

Accumulation trend of fine woody debris volume stock in the altitudinal range of Kheiroud research forest, Iran

A.A. Vahedi^{*1}, A. Fallah² and N. Nazariani³

1* - Corresponding author, Assistant Prof., Forests and Rangelands Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran. Email: as.vahedi@areeo.ac.ir

2- Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Sari, Iran

3- Postdoctoral Researcher in Forestry, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Sari, Iran

Received: 31.05.2023

Accepted: 28.06.2023

Abstract

Background and objectives: Background and Objectives: Given the significance of fine woody debris (FWDs) in the context of the carbon cycle, climate change, and its implications for renewable energy and economic development, it is imperative to obtain accurate information on the dispersion of FWDs volume stock for effective management of Hyrcanian forests in Iran.

Methodology: This study was conducted in the Kheiroud forest in Nowshahr county, Iran, employing cluster sample plots distributed along the altitude range of 100-1815 meters above sea level (m.a.s.l.). Circular sample plots were established within each cluster, employing a line transect with a constant azimuth of 150 degrees and a radius length of 7.32 meters. Three diameter classes (1-2.5 cm, 2.5-4.5 cm, and 4.5-7.5 cm) were measured based on line-intersected fallen woods. The coordinates of the samples were recorded, and kriging and inverse distance weighted (IDW) methods were utilized to elucidate the autocorrelation of FWDs volume stock. Stand type, aspect variations, and altitudinal range were considered as main factors in the multiple-way ANOVA.

Results: The findings revealed that the mean FWDs volume stock for each diameter class was 2.14, 6.01, and 16.23 m³/ha in the studied forest. Notably, fluctuations in the FWDs at the third diameter class were less pronounced than in other diameter classes. The goodness of fit data between observations and estimations indicated that both Kriging and IDW techniques estimated responses with low accuracy ($R^2 = 0.16$; RMSE = 6.32) and no accuracy ($R^2 = 0.04$; RMSE = 21.17; $R^2 = 0.03$; RMSE = 37.11). Geostatistical techniques demonstrated that FWDs volume stock cannot be considered a regional variable, lacking autocorrelation and spatial correlation. Consequently, ANOVA results, based on observed power and partial eta squared, revealed that the interaction of altitude, stand type, and aspect did not significantly influence variations in FWDs volume stock ($P > 0.05$). Pairwise comparisons based on the LSD test indicated that the marginal mean of FWDs in the first diameter class was significantly different only along the altitude ($P < 0.05$).

Conclusion: In conclusion, the observed variation in FWDs volume stock at different diameter classes appears to be random and independent of the considered interactions. However, complex ecological and biological factors likely contribute to the dispersion of FWDs volume stock in the studied forest.

Keywords: Bioenergy, geostatistical technique, Kheiroud forest, slope aspect, stand type.

روند انباشت موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در گرادیان ارتفاعی جنگل پژوهشی خیرود در نوشهر

علی اصغر واحدی^{۱*}، اصغر فلاح^۲ و نسترن نظریانی^۳

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران. پست الکترونیک: as.vahedi@areeo.ac.ir

۲- استاد، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ساری، ایران

۳- پژوهشگر پسادکتری جنگل‌داری، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ساری، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

چکیده

سابقه و هدف: خشک‌دارهای ریز به دلیل اهمیت بیش‌ازپیش انرژی‌های تجدیدپذیر در توسعه اقتصادی، نقش آشکاری در چرخه کربن و تغییر اقلیم ایفا می‌کنند. بنابراین ضروری است که اطلاعات دقیقی از پراکندگی موجودی حجمی خشک‌دارهای مزبور برای روند مدیریتی جنگل‌های هیرکانی به‌خصوص برای شرایط پساتنفس (پس از اتمام اجرای مصوبه استراحت جنگل) در دسترس باشد. مواد و روش‌ها: پژوهش پیش‌رو در جنگل پژوهشی خیرود نوشهر در امتداد ارتفاع ۱۰۰ تا ۱۸۱۵ متر از سطح دریا با استفاده از طرح قطعه‌نمونه خوشه‌ای انجام شد. هر قطعه‌نمونه با شعاع ۷/۳۲ متر با زاویه‌های آزیموت صفر، ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه به‌شکل مثلث در قالب یک خوشه با فاصله ۳۶/۶ متر از یکدیگر پیاده شدند. یک قطعه‌نمونه دیگر نیز با همان مساحت در مرکز این طراحی جانمایی شد. در داخل هر قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل در راستای شعاع ۷/۳۲ متر (در قالب یک خط ترانسکت) و در یک آزیموت ثابت ۱۵۰ درجه، قطر خشک‌دارهای ریز در سه طبقه قطری شامل یک تا ۲/۵، ۲/۵ تا ۴/۵ و ۴/۵ تا ۷/۵ سانتی‌متر بر مبنای انقطاع محور مرکزی چوب‌های افتاده با خط‌نمونه اندازه‌گیری شد. همه قطعه‌نمونه‌ها در هریک از گرادیان ارتفاعی به‌طور تصادفی پیاده‌سازی شدند. پس از ثبت مختصات هریک از خشک‌دارهای ریز از تکنیک کریجینگ و فاصله معکوس وزنی برای ارزیابی خودهمبستگی مکانی تغییرات موجودی حجمی آن‌ها استفاده شد. تغییرات تیپ توده و جهت دامنه هم‌راستا با تغییرات دامنه ارتفاعی به‌عنوان اثرات اصلی در تحلیل واریانس چندطرفه بررسی شدند.

نتایج: میانگین موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در جنگل مورد پژوهش به ترتیب طبقه‌های قطری مزبور ۲/۱۴، ۶/۰۱ و ۱۶/۲۳ متر مکعب در هکتار برآورد شد. از طرفی نتایج نشان داد که تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در کلاسه سوم قطری نسبت به سایر کلاسه‌های قطری دارای نوسانات کمتری است. برآیند برازش بین مشاهده‌ها و مقادیر تخمینی حاصل از پهنه‌بندی و محاسبات تکنیک‌های کریجینگ و فاصله معکوس وزنی برای موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز (بر مبنای ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا) حاکی از دقت برآوردی بسیار ضعیف ($RMSE = ۶/۳۲$ ، $R^2 = ۰/۱۶$) و غیرقابل قبول ($۲۱/۱۷ = RMSE$ ، $R^2 = ۰/۰۴$ ؛ $RMSE = ۳۷/۱۱$ ، $R^2 = ۰/۰۳$) بود. در واقع نتایج حاصل از تکنیک‌های زمین‌آمار حاکی از آن است که مقدار موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در انواع طبقه‌های قطری به‌عنوان متغیر ناحیه‌ای محسوب نمی‌شود و پراکندگی آن‌ها در گرادیان ارتفاعی، همبستگی مکانی ندارد. براین اساس، نتایج تحلیل واریانس چندطرفه مبتنی بر اندازه اثر و توان مشاهده نشان داد که اثرات متقابل گرادیان ارتفاعی، تیپ توده و جهت دامنه بر تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های مختلف قطری، معنی‌دار نیستند ($P > ۰/۰۵$). همچنین، خروجی‌های حاصل از آزمون مقایسه اثرات اصلی (LSD) به‌صورت مقایسه جفتی با احتساب فراوانی انواع خشک‌دارهای ریز در طبقات قطری مختلف نشان داد که فقط تغییرات میانگین حاشیه‌ای موجودی حجمی در خشک‌دارهای ریز طبقه اول قطری در گرادیان ارتفاعی، معنی‌دار بود ($P < ۰/۰۵$).

نتیجه‌گیری کلی: در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان اذعان کرد که با احتساب اثرات اصلی عوامل مذکور و با صرف نظر از پارامترهای

رویشگاهی، روابط پیچیده بوم‌شناختی و جنگل‌شناسی یا به‌دلیل ماهیت و نوع گونه خشک‌دارهای ریز، نوسان‌ها و تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در انواع طبقه‌های قطری در جنگل مورد پژوهش به‌صورت مستقل و به‌طور کامل، تصادفی است.

کلیدواژه: انرژی زیستی، تکنیک زمین‌آمار، تیپ توده، جنگل خیرود، جهت دامنه.

مقدمه

خشک‌دارهای ریز (Fine woody debris: FWDs) در بوم‌سازگان‌های جنگلی همان اجزاء جداشده از شاخه، تنه و یا ریشه‌های چوبی درختان هستند که به‌طور معمول، قطر کمتر از ۱۰ سانتی‌متر یا در بیشتر موارد تا قطر ۷/۵ سانتی‌متر را به‌خود اختصاص می‌دهند (Harmon *et al.*, 2007; Fasth *et al.*, 2011). خشک‌دارهای ریز کف جنگل به‌عنوان زیستگاه‌های خُرد برای انواع ریزاندامگان، منابع اصلی مواد آلی و عناصر غذایی خاک، مخازن اصلی کربن اتمسفری و ذخایر انرژی زیستی تلقی می‌شوند (Fasth *et al.*, 2011; Moridi *et al.*, 2016). از طرفی، خشک‌دارهای مزبور در بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌عنوان سوخت‌های هیزومی معرفی می‌شوند و در بسیاری از نظام‌های مدیریتی نیز در قالب مواد اشتعال‌زا، عامل اصلی ایجاد آتش‌سوزی در جنگل‌ها به‌شمار می‌آیند (Woodall *et al.*, 2013). با توجه به تأثیر آشکار خشک‌دارهای ریز بر بسیاری از فرایندهای زیستی و بوم‌شناسی و نقش آن‌ها در گسترش آفت‌ها و بیماری و احتمال ایجاد حریق، ضروری است که بررسی موشکافانه‌ای در زمینه تغییرات انباشت حجمی و ویژگی‌های زیست-فیزیکی دیگر این چوب‌ها انجام شود (Woodall *et al.*, 2013; Delcourt & Veraverbeke, 2022). طبق گزارش Hoffmann (2022) خشک‌دارهای ریز به‌دلیل انباشتگی و گستردگی وسیع در بوم‌سازگان‌های طبیعی جنگل، محتویات زیادی از ذخایر کربن را به‌خود اختصاص داده‌اند. از این رو، آن‌ها به‌عنوان حوضچه‌های اصلی کربن تلقی می‌شوند. در حقیقت، خشک‌دارهای ریز به‌دلیل سهم قابل‌ملاحظه در مدیریت اقتصاد سبز از نظر انرژی زیستی و ترسیب کربن برای تعدیل اثرات تغییر اقلیم با ارزش پولی قابل‌احتساب می‌توانند بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گیرند (Hoffmann, 2022).

Woodall *et al.*, 2013; Delcourt & Veraverbeke, 2022).

انباشت خشک‌دارهای ریز در جنگل‌های هیرکانی، سهم قابل‌ملاحظه‌ای از موجودی حجمی را به‌خود اختصاص داده‌اند که مقدار آن به‌طور تلویحی در برخی از رویشگاه‌ها و توده‌های مختلف جنگل‌های مذکور گزارش شده است (Sefidi *et al.*, 2014; Moridi *et al.*, 2016). به‌طور معمول در همه سیستم‌های جنگل‌شناسی و مدیریتی جنگل‌های هیرکانی، خشک‌دارهای ریز به‌عنوان مازاد مقطوعات حاصل از بهره‌برداری یا آشفستگی‌های طبیعی و غیرطبیعی مدنظر قرار گرفته‌اند و تاکنون بر استخراج انباشت حجمی این چوب‌ها از جنگل‌های مزبور تمرکز شده است (Zobeiri, 2002; Marvie, 2011). در صورتی که یکی از رویکردهای اصلی در اصول کلی مدیریت پایدار بوم‌سازگان‌های جنگلی، این است که پس از بهره‌برداری و حین حمل‌ونقل، مازاد حاصل از قطعه‌های چوب به‌خصوص خشک‌دارهای ریز به‌دلیل تأثیرگذاری بر تنوع زیستی، حاصل‌خیزی خاک و حتی تولید خالص زی‌توده در کف جنگل باقی بماند (Achat *et al.*, 2015; Hume *et al.*, 2018; Ranius *et al.*, 2018; Korboulewsky *et al.*, 2021). البته باید اذعان کرد که خشک‌دارهای ریز فقط مازاد مقطوعات جنگل محسوب نمی‌شوند. بلکه آن‌ها در بسیاری از موارد، حاصل آشفستگی‌های طبیعی، فرایندهای اکوفیزیولوژی و پدیده‌های جنگل‌شناسی از جمله هرس‌های طبیعی هستند. بر مبنای نقش انباشت خشک‌دارهای ریز در چرخه کربن در ارتباط با تغییر اقلیم و به‌دلیل اهمیت بیش‌ازپیش انرژی‌های تجدیدپذیر در توسعه اقتصادی، بسیاری از کشورها، دستورالعمل‌هایی تنظیم کرده‌اند تا براساس آن‌ها، پس از محاسبه و ارزیابی موجودی حجمی خشک‌دارها، خروج آن‌ها از بوم‌سازگان‌های جنگلی

دریا، مبنا قرار گرفت تا براین اساس، تغییرات تیپ توده‌های جنگلی به‌همراه بقیه تغییرات فیزیکی زمین مدنظر قرار گیرد. در خصوص تغییرات انباشت حجمی خشک‌دارهای ریز در جنگل‌های هیرکانی، مستندات کمی وجود دارد. اغلب پژوهش‌ها مربوط به ارزیابی و بررسی موجودی حجمی خشک‌دارهای قطور (CWDs) هستند. با این حال می‌توان به کتاب Zobeiri (۲۰۰۲) در خصوص نحوه اندازه‌گیری حجم و زی توده خشک‌دارهای ریز در قالب مازاد مقطوعات جنگل اشاره کرد. در این راستا، تحلیل‌های مبتنی بر خط ترانسکت به‌عنوان روابط محاسباتی با حداقل خطا برای محاسبه حجم و زی توده خشک‌دارهای ریز کف جنگل معرفی شد. همچنین، بررسی انباشت خشک‌دارهای ریز و درشت در توده‌های آمیخته راش در جنگل خیرود در شهرستان نوشهر نشان داد که موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز راش (*Fagus orientalis* Lipsky) و مرمر (*Carpinus betulus* L.) با قطر کمتر از ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب ۷/۱۷ و ۱/۷۷ متر مکعب در هکتار هستند (Sefidi et al., 2014). همچنین، ارزیابی انباشت خشک‌دارهای ریز در مراحل تکاملی توده‌های آمیخته راش در جنگل خیرود نشان داد که میانگین موجودی حجمی خشک‌دارهای مزبور ۱۵/۳ متر مکعب در هکتار و سهم انباشت آن‌ها حدود ۴۲/۴ درصد از کل انباشت خشک‌دارها (اعم از خشک‌دارهای قطور و ریز) هستند (Moridi et al., 2016). از طرفی، Woodall و همکاران (۲۰۱۳)، Bessad و همکاران (۲۰۲۱)، Korboulewsky و همکاران (۲۰۲۱) با محاسبه دقیق موجودی حجمی و ذخیره کربن در خشک‌دارهای ریز عنوان کردند که این ویژگی‌ها در هر منطقه از جنگل براساس شرایط انحصاری آن، متفاوت هستند.

باتوجه به همه تفسیرهای صورت‌گرفته، هدف اصلی پژوهش پیش‌رو، نمودارسازی و تشریح روند تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در دامنه‌های مختلف ارتفاعی است. باتوجه به تغییرات تدریجی تیپ‌های توده‌های درختان در جنگل مورد پژوهش در راستای ارتفاع از سطح دریا و تغییرات تصادفی ویژگی‌های فیزیوگرافی دیگر در گرادپان ارتفاعی، رویکرد این پژوهش، تبیین تغییرات

به حداقل ممکن برسد (Marchal et al., 2009; Stupak et al., 2011; Korboulewsky et al., 2021). در جنگل‌های هیرکانی تاکنون خشک‌دارهای ریز در شیوه‌های مدیریتی و روش‌های مختلف جنگل‌شناسی، جایگاه ویژه‌ای نداشته‌اند. از این رو، اندازه‌گیری و تبیین تغییرات موجودی حجمی انباشت خشک‌دارهای مزبور با بیشینه دقت و کمینه عدم قطعیت می‌تواند راهکار تازه‌ای را برای تدوین صحیح برنامه‌های مدیریتی جنگل‌های هیرکانی در اختیار برنامه‌ریزان قرار دهد. به عبارتی دیگر لازم است که در رابطه با تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای مدنظر و تأثیرگذاری عوامل مرتبط با آن‌ها، اطلاعات دقیقی برای روند مدیریتی جنگل‌های مزبور به‌خصوص برای شرایط پساتنفس (مصوبه استراحت جنگل‌های هیرکانی) در دسترس باشند. در واقع با الگوبرداری از روند طبیعی حاکم بر جنگل‌های هیرکانی به‌خصوص در دوره قانونی استراحت می‌توان برای معرفی طرح‌های جایگزین مصوبه مذکور با اهداف آینده شامل بهره‌برداری‌های صنعتی و عملیات جنگل‌شناسی، قابلیت انباشت و روند تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در توده‌های مختلف را مدنظر قرار داد.

اولین گام در رابطه با ارزیابی تغییرات انباشت حجمی خشک‌دارهای ریز، بررسی آن در تیپ‌های مختلف توده‌های جنگلی است. در واقع قابل‌انتظار است که در تیپ‌های مختلف درختان با انواع ترکیب گونه‌ای، جریان‌های متفاوت اکوفیزیولوژی، فنولوژی، آشفستگی و شرایط ویژه آب و هوایی (کلیمایی) و رویشگاهی حاکم باشد که همین امر سبب روند متفاوتی از انباشت حجمی خشک‌دارهای ریز در توده‌های مختلف درختان می‌شود. در جنگل‌های هیرکانی، انواع تیپ توده‌های جنگلی وجود دارند که برحسب تقسیم‌بندی‌های متنوع جوامع گیاهی دارای پراکنش متفاوتی هستند. آنچه که در این جنگل‌ها به‌وضوح قابل‌مشاهده است، تغییرات محرز ترکیب گونه‌ای درختان در امتداد تغییرات ارتفاع از سطح دریا است (Marvi Mohajer, 2004). به همین دلیل در پژوهش پیش‌رو برای بررسی روند تغییرات انباشت حجمی خشک‌دارهای ریز در جنگل مورد پژوهش، گرادپان ارتفاع از سطح

موجودی حجم خشک‌دارهای ریز در ارتباط با اثرات متقابل عوامل مذکور است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پژوهش پیش‌رو در جنگل خیرود واقع در حوضه آبخیز ۴۵ جنگل‌های هیرکانی در هفت کیلومتری شرق نوشهر بین $27^{\circ} 36'$ تا $40^{\circ} 36'$ عرض جغرافیایی شمالی و $32^{\circ} 51'$ تا $43^{\circ} 51'$ طول شرقی انجام شد. در جنگل مزبور از ارتفاع ۱۰۰ تا ۱۸۱۵ متر از سطح دریای آزاد، قطعه‌نمونه‌ها در بخش‌های پاتم، نمخانه و گرازین پیاده شد. تیپ توده‌های مورد پژوهش برمبنای فراوانی ترکیب گونه‌ای درختان در سطح یک هکتار در راستای مختلف گرادیان ارتفاع از سطح دریا تفکیک شد. تیپ‌های مزبور شامل انجیلی - ممرز (*Parrotia persica-Carpinus betulus*)، ممرز آمیخته، ممرز خالص، افراپلت - توسکای قشلاقی (*Acer orientalis*) و راش آمیخته بوده است. مساحت کل جنگل خیرود حدود ۸۰۰۰ هکتار است که رودخانه خیرود، زهکش اصلی این حوضه به حساب می‌آید. براساس گزارش ایستگاه هواشناسی نوشهر در سال ۱۳۹۵، میانگین سالانه بارندگی و درجه حرارت در منطقه خیرود به ترتیب ۱۳۰۰ میلی‌متر و ۱۵/۹ سانتی‌گراد برآورد شده است (Rahanjam et al., 2017).

روش پژوهش

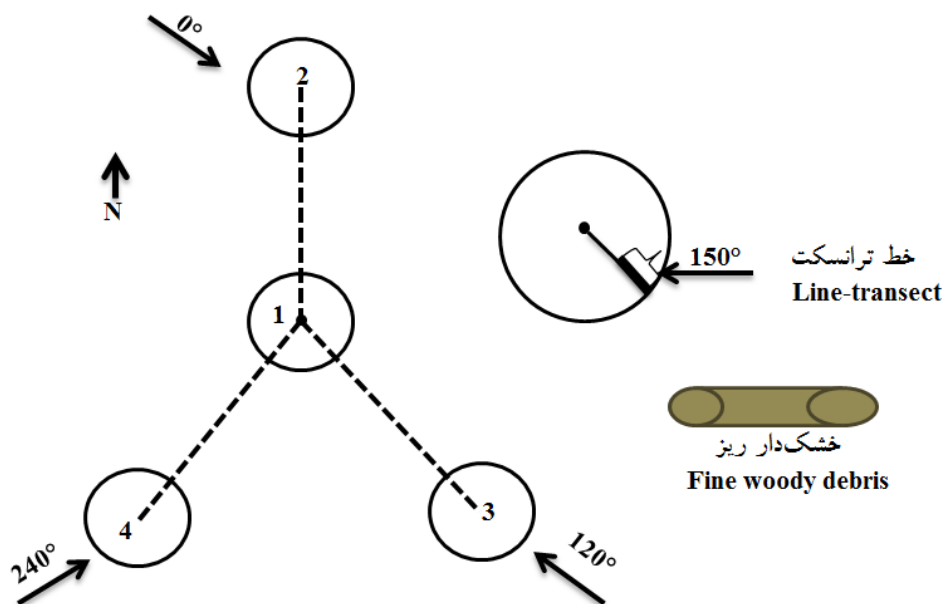
جمع‌آوری داده‌ها

در این پژوهش، اجرای عملیات میدانی برمبنای پروتکل آماربرداری جنگل‌های ایالات متحده موسوم به برنامه تحلیل‌ها و آماربرداری‌های جنگل (FIA: Forest Inventory & Analyses) انجام شد. با توجه به اجرای این روش در دامنه اجرایی و پژوهشی وسیع و در جنگل‌های مختلف و طراحی رابطه‌های محاسباتی برای برآورد کمیت‌های زیست - فیزیکی انواع خشک‌دارها مبتنی بر روش

مزبور، در پژوهش پیش‌رو از این پروتکل میدانی برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده شد. با رعایت فاصله مناسب نسبت به جاده‌های مجاور محدوده‌های آماربرداری، براساس شکل ۱، سه قطعه‌نمونه دایره‌ای با شعاع $7/32$ متر با زاویه‌های آزیموت صفر، ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه به شکل مثلث در قالب یک خوشه با فاصله $36/6$ متر از یکدیگر پیاده شدند و یک قطعه‌نمونه دیگر نیز با همان مساحت در مرکز این طراحی جانمایی شد (Harmon et al., 2007; Woodall & Monleon, 2007; Woodall et al., 2013). هر خوشه به صورت تصادفی با سه تکرار در مجموع به تعداد ۱۲ قطعه‌نمونه در یک گرادیان ارتفاع از سطح دریا پیاده شد. در این پژوهش، پیاده‌سازی قطعه‌نمونه‌ها از دامنه ۱۰۰ تا ۱۸۱۵ متر ارتفاع از سطح دریا با اختلاف ۱۵۰ متر انجام شد. در مجموع، ۳۶ خوشه و ۱۴۴ قطعه‌نمونه در جنگل مورد پژوهش پیاده شد. سه طبقه قطری شامل یک تا $2/5$ ، $2/5$ تا $4/5$ و $4/5$ تا $7/5$ سانتی‌متر برای خشک‌دارهای ریز در نظر گرفته شد (Harmon et al., 2007; Woodall & Liknes, 2008). طبقه قطری کمتر از یک سانتی‌متر ($d_i > 1$) به عنوان لاش‌برگ و بیشتر از $7/5$ سانتی‌متر ($d_i > 7/5$) جزء خشک‌دارهای قطور محسوب می‌شوند (Harmon et al., 2007). برای اندازه‌گیری قطر خشک‌دارهای ریز، یک ترانسکت خطی با آزیموت ثابت ۱۵۰ درجه از مرکز هر قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل پیاده شد و طبقه قطری یک تا $2/5$ سانتی‌متر در فاصله $4/27$ تا $6/1$ متر و دو طبقه قطری دیگر در فاصله $4/27$ تا $7/32$ متری برداشت شدند (Woodall & Liknes, 2008; Woodall et al., 2013). بر روی هر ترانسکت، قطر همه خشک‌دارهای ریزی که محور مرکزی آن‌ها منقطع با خط ترانسکت بود، با کولیس اندازه‌گیری و ثبت شد. در واقع همه خشک‌دارهایی که در کف جنگل قرار داشتند، در نظر گرفته شدند. خشک‌دارهایی که به حالت مایل یا عمودی نسبت به کف جنگل استقرار داشتند و یا به عبارتی، آن‌ها در امتداد موازی با انقطاع خط ترانسکت پراکنش داشتند، از روند آماربرداری حذف شدند (Van Wagner, 1968;)

جغرافیایی دامنه اعم از شمالی، جنوبی، شرقی، غربی، شمال غربی، شمال شرقی، جنوب غربی و جنوب شرقی در حین پیاده‌سازی قطعه‌نمونه‌ها ثبت شدند. همچنین، موقعیت مکانی مرکز هریک از قطعه‌نمونه‌ها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب مکانی (GPS) ثبت شد. سپس، مختصات هریک از خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های قطری مختلف نیز با استفاده از رابطه دکارتی بر مبنای آزیموت و مختصات مرکز هر قطعه‌نمونه محاسبه شد. شکل ۱ نمای کلی جای‌گذاری قطعه‌نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

با استناد به (Zobeiri, 2002; Woodall *et al.*, 2013) ماهیت روش ارزیابی خشک‌دارهای ریز مبتنی بر خط ترانسکت، طول همه خشک‌دارهای مذکور در عرصه اندازه‌گیری نشد (Van Wagner, 1968; Zobeiri, 2002; Woodall *et al.*, 2013; Delcourt & Veraverbeke, 2022). گفتنی است که باتوجه به تصادفی بودن پیاده‌سازی قطعه‌نمونه‌های مزبور، تغییرات طبقه‌های مختلف شیب در طول دامنه ارتفاعی وجود نداشت. به طوری که همه داده‌ها در طبقه شیب ۲۵ تا ۴۰ درصد جمع‌آوری شدند. همه جهت‌های



شکل ۱- طرح جانمایی قطعه‌نمونه‌ها به صورت خوشه‌ای در جنگل مورد پژوهش

Figure 1. Schematic of the placement of sample plots in clusters in the studied forest

خط‌نمونه، رابطه (۱) برای محاسبه حجم خشک‌دارهای ریز به‌کار برده شد (Woodall & Monleon, 2007).

تحلیل داده‌ها باتوجه به طراحی قطعه‌نمونه‌ها و آماربرداری وابسته به

$$V = (kfac) \times \left(\frac{\pi^2}{8 \times L}\right) \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

واحد متریک حجم و تبدیل واحد سطح در هکتار ($f \approx 10000$)، نشان‌دهنده ضریب تصحیح زاویه

در رابطه ۱، پارامتر V به‌عنوان مقدار حجم برحسب متر مکعب در واحد سطح، k و f ضریب‌های ثابت برای تبدیل

فاصله معکوس وزنی (IDW) استفاده شد. مقدار صحت‌سنجی و عدم قطعیت خروجی‌های به‌دست‌آمده برحسب ضریب تبیین بین مشاهده‌ها و مقادیر تخمینی و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌دست آمد.

با استفاده از آزمون واریانس دوطرفه یا چندطرفه (Multiple-ANOVA) تغییرات موجودی حجم خشک‌دارها در هر یک از طبقه‌های قطری بر مبنای گرادیان ارتفاع از سطح دریا ارزیابی شد. با توجه به تغییرات محرز تیپ توده‌های جنگلی و جهت‌های دامنه در دامنه‌های مختلف ارتفاعی، اثرات عوامل مزبور به‌عنوان اثرات اصلی متغیر مستقل در مدل تحلیل واریانس معرفی شد. سپس، با استفاده از آزمون مقایسه اثرات اصلی (LSD) مبتنی بر مقایسه جفتی مشاهده‌ها در گروه‌های مختلف، تغییرات میانگین حاشیه‌ای (Marginal mean) در هر یک از عوامل تأثیرگذار بررسی شد. براساس شاخص‌های اندازه اثر، توان مشاهده و سطح معنی‌داری در هر یک از آزمون‌های صورت‌گرفته، معنی‌داری اثرات متقابل عوامل اصلی و اختلاف میانگین حاشیه‌ای هر یک از این عوامل ارزیابی شد. اجرای تحلیل با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS نسخه ۲۳ و GS+ نسخه ۵ انجام گرفت.

نتایج

ویژگی‌های مربوط به حجم خشک‌دارهای ریز در انواع طبقه‌های قطری در جدول ۱ ارائه شد. نتایج نشان داد که میانگین حجم خشک‌دارهای ریز در طبقه قطری اول ۲/۱۴ متر مکعب در هکتار و در طبقه‌های قطری دوم و سوم به ترتیب ۶/۰۱ و ۱۶/۲ متر مکعب در هکتار هستند. در این رابطه، ضریب تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه سوم قطری به نسبت طبقه‌های قطری دیگر، عدد کمتری را نشان داد (جدول ۱).

خشک‌دارهای ریز با امتداد غیرافقی، c فاکتور تصحیح شیب ترانسکت، L طول خط ترانسکت برای اندازه‌گیری خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های مختلف قطری و d_i بیانگر قطر منقطع خشک‌دار ریز با خط ترانسکت در هر طبقه قطری هستند. برای ضریب ثابت k مقدار عددی ۱/۲۳۴ در نظر گرفته شد (Woodall & Monleon, 2007). با توجه به اینکه خشک‌دارهای ریز کف جنگل در برخی موارد نسبت به راستای طولی، زاویه‌های متعددی دارند، بنابراین ضریب تصحیح زاویه چوب‌های منقطع با خط ترانسکت از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$a = \frac{1}{\cos(h)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه مذکور، a ضریب تصحیح زاویه و h زاویه خشک‌دار نسبت به طول افقی محسوب می‌شود. فاکتور تصحیح شیب (c) نیز از طریق رابطه (۳) محاسبه شد.

$$c = \sqrt{1 + (\%slope/100)^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

برای تبیین خودهمبستگی (Autocorrelation) و وابستگی مکانی موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز از تحلیل‌های مبتنی بر زمین‌آمار استفاده شد. با بررسی توزیع داده‌ها مبتنی بر آزمون نرمالیت و تبدیل لگاریتمی داده‌ها و با احتساب بازتبدیل داده‌ها برحسب توزیع نرمال داده‌ها، مدل‌های بهینه واریوگرام‌های حجم خشک‌دارهای ریز برحسب دامنه تأثیر، ساختار مکانی، ضریب تبیین (R^2) و مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها (RSS) انتخاب شد. براین اساس، تکنیک کریجینگ برای برآورد موجودی حجم خشک‌دارهای ریز به‌کار برده شد. برحسب مقدار صحت‌سنجی و قطعیت‌سنجی مقادیر برآوردشده در صورت لزوم از تکنیک

جدول ۱- ویژگی‌های توصیفی مربوط به حجم خشک‌دانه‌های طبقه‌های مختلف قطری در جنگل خیرود

Table 1. Descriptive attributes of the FWDs at different diameter classes in the Kheiroud forest

Diameter class	Min. volume (m ³ /ha)	Max. volume (m ³ /ha)	Mean volume (m ³ /ha)	Std. error (m ³ /ha)	CV (%)	E (%)
First class	0.83	4.81	2.14	0.11	53	5.14
Second class	3.12	22.27	6.01	0.41	55	6.83
Third class	10.11	35.73	16.23	1.14	38	7.02

جدول ۲- نتایج تحلیلی مدل‌های بهینه واریوگرام برای خشک‌دانه‌های ریز طبقه‌های مختلف قطری در گرادیان ارتفاعی جنگل خیرود

Table 2. Statistical analyses for the optimum variogram models for the FWDs at the different diameter classes along the altitudinal gradient in the Kheiroud forest

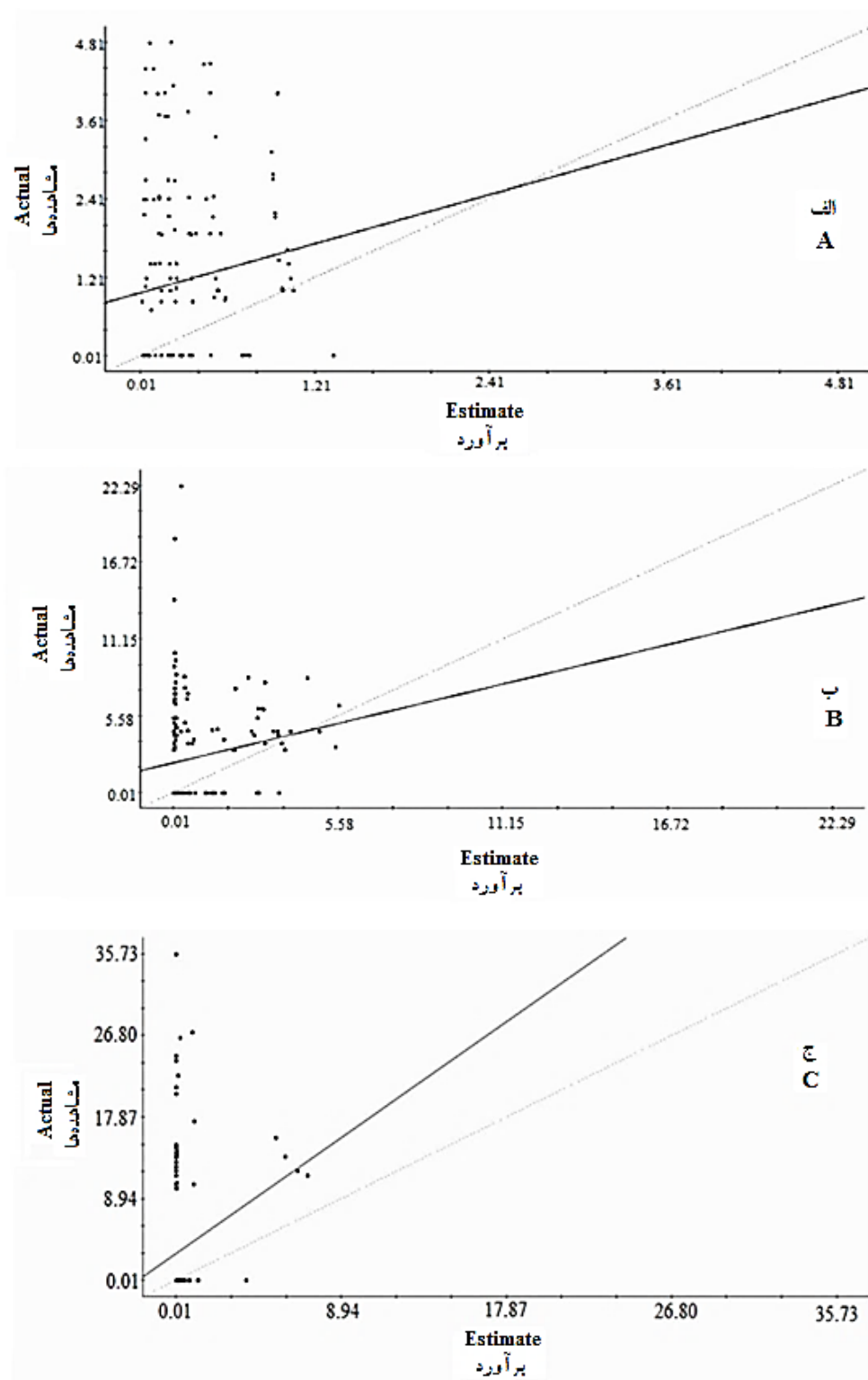
Diameter class	Model	Nugget	Sill	Effective range (m)	Proportion (%)	R ²	RSS
First class	Exponential	5.92	11.84	39600	50	0.89	0.77
Second class	Gaussian	9.43	18.87	56520	50	0.43	1.81
Third class	Exponential	7.81	16.64	18840	53	0.47	7.78

است (RMSE = ۶/۳۲، R² = ۰/۱۶). باتوجه به عدم قابلیت اجرای تکنیک کریجینگ برای مدل‌های گوسین و نمایی به ترتیب برای حجم خشک‌دانه‌های ریز طبقه‌های دوم و سوم قطری از تکنیک فاصله معکوس وزنی برای برآورد مکانی تغییرات حجم خشک‌دانه‌های مذکور استفاده شد. نتایج برازش بین مشاهده‌ها و مقادیر تخمینی موجودی حجمی برای خشک‌دانه‌های ریز طبقه‌های دوم (RMSE = ۲۱/۱۷، R² = ۰/۰۴) و سوم قطری (RMSE = ۳۷/۱۱، R² = ۰/۰۳)، دقت برآورد و قطعیت کمی داشتند (شکل ۲-ب و ج).

در شکل ۳، روند تغییرات موجودی حجمی خشک‌دانه‌های ریز در راستای تغییرات ارتفاع از سطح دریا نشان داده شده است. تراکم و نوسان‌های تغییرات موجودی حجمی خشک‌دانه‌های ریز در طبقه قطری اول در گرادیان ارتفاعی، نسبت به طبقه‌های قطری دیگر، بیشتر بود. به همین ترتیب، نوسان‌های متغیر ذکر شده در طبقه سوم قطری، کمترین تراکم و تغییر را داشت (شکل ۳). نتایج حاصل از تحلیل آزمون واریانس چندطرفه در جدول ۳ نشان داد که فقط تغییرات موجودی حجمی خشک‌دانه‌های ریز در طبقه دوم قطری در دامنه‌های مختلف ارتفاعی، تغییرات معنی‌داری داشت (P < ۰/۰۵).

نتایج تحلیل آماری مدل بهینه واریوگرام برای خشک‌دانه‌های ریز در هر طبقه قطری بر مبنای شاخص‌های آرایش تعریف شده در جدول ۲ آمده است. برونداد حاصل از تحلیل زمین‌آمار نشان داد که ساختار مکانی مدل‌های واریوگرام حدود ۵۰ درصد است. همچنین، مطابق جدول ۲ مبتنی بر مقادیر ضریب تبیین و مجموع مربعات باقی‌مانده‌های مدل نمایی واریوگرام، موجودی حجمی خشک‌دانه‌های ریز در طبقه اول قطری نسبت به طبقه‌های قطری دیگر در گرادیان ارتفاعی، قطعیت و صحت بیشتری داشت، درحالی‌که کمینه ضریب تبیین و بیشینه مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها در طبقه سوم قطری مشاهده شد. به‌طورکلی، نتایج جدول ۲ نشان می‌دهند که دامنه تأثیر هر یک از مدل‌های واریوگرام، مقادیر قابل توجهی را به خود اختصاص داده است.

با استناد به نتایج جدول ۲، برای پهنه‌بندی و درون‌یابی مقدار حجم خشک‌دانه‌های ریز در طبقه‌های مختلف قطری از تکنیک کریجینگ استفاده شد. برازش صحت‌سنجی حاصل از این تکنیک فقط برای تغییرات موجودی حجم خشک‌دانه‌های ریز در گرادیان مختلف ارتفاعی، قابل قبول بود. نحوه برازش بین مشاهده‌ها و مقادیر تخمینی موجودی حجمی خشک‌دانه‌های ریز در طبقه قطری اول در شکل ۲-الف آمده

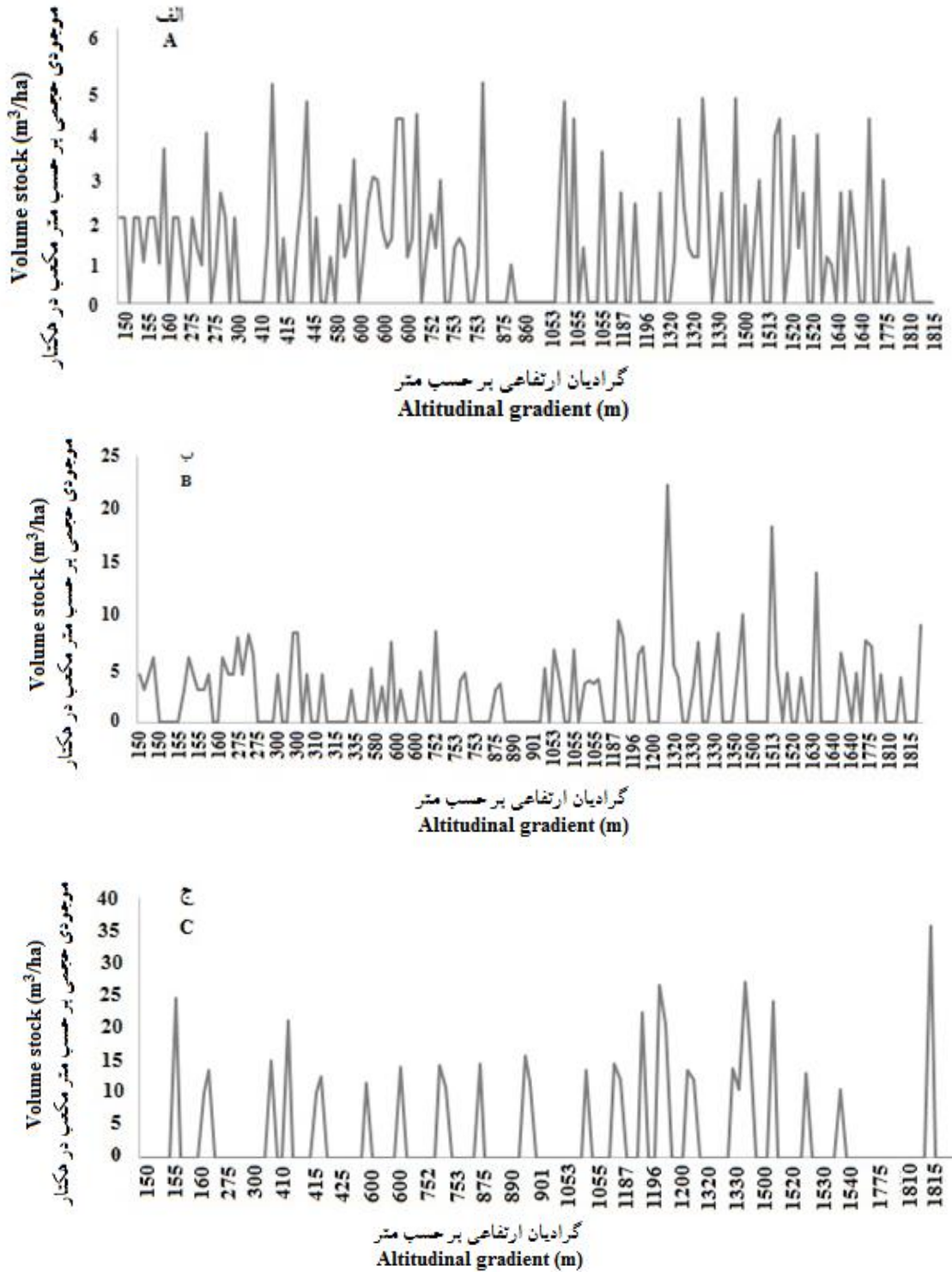


شکل ۲- برازش بین مقادیر مشاهده‌ها و مقادیر برآوردی تکنیک‌های زمین‌آمار برای حجم خشک‌دارهای ریز (متر مکعب در هکتار) در طبقه‌های

قطری اول (الف)، دوم (ب) و سوم (ج)

Figure 2. Goodness of fit data between the observations and estimations of geostatistic techniques for the volume stock (m^3/ha) of first (A), second (B) and third diameter classes (C)

همچنین، اثرات متقابل تغییرات ارتفاع از سطح دریا، جهت‌های دامنه و تیپ توده‌ها بر تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های مختلف قطری، معنی‌دار نبودند ($P > 0.05$).



شکل ۳- نوسان‌های تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های قطری اول (الف)، دوم (ب) و سوم (ج)

Figure 3. Fluctuations of volume stock for the FWDs at first (A), second (B) and third diameter classes (C)

جدول ۳- نتایج تحلیل واریانس چندطرفه در رابطه با تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز طبقه‌های مختلف قطری در جنگل

Table 3. The results of multiple-way ANOVA for variations of volume stock of the FWDs at different diameter classes in forest

Diameter class	Sources of variation	Mean square	F F value	Partial eta squared	Observed power	Significance
First diameter class of FWDs	Altitude	3.09	1.9	0.09	0.87	0.06 ^{ns}
	Aspect	1.21	0.74	0.02	0.26	0.59 ^{ns}
	Stand type	1.24	0.76	0.02	0.27	0.57 ^{ns}
	Altitude × Aspect × Stand type	0.61	0.37	0.005	0.11	0.69 ^{ns}
Second diameter class of FWDs	Altitude	19.83	2.35	0.12	0.87	0.02*
	Aspect	5.45	0.64	0.02	0.23	0.66 ^{ns}
	Stand type	6.09	0.72	0.02	0.25	0.61 ^{ns}
	Altitude × Aspect × Stand type	0.15	0.02	0.001	0.05	0.89 ^{ns}
Third diameter class of FWDs	Altitude	67.57	1.31	0.09	0.61	0.23 ^{ns}
	Aspect	103.26	2.009	0.09	0.71	0.07 ^{ns}
	Stand type	38.05	0.74	0.03	0.28	0.61 ^{ns}
	Altitude × Aspect × Stand type	2.41	0.04	0.001	0.05	0.83 ^{ns}

* معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ^{ns} غیرمعنی‌دار

*: Significant at $p < 0.05$; ns: non-significant

طبقه اول قطری در گرادیان مختلف ارتفاعی، تغییرات معنی‌داری داشت ($P < 0.05$)، درحالی‌که اختلاف نوسان‌های میانگین حاشیه‌ای برای موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های مختلف قطری در رابطه با تغییرات هریک از عوامل توصیفی دیگر، معنی‌دار نبود.

در جدول ۴، نتایج تحلیلی حاصل از آزمون LSD در خصوص معنی‌داری تغییرات میانگین حاشیه‌ای موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های مختلف قطری در جنگل خیرود آمده است. براین‌اساس، فقط میانگین حاشیه‌ای نوسان‌های موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز مربوط به

جدول ۴- نتایج آزمون مقایسه اثرات اصلی در رابطه با تغییرات میانگین حاشیه‌ای موجودی حجمی در خشک‌دارهای ریز طبقه‌های مختلف قطری در جنگل خیرود

Table 4. The results of comparison main effects in association with marginal means variations of volume stock for the FWDs at different diameter classes in Keiroud forest

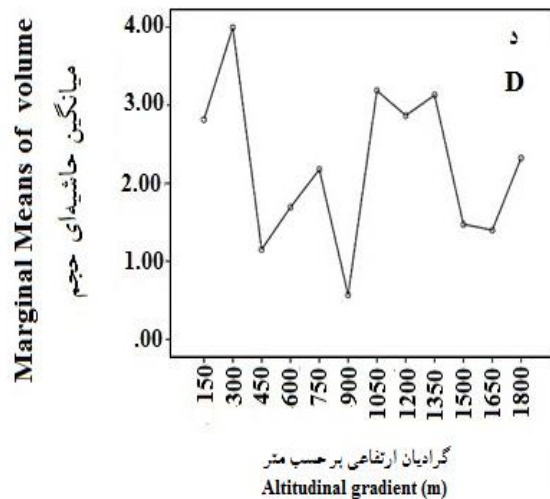
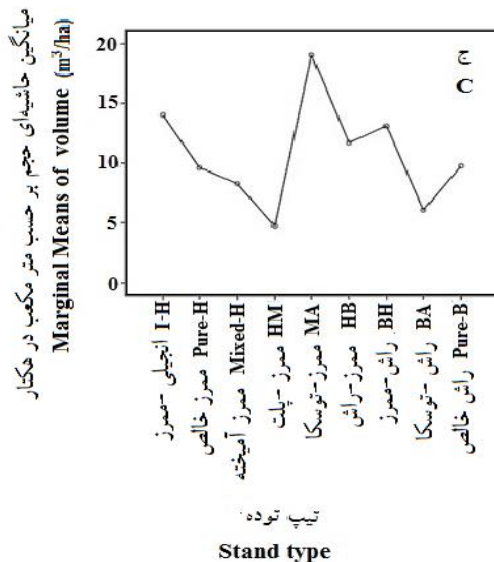
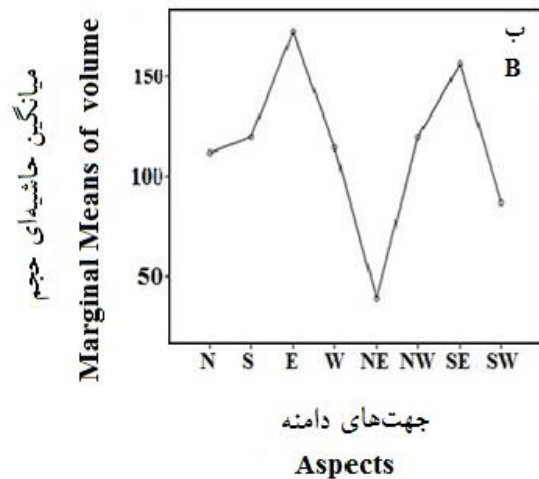
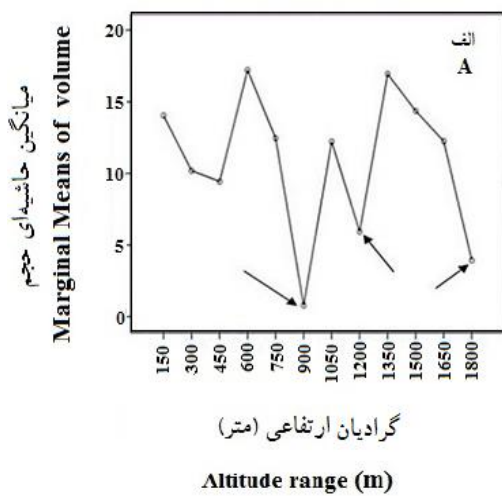
Diameter class	Sources of variation	Mean square	F F value	Partial eta squared	Observed power	Significance
First diameter class of FWDs	Altitude	3.52	2.001	0.13	0.89	0.032*
	Aspect	1.45	0.87	0.04	0.37	0.52 ^{ns}
	Stand type	1.65	1.03	0.05	0.46	0.41 ^{ns}
Second diameter class of FWDs	Altitude	12.64	1.5	0.11	0.75	0.14 ^{ns}
	Aspect	3.41	0.41	0.02	0.17	0.87 ^{ns}
	Stand type	5.63	0.67	0.04	0.29	0.72 ^{ns}
Third diameter class of FWDs	Altitude	47.15	0.91	0.07	0.48	0.52 ^{ns}
	Aspect	84.21	1.63	0.08	0.65	0.13 ^{ns}
	Stand type	13.06	0.25	0.01	0.12	0.92 ^{ns}

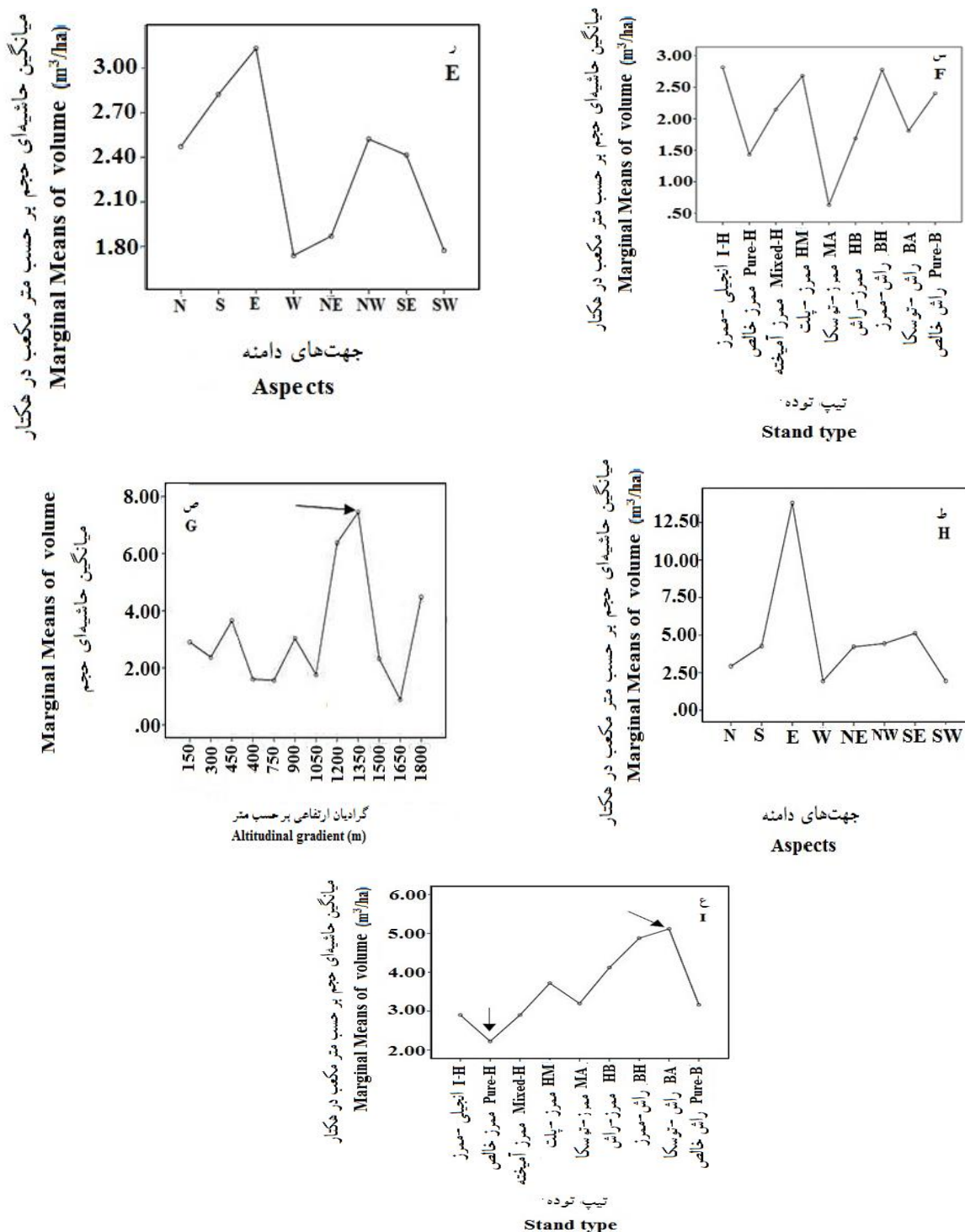
* معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ^{ns} غیرمعنی‌دار

*: Significant at $p < 0.05$; ns: non-significant

ذکر شده، اختلاف معنی داری مشاهده نشد. برای طبقه‌های قطری دیگر و عوامل مختلف، اگر چه تغییرات متفاوتی مشاهده شد، اما اختلاف این تغییرات، معنی دار نبودند. به عنوان مثال، کمینه و بیشینه میانگین حاشیه‌ای موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه قطری سوم به ترتیب در توده‌های خالص ممرز و راش - ممرز مشاهده شد، اما اختلاف بین آن‌ها، غیر معنی دار به دست آمد (شکل ۴-ع).

در شکل ۴، تغییرات میانگین حاشیه‌ای مربوط به حجم خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های مختلف قطری در گرادیان ارتفاعی، جهت‌های مختلف دامنه و تیپ‌های توده‌ها آمده است. تغییرات میانگین حاشیه‌ای موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه اول قطری در دامنه‌های ارتفاعی ۷۵۰ تا ۹۰۰، ۹۰۰ تا ۱۰۵۰ و ۱۲۰۰ تا ۱۶۵۰ متر از سطح دریا به طور معنی داری کمتر از طبقه‌های دیگر بود (شکل ۴-الف)، اما بین طبقه‌های





شکل ۴- تغییرات میانگین حاشیه‌ای موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های مختلف قطری طبقه اول قطری در گرادیان ارتفاعی (الف)، جهت‌های دامنه (ب) و تیپ‌های توده‌های جنگلی (ج)، طبقه دوم قطری در گرادیان ارتفاعی (د)، جهت‌های دامنه (ر) و تیپ‌های توده‌های جنگلی (س) و طبقه سوم قطری در گرادیان ارتفاعی (ص)، جهت‌های دامنه (ط) و تیپ‌های توده‌های جنگلی (ع).

Figure 4. Marginal means variations of the FWDs volume stock at the different diameter classes
 The first class diameter in altitudinal gradient (A), aspects (B) and the stand types (C), the second class diameter in altitudinal gradient (D), aspects (E) and the stand types (F), and the third class diameter in altitudinal gradient (G), aspects (H) and the stand types (I)

بحث

نتایج پژوهش پیش‌رو به‌وضوح نشان داد که موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در هر یک از طبقه‌های قطری در دامنه مختلف ارتفاع از سطح دریا به‌عنوان متغیر ناحیه‌ای تلقی نمی‌شود. به‌عبارتی دیگر، موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز، مستقل از خودهمبستگی و یا وابستگی مکانی است. متغیرهای ناحیه‌ای دارای همبستگی مکانی نمی‌توانند تحت آزمون‌های آماری کلاسیک قرار گیرند. زیرا خروجی‌های آزمون‌های مزبور مشتمل بر خطاهای نوع I و II خواهند بود. به‌همین دلیل در پژوهش پیش‌رو در مرحله اول ابتدا خودهمبستگی متغیرهای موجودی حجم خشک‌دارهای ریز در هر یک از طبقه‌های قطری در گرادیان ارتفاعی توسط تکنیک‌های زمین‌آمار مورد آزمون و خطا قرار گرفت. با استناد به نتایج به‌دست‌آمده و مقدار ریشه میانگین مربعات باقی‌مانده‌های مربوط به برازش بین مشاهده‌های حجم و برآورد موجودی حجمی، مقادیر موجودی حجمی همه خشک‌دارهای ریز در امتداد تغییرات ارتفاع از سطح دریا و به‌تبع آن در تیپ‌های مختلف درختان و در جهت‌های دامنه، غیرهمبسته و مستقل از وابستگی مکانی هستند. Akhavan و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی ساختار مکانی و برآورد موجودی حجمی درختان در جنگل خیرود با استفاده از روش‌های زمین‌آمار گزارش کردند که همه درون‌یابی‌ها اریب داشتند و تکنیک کریجینگ، برآورد مناسبی از مقدار موجودی حجمی جنگل مورد پژوهش ارائه نداد. این نتیجه نشان می‌دهد که ساختار مکانی موجودی حجمی، بسیار ضعیف است و بدین ترتیب، آن‌ها تابعی از مختصات مکانی و دامنه فاصله نیستند. پژوهشگران مذکور، دخالت‌های مدیریتی و آشفتگی‌های ناحیه‌ای را عامل اصلی عدم وجود وابستگی مکانی موجودی حجمی درختان عنوان کردند. براساس برخی از پژوهش‌های انجام‌شده، ساختار مکانی ۲۵ تا ۵۰ درصد برای مدل بهینه واریوگرام یک متغیر هدف به‌عنوان ساختار مکانی متوسط تلقی می‌شود و متغیر مزبور در قالب یک متغیر ناحیه‌ای، خودهمبستگی مکانی دارد (Mahdavi et al., 2016; Ahadi et al., 2017; Akhavan et al., 2018). در نتیجه، تکنیک‌های زمین‌آمار از جمله تکنیک کریجینگ دارای پردازش تخمینی با

دقت و قطعیت زیادی برای متغیرهای مزبور هستند. گفتنی است که مدل‌های واریوگرام خشک‌دارهای ریز در طبقه‌های قطری مختلف در پژوهش پیش‌رو، ساختار مکانی متوسط داشتند، اما اجرای تکنیک‌های زمین‌آمار مانند کریجینگ و فاصله معکوس وزنی و شاخص‌های ارزیابی آن‌ها، عکس این امر را ثابت کرد. از یک طرف، دامنه تأثیر هر یک از مدل‌های واریوگرام فزاینده بود و از طرف دیگر، مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها نیز زیاد به‌دست آمد. در نتیجه، با قطعیت می‌توان عنوان کرد که موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در انواع طبقه‌های قطری تعریف‌شده به ویژگی‌های حاشیه‌ای مکانی، وابسته نیستند و روند تغییرات آن را باید در خصوص تأثیرگذاری عوامل دیگری جستجو کرد. صرف‌نظر از الگوی غیرهمبسته پراکنندگی انباشت حجمی خشک‌دارهای ریز، عوامل تأثیرگذار در این رابطه می‌تواند گرادیان ارتفاعی و تغییرات فیزیوگرافی دیگر یا تغییرات تیپ توده‌های جنگلی در گرادیان مختلف ارتفاعی باشد. البته در این خصوص می‌توان به آشفتگی‌های مستمر یا ناگهانی در هر یک از گرادیان‌های ارتفاعی نیز اشاره کرد و یا صرف‌نظر از تغییرات ترکیب گونه‌ای می‌توان به الگوی مکانی، ساختار و یا حتی به مراحل تحولی توده‌ها در تغییرات غیرهمبسته موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در این پژوهش استناد کرد. جالب‌توجه بود که نتایج حاصل از آزمون چندطرفه واریانس نشان داد که اثرات متقابل گرادیان ارتفاعی، تغییرات تیپ توده‌ها و نیز جهت‌های دامنه بر مقدار تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارها در هیچ‌کدام از طبقه‌های قطری، معنی‌دار نیستند. به‌عبارت‌دیگر، تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در همه طبقه‌های قطری، مستقل از اثرات متقابل گرادیان ارتفاعی، تیپ توده و جهت دامنه بودند. بررسی اثرات توپوگرافی بر موجودی حجمی خشک‌دارهای قطور در جنگل خیرود نشان داد که موجودی حجمی این خشک‌دارها در توده راشستان، همبستگی معنی‌داری با جهت‌های دامنه دارد (Sefidi et al., 2016). براساس نتیجه‌گیری پژوهش مذکور، حضور گونه‌های رطوبت‌پسندی همچون راش با حجم بیشتر در دامنه‌های شمالی (دامنه‌های مرطوب‌تر) سبب شده است که در این دامنه‌ها، علاوه بر شدت بیشتر پوسیدگی، موجودی حجمی خشک‌دارهای مشاهده‌شده

ثابت برای خشک‌دارهای ریز تا قطر چهار سانتی‌متر را مورد آزمون و خطا قرار دادند و در این مورد در یک سطح تعریف شده به‌عنوان پایلوت، مقادیر برآوردی از حجم خشک‌دارهای مزبور را قیاس کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار واقعی حجم اندازه‌گیری شده حدود دو متر مکعب بود که در این زمینه بین روش‌های مزبور و مشاهده‌ها، اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. به دلیل کاربرد بسیار آسان روش انقطاع خط ترانسکت، این روش در سطح وسیعی کاربرد دارد. رابطه‌های محاسباتی منوط به آن نیز برای برآورد حجم و مقدار موجودی کرین، قابلیت تعمیم گسترده‌ای دارند. از این رو، این روش یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین پروتکل‌های تعریف شده برای زیست‌بوم‌های مختلف محسوب می‌شود (Woodall & Monleon, 2007; Delcourt & Veraverbeke, 2022).

بر اساس نتایج به دست آمده از مقایسه جفتی بین طبقه‌های مختلف ارتفاع از سطح دریا، فقط تغییرات میانگین حاشیه‌ای موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در طبقه اول قطری، اختلاف معنی‌داری در دامنه‌های مختلف ارتفاعی داشتند. میانگین حاشیه‌ای برخلاف میانگین حسابی حاصل از آزمون‌های چندگانه میانگین به‌عنوان میانگین وزنی، تراکم (تعداد) موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز را در قالب انباشت مختلف مدنظر قرار می‌دهد، بنابراین میانگین حاشیه‌ای می‌تواند استناد دقیق‌تری نسبت به آماره‌های دیگر میانگین محسوب شود. با توجه به شکل ۳، نوسان‌های تراکم موجودی حجمی خشک‌دارهای طبقه قطری اول در گرادیان ارتفاعی جنگل مورد پژوهش، بیشتر بود، در حالی که طبقه سوم قطری، نوسان‌های کمتر و همگنی بیشتری را نشان داد. با توجه به تفسیرهای ذکر شده می‌توان اذعان کرد که در جنگل مورد پژوهش نه تنها پراکندگی موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز، همبستگی مکانی نداشتند، بلکه تغییرات موجودی حجمی آن‌ها تحت تأثیر اثرات متقابل دامنه‌های ارتفاعی، جهت‌های دامنه و ترکیب گونه‌ای درختان در تیپ‌های مختلف نبودند، بنابراین تغییرات موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز در جنگل مورد پژوهش یا به ارتباط‌های پیچیده بوم‌شناسی و جنگل‌شناسی بستگی دارد یا اینکه پراکنش حجمی آن‌ها

نیز بیشتر باشد. با این حال، از نتایج پژوهش پیش‌رو می‌توان استنباط کرد که نه تغییرات مقدار رطوبت در جهت‌های مختلف، نه تغییرات دمایی و نه ترکیب گونه‌ای درختان در جنگل خیرود، اثرات بارزی بر مقدار انباشت حجمی خشک‌دارهای ریز در جنگل مورد پژوهش نداشتند. اگرچه این امکان، بیشتر محتمل است که جرم حجمی و زی توده خشک‌دارهای ریز در جهت‌های مختلف به دلیل تغییر در انرژی دریافتی خورشید و مقدار رطوبت، تفاوت معنی‌داری داشته باشند، اما یافته‌های پژوهش پیش‌رو، چنین نتیجه‌ای را نشان نداد. در این پژوهش، حجم خشک‌دارهای ریز به تفکیک گونه‌های درختان تبیین نشدند. بلکه نتایج مربوط به انباشت حجمی خشک‌دارهای ریز با اختلاط گونه‌های مختلف آمده است. با این حال، احتمال قوی وجود دارد که موجودی حجمی خشک‌دارهای ریز به تفکیک گونه در گروه‌های مختلف عوامل اصلی تأثیرگذار، تغییر معنی‌داری داشته باشند. با توجه به اینکه برخی از خشک‌دارهای ریز از گونه‌های مختلف در برخی از تیپ توده‌های جنگلی و نیز در برخی از طبقه‌های ارتفاعی مشاهده نشدند، تغییرات موجودی حجمی هر یک از گونه‌های مختلف درختان به احتمال زیاد تحت تأثیر هر یک از عوامل اصلی یا اثرات متقابل عوامل مزبور هستند. در پژوهش‌های Sefidi و همکاران (۲۰۱۴) و Moridi و همکاران (۲۰۱۶) مقادیر متفاوتی برای حجم خشک‌دارهای ریز در توده‌های آمیخته راش جنگل خیرود به تفکیک گونه‌های درختان اعم از خشک‌دار ریز و ممرز و گونه‌های دیگر گزارش شد. در پژوهش پیش‌رو، پروتکل اندازه‌گیری و محاسبه حجم خشک‌دارهای مدنظر مبتنی بر انقطاع محور مرکزی این چوب‌ها با خط ترانسکت در فاصله‌های تعریف شده است که با استفاده از روش‌های مبتنی بر برنامه FIA انجام شد (Woodall *et al.*, 2013). با توجه به اینکه از روش مذکور در جنگل‌های زیست‌بوم‌های مختلف به‌طور وسیع استفاده می‌شود، در پژوهش پیش‌رو نیز این روش به کار برده شد تا بتوان در ارائه آماره‌های مختلف حجم خشک‌دارهای ریز به نتایج جامعی با بیشینه قطعیت رسید. در این رابطه، Korboulewsky و همکاران (۲۰۲۱) چند روش اندازه‌گیری و برآورد حجم از جمله روش انقطاع با خط ترانسکت و نمونه‌برداری با قطعه‌نمونه‌های سطح

عوامل و جریان‌های مرتبط با شرایط جنگل‌شناسی، بوم‌شناختی و زیستی بوم‌سازگان‌های جنگلی را به‌عنوان عوامل توصیفی معرفی کرد. در نتیجه، با تبیین اثرات بارز تأثیرگذار بر روند انباشت حجمی خشک‌دانه‌های ریز بتوان گامی مثبت در روند اجرای مدیریت بهینه جنگل‌های هیرکانی برداشت.

سپاسگزاری

پژوهش پیش‌رو، بخشی از دستاورد پروژه مشترک بین مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با کد مصوب ۰۱۰۹۴۳-۰۱۳-۲۱۳-۰۹۵۱-۶۰-۳ است. بدین وسیله از حامیان مالی و فراهم‌کنندگان امکانات اجرایی این پروژه قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

- Achat, D.L., Deleuze, C., Landmann, G., Pousse, N., Ranger, J. and Augusto, L., 2015. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 348: 124-141.
- Ahadi, Z., Alavi, S.J. and Hosseini, S.M., 2017. Beech forest site productivity mapping using ordinary kriging and IDW (Case study: research forest of Tarbiat Modares University). *Forest and Wood Products*, 70(1): 93-102 (In Persian with English summary with English summary).
- Akhavan, R., Kia-Daliri, H., Etemad, V., Hassani, M. and Mirakhorlou, Kh., 2014. Geostatistically estimation and mapping of forest stock in a natural unmanaged forest in the Caspian region of Iran (Case study: Keyroud forest, Nowshahr). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(2): 188-203 (In Persian with English summary with English summary).
- Akhavan, R., Mahdavi, A. and Kianfar, M., 2018. Analysis of the decline status of Zagrosian oak forests using spatial statistics (Case study: Zarab forests of Ilam). *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 16(2): 129-145 (In Persian with English summary with English summary).
- Bessad, A., Bilger, I. and Korboulewsky, N., 2021. Assessing biomass removal and woody debris in whole-tree harvesting system: Are the recommended levels of residues ensured. *Forests*, 12(6): 807.

به‌طور کامل تصادفی است. López-Senespleda و همکاران (۲۰۲۱) عنوان کردند که عواملی مانند تغییرات تیپ جنگل، ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی، درصد تاج‌پوشش، میانگین دمای تابستان، درجه حرارت تجمعی سالانه، بارندگی تابستان و شاخص پوشش گیاهی، اثرات بارزی بر مقدار موجودی حجمی (و ذخایر کربن) خشک‌دانه‌های ریز کف جنگل دارند. در پژوهش پیش‌رو، گرادیان ارتفاع از سطح دریا به‌عنوان مبنای اثرگذاری عامل اصلی در مدل تحلیلی واریانس مدنظر قرار گرفت و به‌تبع آن نیز تیپ توده‌ها و جهت‌های دامنه نیز هم‌زمان در امتداد ارتفاع از سطح دریا، تغییرات عدیده‌ای دارند. به‌طور ضمنی می‌توان اذعان کرد که عوامل معرفی‌شده در پژوهش López-Senespleda و همکاران (۲۰۲۱) نمی‌تواند با قطعیت بر تغییرات موجودی حجمی در گرادیان ارتفاعی جنگل خیرود اثرگذار باشند. اگر چه اثرات ناهنجار تغییر اقلیم و وقوع آشفته‌گی‌های طبیعی و یا غیرطبیعی را نیز در رابطه با تأثیرگذاری روند انباشت حجمی خشک‌دانه‌های ریز نمی‌توان نادیده گرفت.

در یک نتیجه‌گیری کلی و باتوجه‌به اطلاعات جمع‌آوری‌شده در پژوهش پیش‌رو می‌توان بیان کرد که روند انباشت حجمی خشک‌دانه‌های ریز در طبقه‌های مختلف قطری در جنگل خیرود به‌طور کامل تصادفی است. همچنین، گرادیان ارتفاعی، جهت‌های دامنه و تغییرات تیپ توده‌ها، اثرات معنی‌داری بر روند تغییرات موجودی حجمی خشک‌دانه‌های ریز این جنگل ندارند. اگرچه در این زمینه، اثر فعالیت‌های انسان‌زاد (Anthropogenic) از جمله جمع‌آوری چوب‌های هیزمی برای سوخت توسط دامداران را نیز نباید نادیده گرفت. چرا که عامل مزبور به‌عنوان یکی از آشفته‌گی‌های غیرطبیعی در رابطه با تغییرات انباشت حجمی خشک‌دانه‌های ریز می‌تواند اثرات زیادی داشته باشد. البته باتوجه‌به پیچیدگی رابطه‌های بوم‌شناختی و پدیده‌های جنگل‌شناسی با استفاده از مدل‌های آماری کلاسیک و معرفی عامل‌های محدود، نمی‌توان نتایج پژوهش پیش‌رو را برای رسیدن به نتایجی متقن، بسط داد. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که با استفاده از تکنیک‌های گسترده هوش مصنوعی، بسیاری از

- 1(4): 351-361 (In Persian with English summary with English summary).
- Ranius, T., Hämäläinen, A., Egnell, G., Olsson, B., Eklöf, K., Stendahl, J., ... and Felton, A., 2018. The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis. *Journal of Environmental Management*, 209: 409-425.
 - Sefidi, K., Esfandiyari Darabad, F. and Azariyan, M., 2016. Effect of topography on tree species composition and volume of coarse woody debris in an Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) old growth forests, northern Iran. *IForest*, 9(4): 658-665.
 - Sefidi, K., Marvie Mohadjer, M.R. and Etemad, V., 2014. Coarse and fine woody debris accumulation in mixed beech stands, Case study Gorazbon forests. *Journal of Forest Sustainable development*, 1(2): 137-149 (In Persian with English summary with English summary).
 - Stupak, I., Lattimore, B., Titus, B.D. and Smith, C.T., 2011. Criteria and indicators for sustainable forest fuel production and harvesting: A review of current standards for sustainable forest management. *Biomass and Bioenergy*, 35(8): 3287-3308.
 - Van Wagner, C.E., 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science*, 14(1): 20-26.
 - Woodall, C.W. and Liknes, C.G., 2008. Relationships between forest fine and coarse woody debris carbon stocks across latitudinal gradients in the United States as an indicator of climate change effects. *Ecological Indicators*, 8(5): 686-690.
 - Woodall, C.W. and Monleon, V.J., 2007. Sampling protocol, estimation, and analysis procedures for the down woody materials indicator of the FIA program. General Technical Report NRS-29, Northern Research Station, USDA Forest Service, Newtown Square, Pennsylvania, 72p.
 - Woodall, C.W., Walters, B.F., Oswalt, S.N., Domke, G.M., Toney, C. and Gray, A.N., 2013. Biomass and carbon attributes of downed woody materials in forests of the United States. *Forest Ecology and Management*, 305: 48-59.
 - Zobeiri, M., 2002. *Forest Biometry*. Tehran University Press, Tehran, Iran, 411p (In Persian with English summary).
 - Rahanjam, S., Marvi Mohadjer, M. R., Zobeiri, M., and Sefidi, K., 2017. Quantitative and qualitative assessment of deadwood in natural stands of Hyrcanian forests (Case study: Gorazbon district of Kheyroud, Nowshahr). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 25(4): 656-666 (In Persian with English summary).
 - Delcourt, C.J.F. and Veraverbeke, S., 2022. Allometric equations and wood density parameters for estimating aboveground and woody debris biomass in Cajander larch (*Larix cajanderi*) forests of northeast Siberia. *Biogeosciences*, 19(8): 4499-4520.
 - Fath, B.G., Harmon, M.E. Sexton, J. and White, P., 2011. Decomposition of fine woody debris in a deciduous forest in North Carolina. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 138(2): 192-206.
 - Harmon, M.E., Woodall, C.W., Fath, B. and Sexton, J., 2007. Woody detritus density and density reduction factors for tree species in the United States: A Synthesis. General Technical Report NRS-29, Northern Research Station, USDA Forest Service, Newtown Square, Pennsylvania, 90p.
 - Hoffmann, R., 2022. Contextualizing climate change impacts on human mobility in African drylands. *Earth's Future*, 10(6): e2021EF002591.
 - Hume, A.M., Chen, H.Y.H. and Taylor, A.R., 2018. Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss. *Journal of Applied Ecology*, 55: 246-255.
 - Korboulewsky, N., Bilger, I. and Bessad, A., 2021. How to evaluate downed fine woody debris including logging residues? *Forests*, 12(7): 881.
 - López-Senespleda, E., Calama, R. and Ruiz-Peinado, R., 2021. Estimating forest floor carbon stocks in woodland formations in Spain. *Science of the Total Environment*, 788: 147734.
 - Mahdavi, A., Aziz, J. and Akhavan, R., 2016. Mapping tree density of Zagros oak forests using Kriging and Worldview-2 satellite images from Google Earth database. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 23(4): 87-110 (In Persian with English summary with English summary).
 - Marchal, D., van Stappen, F. and Schenkel, Y., 2009. Sustainable production criteria and indicators for solid biofuels. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 13: 165-176 (In French with English summary).
 - Marvi Mohajer, M.R., 2004. *Silviculture of the oriental Beech (Fagus orientalis Lipsky); experiences made in Caspian forests, North of Iran*. Tehran, Iran, 10-20 May 2004: 13-15.
 - Marvie Mohadjer, M.R., 2011. *Silviculture*. University of Tehran Press, Tehran, Iran, 418p (In Persian with English summary).
 - Moridi, M., Malakshahi, M., Etemad, V. and Sefidi, K., 2016. Accumulation of fine woody debris in the stem exclusion phase in mixed beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands. *Forest Research and Development*,