تک‌گزینی (۶۷ فراوانی خشک‌دار درشت) به‌طور معنی‌داری بیشتر از فراوانی آن در تودهٔ حفاظتی (۵۶ فراوانی خشک‌دار درشت)، اما فراوانی خشک‌دار درشت در تودهٔ تک گزینی+باد افتاده به‌طور معنی‌داری کمتر از تودهٔ حفاظتی بود. نتایج نشان داد که هم حجم خشک‌دارهای خرد و هم حجم خشک‌دارهای درشت در تمام توده‌ها با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند. توده‌های پناهی و حفاظتی به‌ترتیب با مقدار ۴/۶۱ و ۴/۴۷ متر مکعب در هکتار بیشترین حجم خشک‌دار خرد را داشتند (شکل C–۱). در حالی‌که تودهٔ حفاظتی با ۱۴/۲۵ متر مکعب در هکتار بیشترین حجم خشک‌دار درشت را داشت (شکل D–۱). خشک‌دار خرد و درشت در تودهٔ تک‌گزینی کمتر از توده‌های حفاظتی و پناهی، اما بیشتر از تودهٔ تک گزینی+باد افتاده بود. در واقع تودهٔ تک‌گزینی+باد افتاده کمترین مقدار خشک‌دار خرد و درشت را داشت.



شکل ۱. فراوانی خشک‌دار خرد (A)، فراوانی خشک‌دار درشت (B)، حجم خشک‌دار خرد (C) و حجم خشک‌دار درشت (D) در توده‌های مورد مطالعه. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار ($P<۰/۰۵$) توسط آزمون توکی است. ستون‌ها و خطوط نشان‌دهندهٔ میانگین و ± انحراف معیار هستند.

۳-۲. پویایی خشک‌دار درشت و خرد

نتایج آزمون کای اسکوئر نشان داد نسبت حجمی پوسیدگی‌ها در توده‌ها دارای تفاوت معنی‌دار است (شکل ۲) ($P<۰/۰۰۰$، $X^2=۴۴/۶۴$). تودهٔ حفاظتی بیشترین فراوانی خشک‌دار با پوسیدگی زیاد (DC4) (۳۰/۸ درصد)، در حالی‌که کمترین فراوانی پوسیدگی با شدت کم (DC1) (۱۵/۵ درصد) را داشت. تودهٔ تک‌گزینی+باد افتاده بیشترین فراوانی پوسیدگی با شدت کم (۴۷/۸ درصد)، اما کمترین فراوانی پوسیدگی با شدت زیاد (۱۳/۵ درصد) را داشت. فراوانی پوسیدگی کمی پیشرفته DC2 در توده‌ها تقریباً برابر و از ۲۰/۶ تا ۲۵/۶ درصد بود. پوسیدگی DC3 در تودهٔ تک‌گزینی+باد افتاد نیز مانند پوسیدگی شدید دارای کمترین فراوانی (۱۶/۶ درصد) بود، اما سایر توده‌ها این طبقهٔ پوسیدگی حدود یک سوم از کل حجم خشک‌دارها را تشکیل داد. در واقع نزدیک‌ترین ترکیب فراوانی طبقات پوسیدگی با تودهٔ حفاظتی را تودهٔ پناهی نشان داد.

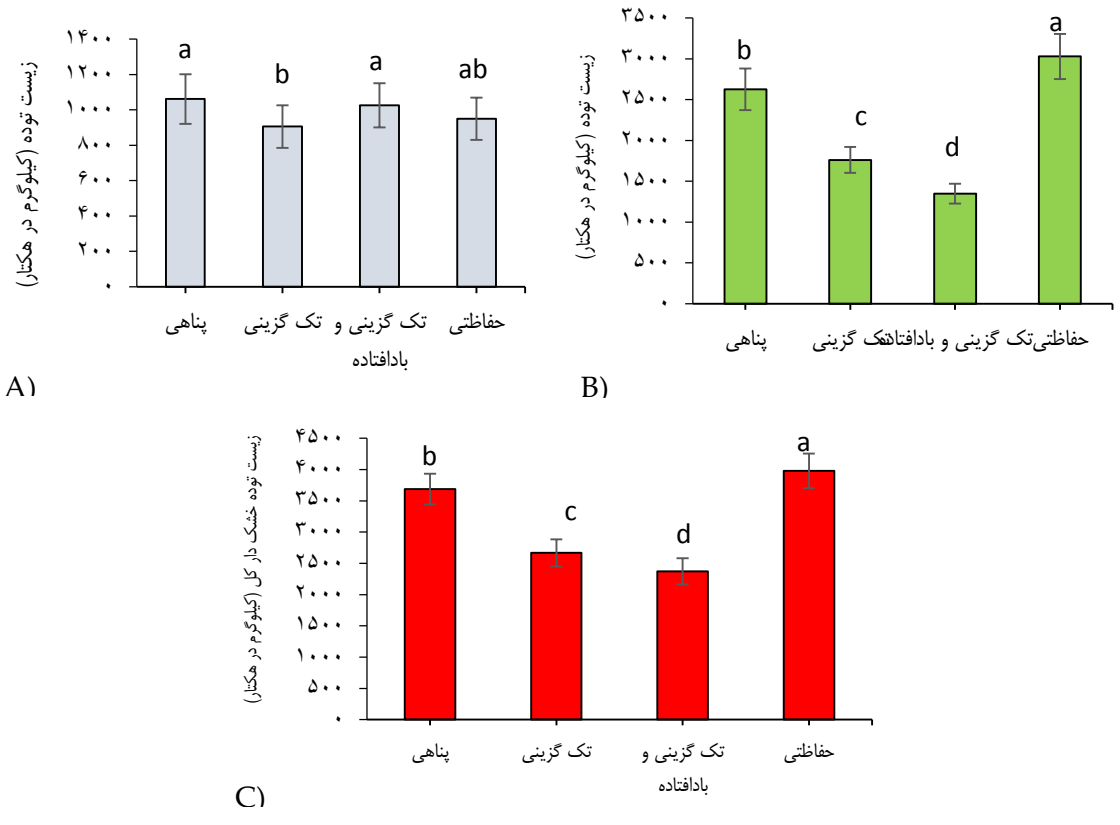


شکل ۲. فراوانی حجمی طبقهٔ پوسیدگی خشک‌دار درشت و خرد در توده‌های مورد مطالعه

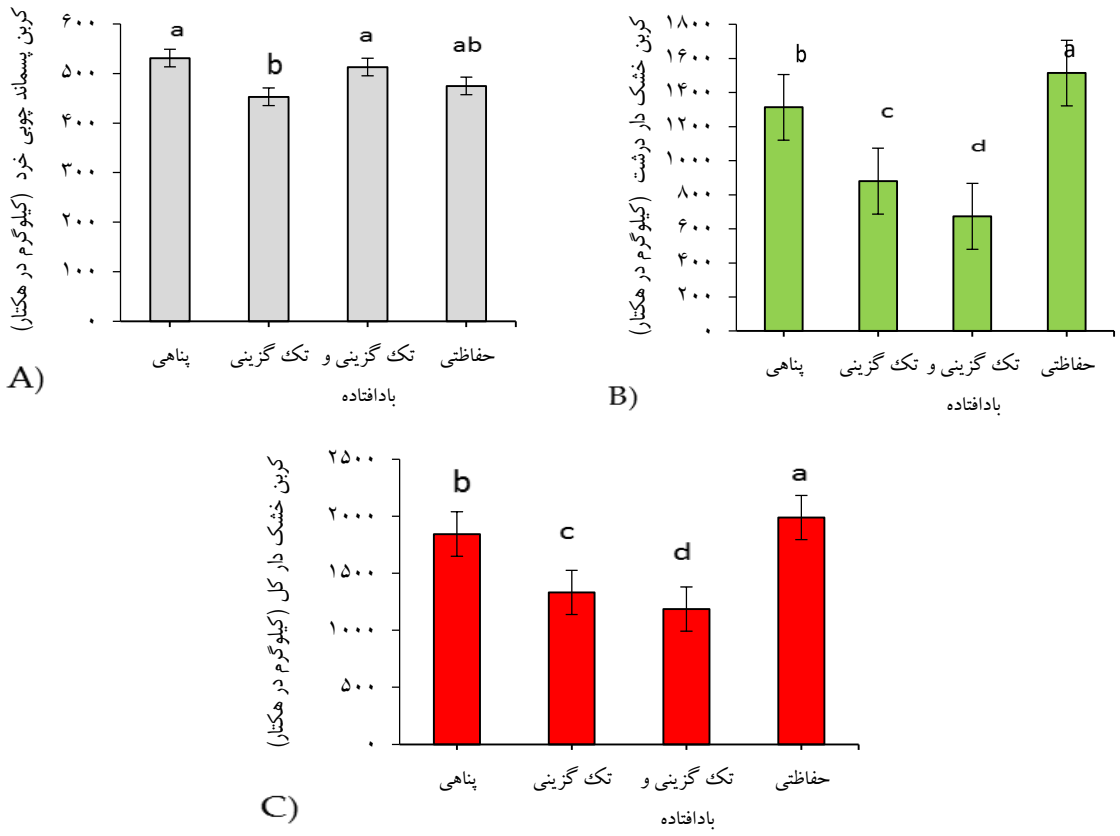
۳-۳. زی‌توده و محتوای کربن خشک‌دار درشت و خرد

نتایج آنالیز واریانس نشان داد نوع توده تأثیر معنی‌داری بر زی‌تودهٔ خشک‌دار خرد ($F=۴/۸۷$، $P<۰/۰۵$)، زی‌تودهٔ خشک‌دار درشت ($F=۱۹/۶۱$، $P<۰/۰۱$) و زیست‌توده خشک‌دار کل ($F=۲۴/۰۹$، $P<۰/۰۱$) داشت. تودهٔ پناهی بیشترین مقدار زی‌تودهٔ خشک‌دار خرد (۱۰۶۲ کیلو گرم در هکتار) (شکل A-۳) و تودهٔ حفاظتی بیشترین مقدار زی‌تودهٔ خشک‌دار درشت (۳۰۲۸ کیلوگرم در هکتار) را داشتند (شکل B-۳). کمترین مقدار زی‌تودهٔ خشک‌دار خرد در تودهٔ تک‌گزینی (۹۰۶ کیلو گرم در هکتار)، اما کمترین مقدار زی‌تودهٔ خشک‌دار درشت در تودهٔ تک‌گزینی+باد افتاده (۱۳۴۶ کیلو گرم در هکتار) وجود داشت. بیشترین مقدار زی‌تودهٔ خشک‌دار کل (۳۹۷۸ کیلوگرم در هکتار) در تودهٔ حفاظتی و کمترین آن در تودهٔ تک گزینی+باد افتاده (۲۳۷۲ کیلو گرم در هکتار) وجود داشت (شکل C-۳).

محتوای کربن خشک‌دار درشت و خرد در توده‌های متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. محتوای کربن هر خشک‌دار در هر توده از زی‌تودهٔ آن خشک‌دار پیروی می‌کند. بیشترین محتوای کربن خشک‌دار خرد در تودهٔ پناهی (۵۳۱ کیلوگرم در هکتار) (شکل A-۴) و بیشترین محتوای کربن خشک‌دار درشت در تودهٔ حفاظتی (۱۹۸۹ کیلو گرم در هکتار) (شکل B-۴) به‌دست آمد. توده‌های تک‌گزینی و تک‌گزینی+باد افتاده به‌ترتیب دارای کمترین مقدار محتوای کربن خشک‌دار خرد و درشت بودند. ترتیب محتوای کربن خشک‌دار کل نیز عبارت بود از: حفاظتی > پناهی > تک‌گزینی > تک‌گزینی+باد افتاده (شکل C-۴).



شکل ۳. زی‌تودهٔ خشک‌دار خرد (A)، درشت (B) و کل (C) در توده‌های مورد مطالعه



شکل ٤. محتوای کربن خشک‌دار خرد (A)، درشت (B) و کل (C) در توده‌های مورد مطالعه

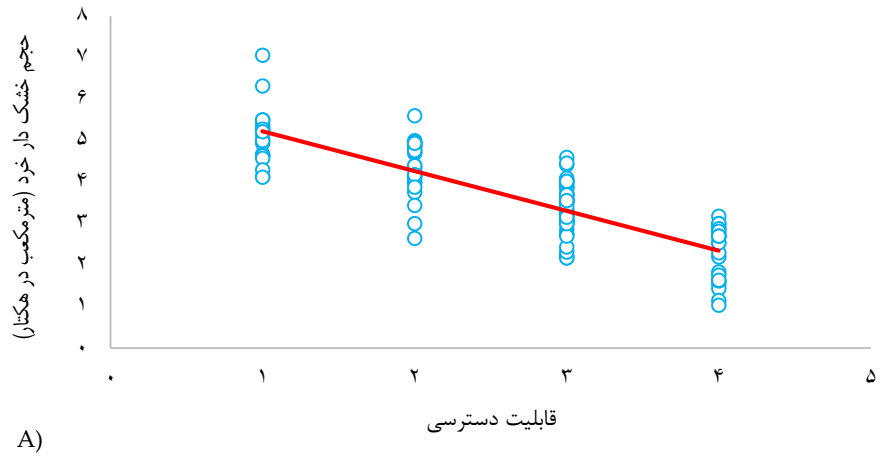
۳-۴. همبستگی فراوانی و حجم خشک‌داردرشت و خرد با مشخصات و موقعیت توده‌ها

نتایج آزمون‌های همبستگی در جدول ۲ ارائه شده است. فراوانی و حجم خشک‌دار (هم خرد و هم درشت) با قابلیت دسترسی به توده همبستگی معنی‌دار منفی ($P<۰/۰۱$) داشتند (شکل A-۵ و شکل B-۵). حجم خشک‌دار خرد با فاصله از جاده ($P<۰/۰۵$) و با شیب زمین ($P<۰/۰۱$) همبستگی معنی‌دار مثبت داشت. فراوانی خشک‌دار خرد با فاصله از جاده همبستگی معنی‌داری نداشت، اما فراوانی خشک‌دار درشت با فاصله از جاده همبستگی معنی‌دار مثبت ($P<۰/۰۵$) داشت. در مقابل، حجم خشک‌دار خرد با فاصله از جاده همبستگی معنی‌دار مثبت ($P<۰/۰۵$)، اما حجم خشک‌دار درشت با فاصله از جاده همبستگی معنی‌داری نداشت. همچنین فراوانی خشک‌دار (هم خرد و هم درشت) با شیب زمین همبستگی معنی‌داری نداشتند، اما حجم آنها با شیب زمین همبستگی معنی‌دار مثبت ($P<۰/۰۱$) داشتند.

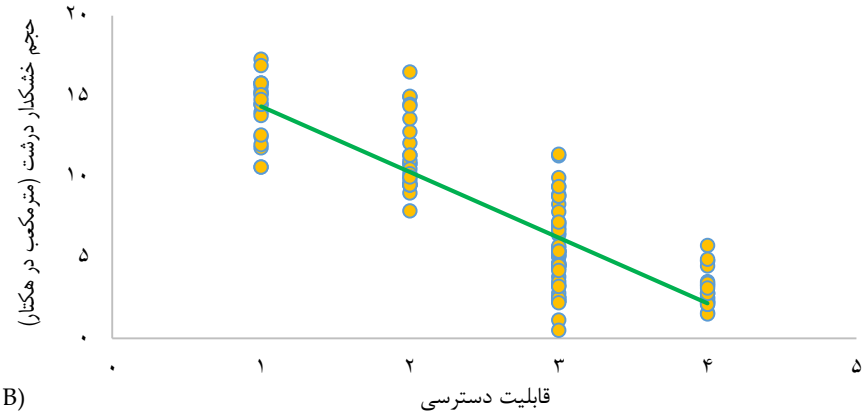
جدول ۳. نتایج آزمون همستگی پیرسون (r-value) بین فراوانی و حجم خشک‌دار خرد و درشت با فاصله از جاده، شیب زمین و قابلیت دسترسی به جنگل

متغیر	خشک دار خرد		خشک دار درشت	
	فراوانی (تعداد در هکتار)	حجم (مترمکعب در هکتار)	فراوانی (تعداد در هکتار)	حجم (مترمکعب در هکتار)
فاصله از جاده (متر)	۰/۳۲۳۶ N.S	۰/۳۴۷۶ *	۰/۳۵۰۱ *	۰/۲۷۷۳ N.S
شیب زمین (درصد)	۰/۱۱۴۶ N.S	۰/۴۶۴۴ **	۰/۱۸۴۳ N.S	۰/۴۷۵۲ **
قابلیت دسترسی	- ۰/۵۷۸۲ **	- ۰/۸۲۹۹ **	- ۰/۷۱۰۵ **	- ۰/۸۶۲۹ **

N.S: فاقد تفاوت معنی‌دار، *: تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، **: تفاوت معنی‌دار در سح ۰/۰۱.



A)



B)

شکل ۵. همبستگی پیرسون حجم خشک‌دار خرد و قابلیت دسترسی (A)، حجم خشک‌دار درشت و قابلیت دسترسی (B)

معادلهٔ همبستگی پیرسون بین حجم خشک‌دار خرد و قابلیت دسترسی مطابق رابطهٔ ۵ است. در این رابطه، حجم خشک‌دار خرد (FWD_V) برحسب متر مکعب در هکتار و A قابلیت دسترسی به توده است.

$FWD_V = - ۰/۹۵۹۵ (A) + ۶/۱۸۶۵$ $(R^2=۰/۶۸۸۸, F=۲۶۹/۴۸۸, Sig.=۰/۰۰۰)$ رابطهٔ ۵

مقدار t محاسبه شده برای شیب خط (۰/۹۵۹۵ –) و عرض از مبداء (۶/۱۸۵۸) به‌ترتیب برابر ۱۶/۲۶۹– و ۳۷/۲۸ به‌دست آمد که هر دو در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بودند. معادلهٔ همبستگی پیرسون بین حجم خشک‌دار درشت و قابلیت دسترسی مطابق رابطهٔ ۶ است. در این رابطه، حجم خشک‌دار درشت (CWD_V) برحسب متر مکعب در هکتار و A قابلیت دسترسی است.

$CWD_N = - ۴/۰۶۸۷ (A) + ۱۸/۴۴۲۰$ $(R^2=۰/۷۴۴۷, F=۳۱/۳۷۸, Sig.=۰/۰۰۰)$ رابطهٔ ۶

مقدار t محاسبه شده برای شیب خط (۴/۰۶۸۴ –) و عرض از مبداء (۱۸/۴۴۲۰) به‌ترتیب برابر۱۷/۶۷۹– و ۲۸/۳۸۲ به دست آمد که هر دو درسطح ۰/۰۱ معنی‌دار بودند.

۴. بحث

این پژوهش به‌طور جامع تأثیر شیوه‌های مدیریت جنگل بر کمیت، کیفیت و پویایی خشک‌دار درشت و خرد را در جنگل‌های هیرکانی مورد بررسی قرار داد. یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که نوع و شدت مداخلهٔ مدیریتی، عامل تعیین‌کننده‌ای در ساختار و کارکرد این ذخایر اکولوژیک است. تجمع و تجزیهٔ خشک‌دار درشت و خرد فرآیندهایی هستند که روی زیستگاه، ساختار خاک، ورودی‌های مواد آلی، حسایت به آتش‌سوزی و چرخه‌های انرژی و مواد مغذی در بوم سازگان‌های جنگلی تأثیر می‌گذارند [۱۷]. در مواجهه با تغییرات اقلیمی که ممکن است منجر به آشفتگی تودهٔ جنگلی در مقیاس بزرگ مانند خطر آتش‌سوزی، بروز طوفان، وزش باد شدید و بارش برف زیاد، حملهٔ قارچ‌های بیماری‌زا و شیوع حشرات شود [۱۸]و همچنین با توجه به لزوم ایجاد شرایط محیطی مطلوب برای توسعهٔ تنوع زیستی کل بوم سازگان جنگلی، این سوال در مورد مقدار و ساختار مطلوب خشک‌دار درشت و خرد مطرح می‌شود [۱۹].

۴–۱. تأثیر شیوهٔ مدیریت بر ذخایر حجمی و زیستی

مطابق با انتظار، تودهٔ حفاظتی با بیشترین حجم و زی‌تودهٔ خشک‌دار درشت (۲۵/۱۴ مترمکعب در هکتار) و (۳۰۲۸ کیلوگرم در هکتار) به‌عنوان الگوی پایهٔ بوم سازگان عمل می‌کند. این حجم بالا حاصل فرآیندهای طبیعی مرگ و میر، شکستگی و تجمع تدریجی در طول زمان، بدون هرگونه خروج توسط انسان است. لازم به تأکید است که حجم بالای خشک‌دار در این توده، بخشی جدایی‌ناپذیر از ساختار جنگلی کامل‌تر و با حجم سرپای بالاتر آن است که خود نتیجهٔ مستقیم حفاظت بلندمدت محسوب می‌شود. در مقابل، توده تک‌گزینی+باد افتاده به‌دلیل برداشت دو مرحله‌ای درختان سرپا و درختان باد افتاده، کمترین مقدار حجم و زی‌توده هر دو جزء خشک‌دار درشت و خرد را نشان داد که تأثیر مخرب فعالیت‌های انسانی مکرر را بر چرخهٔ مواد آلی تأیید می‌کند. نتایج جالب‌تر مربوط به توده‌های بهره‌برداری شده است. تودهٔ پناهی (با ۴۰ سال فاصله از برداشت) حجم و زی‌تودهٔ خشک‌دار درشت نزدیک‌تری به تودهٔ حفاظتی داشت تا تودهٔ تک‌گزینی (۱۰ سال فاصله). این الگو به‌وضوح حاکی از فرآیند تدریجی بازیابی ذخایر خشک‌دار درشت طی دهه‌ها پس از بهره‌برداری است و نشان می‌دهد که رژیم‌های مدیریتی با شدت پایین (مانند پناهی) در بازه‌های زمانی طولانی‌مدت، می‌توانند به وضعیتی نزدیک به بوم سازگان‌های دست‌نخورده بازگردند. با این حال، باید در نظر داشت که این بازیابی، حاصل تعامل اثر مدیریت با زمان سپری‌شده و نیز ویژگی‌های ذاتی توده (از جمله ترکیب گونه‌ای و ساختار باقی‌مانده) است. در کوتاه‌مدت (مثل ۱۰ سال در تک‌گزینی)، حجم خشک‌دار درشت عمدتاً از ضایعات عملیات برداشت ناشی می‌شود که نسبت به قطعات بزرگ‌تر در مراحل پیشرفته‌تر پوسیدگی، سریع‌تر تجزیه می‌شوند. الگوی خشک‌دار خرد پیچیده‌تر بود، به‌طوری که تودهٔ پناهی بیشترین حجم و تودهٔ تک‌گزینی+بادافتاده بیشترین فراوانی را داشتند. این موضوع نشان می‌دهد که خشک‌دار خرد به‌عنوان جزء با سرعت تجزیهٔ زیاد، پاسخ‌پذیری سریع‌تری به اختلالات نشان می‌دهد. افزایش خشک‌دار خرد در تودهٔ تک‌گزینی+ بادافتاده می‌تواند نتیجهٔ مستقیم آسیب فیزیکی به درختان (شکسته شدن شاخه‌ها) ناشی از وزش باد پس از کاهش تراکم توده باشد که با

یافته‌های Lombardi و همکاران (۲۰۰۸) [۲۰] مطابقت دارد. Behjo و همکاران (۲۰۲۳) [۲۱] حجم خشک‌دار درشت در توده‌های مدیریت شده و نشدهٔ جنگل‌های اسالم را به‌ترتیب ۳/۳۱ و ۳/۱۰ متر مکعب در هکتار گزارش کردند. علاوه بر مدیریت جنگل و نوع آن، عوامل متعددی بر فراوانی و حجم خشک‌دار درشت و خرد تأثیرگذارند، که از مهمترین آنها می‌توان به قابلیت دسترسی به توده و استفاده از آن به عنوان چوب سوخت نام برد [۱۶، ۲۱]. باید توجه داشت که تفاوت در ترکیب گونه‌ای بین توده‌ها (سه توده راشستان، یک توده راش–ممرز و تودهٔ شاهد مخلوط) می‌تواند بر الگوهای پوسیدگی و نرخ تجزیه تأثیر گذاشته باشد، امری که به‌دلیل دشواری شناسایی گونه در قطعات پوسیده در این مطالعه به‌صورت کمی تفکیک نشد و پیشنهادی برای تحقیقات آتی است. در نهایت، تفسیر این نتایج باید با در نظر گرفتن این محدودیت روش‌شناختی صورت گیرد که اثرات مدیریت، زمان و شرایط رویشگاه به‌طور کامل از یکدیگر قابل تفکیک نبوده‌اند. با این حال، یافته‌ها تصویر روشنی از پیامدهای آشکار و بلندمدت رژیم‌های مدیریتی مختلف بر یکی از اجزای حیاتی تنوع زیستی و چرخهٔ کربن جنگل ارائه می‌دهد.

۴–۲. پویایی تجزیه و ذخیرهٔ کربن

توزیع طبقات پوسیدگی گویای تاریخچهٔ مدیریت و سرعت گردش مواد است. توده‌های حفاظتی و پناهی دارای توزیع نسبتاً متعادلی از همهٔ طبقات، با سهم بالای طبقات پوسیدگی پیشرفته درجهٔ سه و چهار بودند. این نشان‌دهندهٔ یک روند طبیعی و پیوسته ورود مواد و تجزیه در یک بازهٔ زمانی طولانی است. در مقابل، تودهٔ تک‌گزینی+بادافتاده، سهم غالب (حدود ۵۰ درصد) از خشک‌دارهای تازه (طبقهٔ یک) داشت که حاکی از ورود ناگهانی و زیاد خشک‌دار تازه ناشی از اختلالات شدید و مکرر (بهره‌برداری و بادافتادگی) است. باید توجه داشت که تفاوت در ترکیب گونه‌ای بین توده‌ها نیز می‌تواند بر این الگوی پوسیدگی مؤثر باشد، چرا که گونه‌های با دوام متفاوت (مانند راش در مقابل ممرز) با سرعت‌های متفاوتی تجزیه می‌شوند. با این حال، غلبهٔ قطعی قطعات تازه در توده‌ای که بیشترین شدت اختلال را تجربه کرده، نشان می‌دهد که اثر مدیریت، عاملی تعیین‌کننده‌تر در این مورد خاص بوده است. این خشک‌دارهای درشت و خرد تازه، اگرچه در کوتاه‌مدت ذخیرهٔ کربن را افزایش می‌دهند، اما به مرور زمان و با تجزیهٔ سریع‌تر، ممکن است منجر به نوسانات بزرگ‌تری در انتشار کربن شوند [۸]. ذخیرهٔ کل کربن در خشک‌دارهای درشت و خرد به‌طور مستقیم از الگوی زی‌توده پیروی کرد. تودهٔ حفاظتی با ۱۵۱۴ کیلوگرم کربن در هکتار در خشک‌دار درشت، به‌وضوح کارکرد برتر خود به‌عنوان یک مخزن کربن بلندمدت و پایدار را نشان داد. تفاوت چشمگیر در محتوای کربن خشک‌دار درشت بین تودهٔ حفاظتی (۱۵۱۴ کیلوگرم در هکتار) و توده‌های مدیریت‌شده (مانند ۶۷۳ کیلوگرم کربن در هکتار در توده تک گزینی+باد افتاده)، بر تأثیر منفی مدیریت‌های شدید و مکرر بر کاهش ظرفیت ترسیب کربن جنگل‌های هیرکانی صحه می‌گذارد. نکتهٔ دارای اهمیت در این رابطه آن است که سرعت تجزیهٔ بالای خشک‌دار خرد نسبت به خشک‌دار درشت، می‌تواند با افزایش انتقال مادهٔ آلی به خاک در مدت زمانی کوتاه، به توسعهٔ غنای گیاهی کمک شایانی نماید [۱۳، ۲۲، ۲۳]. بررسی‌های Barbosa و همکاران (۲۰۱۷) [۲۴] در این زمینه نشان می‌دهد که علاوه بر قطر پایین، وجود لیگنین کمتر در خشک‌دار خرد، نرخ تجزیهٔ آنها را افزایش می‌دهد. از طرفی در مقایسه با خشک‌دار درشت، بافت بیشتری از خشک‌دار در تماس مستقیم با بستر خاک دارد و سبب افزایش فرآیند تجزیه می‌شود [۲۵–۲۶].-با این حال، نقش کیفیت شیمیایی اولیهٔ چوب (گونه) و شرایط میکرواقلیمی تودهٔ جنگل نیز در این فرآیندها تعیین‌کننده است. نتایج بررسی Sefidi (۲۰۲۰) در جنگل‌های شمال نشان داد که سرعت تجزیهٔ خشک‌دارهای درشت و خرد در ارتباط با گونهٔ درخت و شکل زمین بود [۱۲]. یافتهٔ ما دربارهٔ فراوانی بالای خشک‌دارهای خرد در توده تک‌گزینی+بادافتاده نیز با این منطق سازگار است، چرا که اختلال فیزیکی ناشی از باد، علاوه بر تولید زیاد خشک‌دار خرد، می‌تواند با تغییر میکرواقلیم (مانند افزایش نور و نوسان رطوبت)، شرایط را برای تجزیهٔ سریع‌تر نیز مساعد کند. در نهایت، این الگوهای مشاهده‌شده برای پوسیدگی و کربن، همگی بر اهمیت در نظر گرفتن افق‌های زمانی بلندمدت در مدیریت جنگل تأکید دارند، در حالی‌که اختلالات شدید، گردش مواد و کربن را در کوتاه‌مدت تسریع می‌کنند، رژیم‌های مدیریتی با شدت پایین یا حفاظت، در درازمدت مخازن پایدارتر و با عملکرد اکولوژیک کامل‌تری ایجاد می‌کنند.

۴-۳. رابطهٔ خشک‌دار درشت و خرد با ویژگی‌های توده

آنالیز همبستگی، قابلیت دسترسی را به‌عنوان قوی‌ترین عامل تعیین‌کنندهٔ کمیت خشک‌دار درشت و خرد شناسایی کرد. همبستگی منفی قوی (برای مثال ۰/۸۶- برای حجم خشک‌دار درشت) به این معنی است که با کاهش دسترسی و در نتیجه کاهش شدت بهره‌برداری و تردد، حجم خشک‌دارهای درشت و خرد به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این نتایج مطابق با یافته‌های Kiadaliri و همکاران (۲۰۲۳) [۲۷] و Behjou و همکاران (۲۰۱۸) [۱۰] در جنگل های شمال ایران است. این یافته، شاهدی کلیدی برای تأثیر مستقیم و تعیین‌کنندهٔ فعالیت انسانی است. رابطهٔ مثبت معنی‌دارحجم FWD با شیب زمین احتمالاً به دو دلیل است: اول، سختی عملیات برداشت در شیب‌های تند که منجر به رهاسازی بیشتر ضایعات خرد می‌شود، و دوم، احتمال بیشتر شکسته شدن درختان در اثر رعدوبرق یا رانش در اراضی شیب‌دار. رابطهٔ مثبت فراوانی خشک‌دار درشت با فاصله از جاده نیز مجدداً بر نقش کاهش دخالت انسان در انباشت خشک‌دارهای درشت و خرد تأکید می‌کند. اندازه، فراوانی و پراکنش خشک‌دار درشت و خرد بسیار متغیر و وابسته به تیپ جنگل، مرحلهٔ توالی جنگل، آب و هوا و عملیات مدیریت جنگل دارد [۲۸-۳۴]. شیوه‌های متفاوت مدیریت و برداشت چوب همراه با آتش سوزی‌ها منجر به ایجاد شرایط متفاوتی جنگل شده و منجر به تغیرات در کمیت و کیفیت خشک‌دار درشت و خرد می‌شود. همچنین مقدار خشک‌دار درشت و خرد، مخصوصاً خشک‌دار درشت بستگی به قابلیت دسترسی به آنها دارد [۱۰، ۳۵، ۳۶].

با توجه به تفاوت‌های ساختاری و تاریخی توده‌ها، از جمله تفاوت در تراکم، تیپ گونه‌ای، ارتفاع متوسط و زمان سپری شده از آخرین بهره‌برداری، امکان کنترل کامل این عوامل در تحلیل‌های آماری این مطالعه فراهم نبود. این محدودیت به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های کامل و همچنین محدودیت زمانی در انجام نمونه‌برداری و تحلیل‌های تکمیلی رخ داده است. از این‌رو، بخشی از تفاوت‌های مشاهده‌شده بین توده‌های مدیریتی ممکن است علاوه بر اثر مدیریت، متأثر از تفاوت‌های ساختاری توده‌ها باشد. با این حال، با توجه به اینکه طراحی مطالعه و نمونه‌برداری در همهٔ توده‌ها به‌صورت یکنواخت و استاندارد انجام شده و هدف اصلی مقایسهٔ نسبی شیوه‌های مدیریتی بوده است، نتایج ارائه‌شده همچنان می‌تواند دیدگاه‌های ارزشمندی دربارهٔ اثر مدیریت بر خشک‌دارهای درشت و خرد فراهم کند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این عوامل در طراحی مطالعه از نظر ساختاری همسان‌سازی شوند.

۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که شیوه‌های مدیریت جنگل اثرات متفاوت و عمیقی بر ذخیره، پویایی و کارکرد اکولوژیک خشک‌دار درشت و خرد می‌گذارد. شیوه‌های مدیریتی نزدیک‌تر به طبیعت مانند حفاظتی، نه تنها ذخایر حجمی و کربنی بیشتری را حفظ می‌کنند، بلکه با ایجاد توزیع متعادلی از طبقات پوسیدگی، تنوع ساختاری و پیوستگی زیستگاه را برای گونه‌های وابسته تضمین می‌نمایند. در مقابل، شیوه‌هایی مانند تک‌گزینی (به‌ویژه همراه با بادافتادگی)، این مخزن حیاتی را تخلیه کرده و پویایی آن را به‌سمت انباشت مواد تازه و با سرعت تجزیهٔ بالا سوق می‌دهند. شیوهٔ پناهی نیز با توجه به مدت زمان طولانی سپری شده از آخرین برش (۴۰ سال) دارای ذخایر زی‌توده و کربن خشک‌دار نزدیک‌تری به تودهٔ حفاظتی داشت. توصیه‌های مدیریتی برخاسته از این یافته‌ها عبارتند از: ۱) اولویت‌دادن به شیوه‌های برداشت با شدت کمتر و چرخهٔ بهره‌برداری طولانی‌تر برای حفظ کارکردهای اکولوژیک خشک‌دار درشت و خرد، ۲) حفظ عرصه‌های با قابلیت دسترسی دشوار و شیب زیاد به‌عنوان ذخایر طبیعی برای انباشت خشک‌دار درشت و خرد و تنوع زیستی و ۳) پرهیز از پاکسازی کامل ضایعات چوبی از عرصه‌های بهره‌برداری شده و رهاسازی بخشی از آن به‌ویژه قطعات با قطر بیشتر، برای تسریع بازیابی چرخهٔ مواد. برای درک بیشتر، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی پویایی تجزیه و آزادسازی کربن خشک‌دارهای درشت و خرد در این توده‌های مختلف و نیز ارتباط کمی جوامع بی‌مهرگان و قارچ‌های تجزیه‌کننده با ویژگی‌های کیفی خشک‌دار درشت و خرد تحت مدیریت‌های متفاوت مورد بررسی قرار گیرند. در مجموع در جنگل‌های طبیعی (خصوصاً نواحی شمال ایران) مدیریت تک‌گزینی بدون در نظر گرفتن چوب مرده، به کاهش معنی‌دار در حجم و تنوع خشک‌دار منجر می‌شود. بنابراین هر گونه تحقیق یا طرح برداشت چوب باید همراه با طرح مدیریت خشک‌دار درشت و خرد باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه گیلان انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیهٔ پیشنویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی که یافته‌های این مطالعه را پشتیبانی می‌کنند، متعلق به دانشگاه گیلان بوده و به‌دلیل مفاد قرارداد پروژهٔ تحقیقاتی به‌صورت عمومی در دسترس نیستند. محدودیت‌هایی برای دسترسی به این داده‌ها اعمال می‌شود.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرآیند نوشتن

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسنده(گان) از هوش مصنوعی Deepseek به‌منظور تنظیم منابع مورد استفاده، تهیه چکیده فارسی و انگلیسی و بازبینی متن استفاده کردند. پس از استفاده از این ابزار، نویسنده(گان) مطالب را در صورت نیاز بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری دانشگاه گیلان است. نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از دانشگاه گیلان و ادارهٔ کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان اعلام می‌دارند. همچنین از کمک‌های ارزشمند آقایان فاتح ناصری و فائر ناصری در جمع‌آوری داده‌های این تحقیق صمیمانه سپاسگزارند.

References

[1] Fukasawa, Y. (2012). Effects of wood decomposer fungi on tree seedling establishment on coarse woody debris. *Forest Ecology and Manag*ement, 266, 232-238.

[2] Kunttu, P., Junninen, K. & Kouki, J. (2015). Dead wood as an indicator of forest naturalness: A comparison of methods. *Forest Ecology and Manag*ement, 353, 30-40.

[3] Jonsson, B.G., Ekström, M., Esseen, P.A., Grafstrom, A., Stahl, G. & Westerlund, B. (2016). Dead wood availability in managed Swedish forests—Policy outcomes and implications for biodiversity. *Forest Ecology and Management*, 376, 174-182.

[4] Jaroszewicz, B., Cholewinska, O., Checko, E. & Wrzosek, M. (2021). Predictors of diversity of deadwood-dwelling macrofungi in a European natural forest. *Forest Ecology and Manag*ement, 490, 119123.

[5] Tavankar, F., Latterini, F., Nikooy, M., Venanzi, R., Naghdi, R. & Picchio, R. (2021). Influence of forest management and sylvicultural treatments on abundance of snags and tree cavities in mountain mixed beech forests. *Environments*, 8(6), 55.

[6] Lutz, J.A., Struckman, S., Furniss, T.J., Birch, J.D., Yocom, L.L. & McAvoy, D.J. Large-diameter trees, snags, and deadwood in southern Utah, USA. *Ecological Processing*, 10(1), 1-12.

[7] Iranian Organization of Natural Resources and Watersheds, Forest Section, Guidelines for preparing sustainable management plan for Hyrcanian forests, Section of measuring and statistics, Version 14020715, 25 p.

[8] Harmon, M.E., K. Bible, M.G. Ryan, D.C. Shaw, H. Chen, J. Klopatek & and X. Li, (2004). Production, respiration, and overall carbon balance in an old-growth Pseudotsuga Tsuga forest ecosystem, *Ecosystems*, 7(5), 498-512.

[9] Öder, V., Petritan, A.M., Schellenberg, J., Bergmeier, E. & Walentowski, H. (2021). Patterns and drivers of deadwood quantity and variation in mid-latitude deciduous forests. *Forest Ecology and Manag*ement, 487, 118977.

[10] Behjou, F.K., Aghayari, F. & Ghanbari, S. (2023). Management and the amount and density of woody debris at the West forests of Guilan Province. *Human and Environment*, 21(1), 51-64.

[11] Izadi, S. & Sohrabi, H. (2015). Estimating the volume of coarse woody debris of forest floor using sampling with probability proportional methods. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 23(2), 222-233.

[12] Sefidi, K. (2020). The Influence of Geomorphological Characteristics of Forest Sites on the Decay Dynamics of Dead Trees in Asalem Forests, Western Hyrcanian Region. *Ecology of Iranian Forests*, 7(14), 70-79.

[13] Corace, R.G., Seefelt, N.E., Goebel, P.C. & Shaw, H.L. (2010). Snag longevity and decay class development in a recent jack pine clear-cut in Michigan. *Northern Journal of Applied. Forestry*, 27(4), 125-131.

[14] Lo Monaco, A., Luziatelli, G., Latterini, F., Tavankar, F. & Picchio, R. (2020). Structure and Dynamics of Deadwood in Pine and Oak Stands and their Role in CO_2 Sequestration in Lowland Forests of Central Italy. *Forests*, 11(3), 253.

[15] Jones, D.A. & O'Hara, K.L. (2016). The influence of preparation method on measured carbon fractions in tree tissues. *Tree Physiology*, 36(9), 1177-1189.

[16] Wisdom, M.J. & Bate, L.J. (2008). Snag density varies with intensity of timber harvest and human access. *Forest Ecology and Manag*ement, 255(7), 2085-2093

[17] Bantle, A., Borken, W. & Matzner, E. (2014). Dissolved nitrogen release from coarse woody debris of different treespecies in the early phase of decomposition. *Forest Ecology and Management*, 334, 277-283.

[18] Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J. & Schuck, A. (2003). Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, 9(11), 1620-1633.

[19] Banas, J., Bujoczek, L., Zieba, S. & Drozd, M. (2014). The effects of different types of management, functions, and characteristics of stands in Polish forests on the amount of coarse woody debris. *European Journal of Forestry Research*, 133(6), 1095-1107.

[20] Lombardi, F., Lasserre, B., Tognetti, R. & Marchetti, M. (2008). Deadwood in Relation to Stand Management and Forest Type in Central Apennines (Molise, Italy). *Ecosystems*, 11(6), 882-894.

[21] Behjou, F.K., Lo Monaco, A., Tavankar, F., Venanzi, R., Nikooy, M., Mederski, P.S. & Picchio, R. (2018). Coarse Woody Debris Variability Due to Human Accessibility to Forest. *Forests*, 9(9), 509.

[22] Chen, Y.; Sayer, E.J.; Li, Z.; Mo, Q.; Li, Y.; Ding, Y.; Wang, J. Nutrient limitation of woody debris decomposition in a tropical forest: contrasting effects of N and Paddition. *Functional Ecology*, 30, 295-304.

[23] Shabani, S., Vahedi, A.A. 2024. Modeling the role of FWD on plant species richness using BRT. *Forest Research and Development*, 10(1), 131-147.

[24] Barbosa, R.I., Castilho, C.V., Perdiz, R.O., Damasco, G., Rodrigues, R. & Fearnside. P.M. (2017). Decomposition rates of coarse woody debris in undisturbed Amazonian seasonally flooded and unflooded forests in the Rio Negro-Rio Branco Basin in Roraima, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 397, 1-9.

[25] Law, S., Eggleton, P., Griffiths, H., Ashton, L. & Parr, C. (2019). Suspended dead wood decomposes slowly in the tropics, with microbial decay greater than termite decay. *Ecosystems*, 22(6), 1176-1188.

[26] Khan, K., Tuyen, T.T., Chen, L., Duan, W., Hussain, A., Jamil, M.A., Li, C., Guo, Q., Qu, M., Wang, Y. et al. (2021). Nutrient dynamics assessment of coarse wood debris subjected to successional decay levels of three forests types in northeast, China. *Forests*, 12(4), 401.

[27] Kiadaliri, M.; Motlagh, M.G.; Sohrabi, H.; Latterini, F.; Lo Monaco, A.; Venanzi, R. & Picchio, R. (2023). The Effects of Forest Accessibility on the Quantitative and Qualitative Characteristics of Deadwood: A Comparison between Recreational and Natural Forests. *Sustainability*, 15(13), 10592.

[28] Fan Z., Larsen D.R., Shilley S.R. & Thompson F.R. (2003). Estimating cavity tree abundance by stand age and basal area, Missouri, USA. *Forest Ecology and Management*, 179(1-3), 231-242.

[29] Fan Z., Shifley S.R., Thompson, F.R. & Larsen, D.R. (2004). Simulated cavity tree dynamics under alternative timber harvest regimes. *Forest Ecology and Management*, 193(3), 399-412.

[30] Christensen, M., Hahn, K., Mountford, E.P., Ódor Standovár, T., Rozenbergar, D., Diaci, J., Wijdeven, S., Meyer, P., Winter, S., Vrska, T. (2005). Dead Wood in European Beech (*Fagus sylvatica*) Forest Reserves. *Forest Ecology and Management*, 210(1-3), 267-282.

[31] Böhl J. & Brändli U.B. (2007). Deadwood volume assessment in the third swiss national forest inventory: methods and first results. *European Journal of Forest Research*, 126(3), 449-457.

[32] Nagaike T. (2009). Snag abundance and species composition in a managed forest landscape in central Japan composed of Larix kaempferi plantation and secondary broadleaf forests. *Silva Fennica*, 43(5), 755-766.

[33] Sefidi, K. & Marvie Mohadjer, M.R. (2010). Characteristics of coarse woody debris in successional stages of natural beech (*Fagus orientalis*) forests of Northern Iran. *Journal of Forest Science*, 56(1), 7-17.

[34] Tavankar, F., Kivi, A.R., Taheri-Abkenari, K., Lo Monaco, A., Venanzi, R. & Picchio, R. (2022). Evaluation of Deadwood Characteristics and Carbon Storage under Different Silvicultural Treatments in a Mixed Broadleaves Mountain Forest. *Forests*, 13(2), 259.

[35] Bate, L.J., Wisdom, M.J. & Wales, B.C. (2007). Snag densities in relation to human access and associated management factors in forests of northeastern Oregon. *Landscape and Urban Planning*, 80(3), 278-291.

[36] Wisdom, M.J. & Bate, L.J. (2008). Snag density varies with intensity of timber harvest and human access. *Forest Ecology and Manag*ement, 255(7), 2085-2093.