



University of Tehran

Monitoring the three decades of stand structural dynamics and its effects on aboveground carbon stock across Tiromrood forests of Northeast Iran

Mohammadsadeqh Rahimian¹ | Kambiz Taheri Abkenar² |
Maryam Kazempour Larsary³

1. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: rahimian@phd.guilan.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: taherikambiz@guilan.ac.ir

3. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. Email: kazempourmaryam@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 18 September 2025

Revised: 18 October 2025

Accepted: 13 January 2026

Published online: 09 February 2026

Keywords:

Aboveground carbon stock,
Selective logging,
Species diversity,
Structural diversity.

ABSTRACT

On a global scale, monitoring changes in species diversity and structural components over time, as well as the consequences of management practices and their effects on aboveground carbon stock (AGCS), is essential to mitigate or even halt climate change and biodiversity loss. To achieve this aim, 31 plots of 1000 m² were established in managed (single-tree selective logging) and unmanaged (control) stands and were compared in terms of temporal trends in diversity indices (i.e., species richness (S), Shannon–Wiener diversity (Hs), and Simpson's evenness (Se)) and structural components (i.e., stand density per hectare (SDha), coefficient of variation of diameter at breast height (CVD), height (CVH), and basal area (CVBA)) across three decades (2004, 2014, and 2024). Multiple linear regression models (MLRs) and structural equation models (SEMs) were developed to investigate the effects of changes in stand structural components and tree physiographical variables on AGCS in the Tiromrood forest of Mazandaran Province. The results showed that AGCS, O₂ production, and CO₂ absorption in unmanaged stands increased over the three decades (2004–2024) and were higher than those in managed stands. The S index in 2004, AGCS and the Se index in 2014 and 2024, as well as CVD and CVBA in 2024 and CVH in 2014, showed significant differences between managed and unmanaged stands. According to mixed ANOVA results, management strategy had a significant effect on AGCS, the S index, the Se index, CVD, and CVBA. The MLR and SEM results for both managed and unmanaged stands indicated a significant negative effect of the Se index and a significant positive effect of SDha on AGCS. Therefore, the technically appropriate implementation of the single-tree selective logging method, by simulating natural degradation processes at a small scale, appears to be a suitable approach for species diversity conservation and enrichment in the northern forests of Iran.

Cite this article: Rahimian, M.S., Taheri Abkenar, K., Kazempour Larsary, M. (2026). Monitoring the three decades of stand structural dynamics and its effects on aboveground carbon stock across Tiromrood forests of Northeast Iran. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (4), 347–365. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwp.2026.402368.1372>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwp.2026.402368.1372>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

وب‌گاه نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

پایش تأثیر سه دهه تغییرات مؤلفه‌های ساختاری بر موجودی کربن روزمینی جنگل‌های تیروم‌رود شمال ایران

محمد صادق رحیمیان^۱ | کامبیز طاهری آبکنار^{۲*} | مریم کاظم‌پور لارسری^۳

۱. گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: rahimian@phd.guilan.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: taherikambiz@guilan.ac.ir
۳. گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: kazempourmaryam@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

کلیدواژه:

برش‌تک‌گزینی،

تنوع ساختاری،

تنوع گونه‌ای،

موجودی کربن روزمینی.

در مقیاس جهانی، پایش زمانی تغییرات تنوع گونه‌ای، مؤلفه‌های ساختاری و پیامدهای مدیریتی و بررسی تأثیر آنها بر موجودی کربن روزمینی (AGCS) در مواجهه با تغییرات اقلیمی و کاهش تنوع زیستی ضروری است. به این منظور، ۳۱ قطعه نمونه ۱۰ آری در توده‌های مدیریت‌شده (تک‌گزینی) و مدیریت‌نشده (شاهد) انتخاب و روند تغییرات شاخص‌های تنوع (غنا (S)، شانون-وینر (Hs) و یکنواختی سیمپسون (Se) و ویژگی‌های ساختاری (تراکم در هکتار (SDha)، ضریب تغییرات قطر برابر سینه (CVD)، ارتفاع (CVH) و سطح رویه زمینی (CVBA)) طی سه دهه (۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲) مقایسه شدند. مدل‌های رگرسیون چندگانه (MLRs) و مدل‌های معادلات ساختاری (SEMs) برای بررسی تأثیر مؤلفه‌های ساختاری و متغیرهای فیزیوگرافی درختان بر AGCS جنگل‌های تیروم‌رود شهرستان تنکابن استان مازندران به کار رفتند. نتایج نشان داد که AGCS، تولید O_2 و جذب CO_2 توده‌های مدیریت‌نشده ضمن افزایش در طی سه دهه، نسبت به توده‌های مدیریت‌شده بالاتر بود. شاخص S دهه ۱۳۸۲، AGCS و شاخص Se دهه‌های ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲، CVD و CVBA دهه ۱۴۰۲ و CVH دهه ۱۳۹۲ توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده، تفاوت معنی‌داری داشتند. نتایج تحلیل واریانس آمیخته حاکی از تأثیر معنی‌دار نوع مدیریت بر AGCS، شاخص S، شاخص Se، CVD و CVBA بود. نتایج MLRs و SEMs در توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده بیانگر اثرات منفی و معنی‌دار شاخص Se و مثبت و معنی‌دار SDha بر AGCS بود. بنابراین، اجرای اصولی شیوه تک‌گزینی به دلیل الگوبرداری از شرایط تخریب طبیعی در مقیاس کوچک، روشی مناسب برای حفظ و ارتقای تنوع گونه‌ای جنگل‌های شمال کشور است.

استناد: رحیمیان؛ محمد صادق، طاهری آبکنار کامبیز، کاظم‌پور لارسری؛ مریم (۱۴۰۴). پایش تأثیر سه دهه تغییرات مؤلفه‌های ساختاری بر موجودی کربن روزمینی جنگل‌های تیروم‌رود شمال ایران. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۴)، ۳۴۵-۳۴۷. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.402368.1372>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2026.402368.1372>



۱. مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زندگی بشر در قرن بیست و یکم است. به دلیل دخالت‌های انسانی، سطح CO_2 اتمسفر در سال ۲۰۱۸ به $407/4$ گرم در مترمکعب نسبت به دوره پیشاصنعتی (280 گرم در مترمکعب) افزایش یافته و باعث افزایش $1/0$ درجه سانتی‌گرادی میانگین دمای جهانی شده است. پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش $1/5$ درجه سانتی‌گرادی دما تا سال‌های ۲۰۵۲-۲۰۳۰ است [۱]. علاوه بر ضرورت کاهش انتشار CO_2 ، ایده افزایش و بهینه‌سازی ظرفیت‌های جذب کربن، به‌طور مؤثری می‌تواند موجب کاهش غلظت CO_2 اتمسفر و اثرات گلخانه‌ای و کند شدن روند تغییرات اقلیمی جهانی شود [۲]. جنگل‌ها ۳۱ درصد از خشکی‌های زمین را پوشش داده، مخازن بزرگ کربن بوده و نقش مهمی در حفاظت از تنوع زیستی و چرخه جهانی کربن دارند. بیش از ۸۰ درصد از کل کربن روزمینی و بیش از ۷۰ درصد کل موجودی کربن خاک در بوم‌سازگان‌های جنگلی ذخیره می‌شوند و به این ترتیب، در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییرات اقلیمی مؤثر هستند [۳].

زی‌توده روزمینی از پارامترهای بنیادی توصیف‌کننده عملکرد بوم‌سازگان‌های جنگلی است که مقدار آن هم بیانگر توان تولید در واحد سطح یا زمان (موجودی کربن جنگل) بوده و هم بر چرخه‌های زیست‌شیمیایی جنگل مؤثر است. از آنجا که زی‌توده جنگل تأثیر قابل توجهی بر موجودی جهانی کربن دارد، آگاهی از پویایی زی‌توده درختان برای نظارت بر محیط‌زیست و درک منابع و ذخایر کربن، پایش ساختار و وضعیت جنگل، برآورد تولید و بررسی حاصلخیزی رویشگاه‌های جنگلی حائز اهمیت است [۴]. آگاهی از روند تغییرات زمانی زی‌توده می‌تواند از فرآیندهای سیاست‌گذاری با هدف حفظ یکپارچگی بوم‌سازگان در جنگل‌ها و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در عین حال مطابقت با نیازهای انسانی پشتیبانی کند [۵].

ساختار توده، عاملی کلیدی در رشد، عملکرد و چگونگی تغییر و تحولات جنگل است. امروزه، موضوع ساختار جنگل به یکی از اصلی‌ترین بحث‌های بوم‌شناختی و مدیریتی در علوم جنگل تبدیل شده که آگاهی از تغییرات زمانی آن از ملزومات دستیابی به بینش و تصمیم‌گیری بهینه در فعالیت‌های مدیریتی جنگل است. تغییر ساختار جنگل منجر به شکل‌گیری زیست‌بوم‌های جنگلی مختلفی می‌شود که بر رویش جنگل‌ها و موجودی کربن آن مؤثر هستند [۶]. دستیابی به بینش علمی بالقوه مرتبط با تغییرات رویش درختان و احیاء ساختار جنگل با استفاده از پایش آن در بازه‌های زمانی مختلف تحقق می‌یابد. پایش تغییرات ساختاری، نقش مهمی در پشتیبانی از مدیریت پایدار جنگل و آگاهی از توسعه سیاست‌های هدفمند در نگهداری و حفاظت از تنوع زیستی و خدمات بوم‌سازگانی جنگل‌ها دارد و به‌طور همزمان، تأمین‌کننده نیازهای انسان است [۷]. از دیدگاه جهانی، کاهش تراکم درختان قطور (بزرگ‌تر از ۶۰ سانتی‌متر) که سهم قابل توجهی در زی‌توده دارند، می‌تواند منجر به افت ناهمگونی ساختاری و کاهش پتانسیل جذب کربن جنگل‌ها شود [۸].

به‌طور کلی، تنوع گونه‌ای به‌عنوان مؤلفه‌ای از ساختار توده‌های جنگلی است، اما، تنوع یا تغییرات قطر، ارتفاع و تاج درختان به‌تنهایی یا به‌طور ترکیبی، تحت عنوان تنوع ساختاری توده تعریف می‌شود. به این ترتیب، تنوع ساختاری توده می‌تواند تحت عنوان ضریب تغییرات قطر برابر سینه، ارتفاع و یا حجم تاج درختان محاسبه شود. تنوع ساختاری از ویژگی‌های اساسی توده‌های جنگلی است که خدمات بوم‌سازگانی متعددی را به‌همراه دارد [۹]. تنوع گونه‌ای و تغییرات ابعاد درختان برای عملکرد بوم‌سازگان مهم هستند، چراکه می‌توانند کارایی استفاده و بهره‌برداری از منابع توسط گونه‌های تشکیل‌دهنده جنگل را تحت تأثیر قرار دهند [۱۰]. بنابراین، اندازه‌گیری تغییرات ابعاد درختان و تنوع گونه‌ای، به‌طور همزمان، ممکن است معیار بهتری از زی‌توده روزمینی در جوامع درختی در مقایسه با اندازه‌گیری تنوع گونه‌ای یا تغییرات ابعاد درختان به‌تنهایی باشد [۱۱].

رابطه بین تنوع زیستی و موجودی کربن روزمینی از پارامترهای مهم تشریح عملکرد بوم‌سازگان‌های جنگلی محسوب می‌شود [۹]. با این حال، هنوز مشخص نیست که چگونه تغییرات ساختاری توده‌های جنگلی بر ترسیب کربن، تحت عنوان مجموع ذخایر کربن روزمینی تأثیر می‌گذارد. ویژگی‌های تشریح‌کننده ساختار جنگل مانند، ارتفاع، تاج پوشش، حجم و زی‌توده برای آگاهی از موجودی جنگل و برنامه‌های نظارتی آن ضروری هستند [۷]. در یک چشم‌انداز طبیعی، تنوع گونه‌های درختی با آب، مواد غذایی خاک، کیفیت و کمیت لاشبرگ و همچنین دسترسی به نور برای کنترل ورود کربن به بوم‌سازگان در تعامل هستند. درک این موضوع که چگونه موجودی کربن روزمینی با تنوع گونه‌های چوبی ارتباط پیدا می‌کند، برای جریان پایدار کالا و خدمات بوم‌سازگان

حیاتی است. رابطه بین تنوع زیستی و موجودی کربن روزمینی از پارامترهای مهم تشریح عملکرد بوم‌سازگان‌های جنگلی محسوب می‌شود. در واقع، تعیین تأثیر تنوع گونه‌ای و تنوع ساختاری جنگل بر عملکرد بوم‌سازگان‌های جنگلی مختلف، موضوعی است که در ۳۰ سال گذشته مورد توجه بوم‌شناسان واقع شده است [۱۱]. به‌طور کلی، در بوم‌شناسی جنگل، بحث‌های زیادی در مورد مقایسه تأثیر تنوع ساختاری و تنوع گونه‌ای بر عملکرد بوم‌سازگان صورت گرفته است [۱۲]. درختانی با قطر و ارتفاع بزرگ‌تر معمولاً توانایی بیشتری در ذخیره کربن دارند و تغییرات در این شاخص‌ها می‌تواند نشان‌دهنده کاهش یا افزایش موجودی کربن باشد. پایش این تغییرات اطلاعات ارزشمندی در مورد پویایی بوم‌سازگان، رقابت برای منابع طبیعی مانند نور و آب و تأثیر عوامل اقلیمی بر جنگل‌ها فراهم می‌کند.

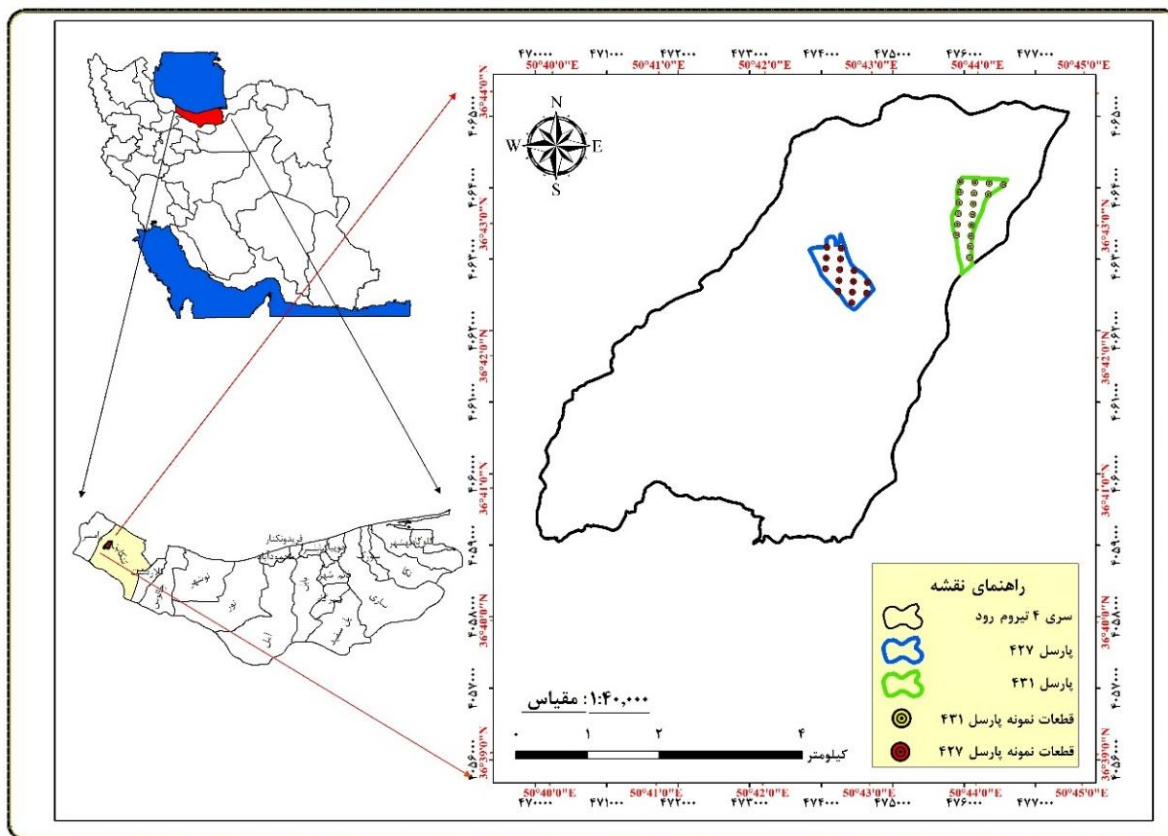
جنگل‌های شمال ایران از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین ذخایر کربن اتمسفر هستند که نقش حیاتی آنها در تنظیم آب‌وهوای منطقه‌ای و جهانی، حفظ چرخه کربن و ارائه خدمات بوم‌سازگانی برای رفاه جامعه و تعادل بوم‌شناختی بر کسی پوشیده نیست. جنگل‌های شمال کشور به دلیل برخورداری از تنوع گونه‌ای بالا و شرایط اقلیمی مرطوب، با اجرای بهره‌برداری تدریجی و پراکنده تحت عنوان شیوه تک‌گزینی، منجر به حفظ ساختار ناهمسال، پوشش منسجم و عملکرد بوم‌شناختی جنگل می‌شود. از اصول مهم اجرای درست این شیوه مدیریتی سازگار با طبیعت، حفظ درختان مادری برای نیل به استمرار بذردهی و پرستاری از زادآوری طبیعی است. حفظ تعداد قابل قبولی از خشک‌دارهای سرپا و افتاده تحت عنوان زیستگاه حشرات، پرندگان و قارچ‌ها که موجب افزایش تنوع زیستی می‌شود، نیز ضروری به نظر می‌رسد. به‌علاوه، برای حفاظت از منابع آب و خاک، عدم نشانه‌گذاری درختان حواشی مناطق مستعد فرسایش و کنار رودخانه‌ها و چشمه‌ها باید مورد توجه جدی قرار بگیرد و این موضوع بیانگر اهمیت این شیوه مدیریتی در حفاظت بوم‌شناختی جنگل‌هاست. مدیریت جنگل‌ها از طریق تغییر در ترکیب، ساختار و پراکنش مکانی درختان، می‌تواند تأثیرات عمیقی بر ذخایر کربن بوم‌سازگان جنگل داشته باشد [۱۳]. برش تک‌گزینی، روشنهایی را برای استقرار زادآوری فراهم می‌آورد که به دلیل کمبود حضور نیروی متخصص، برداشت‌های خارج از برنامه، باز شدن بیش از حد تاج‌پوشش، چرای دام و کمبود بذر ممکن است موجب تضعیف تجدید حیات طبیعی و استقرار رستنی‌های مزاحم علفی و خشبی شده که نهایت بر بهره‌وری و تولید جنگل تأثیر می‌گذارد. بنابراین، تخمین زی‌توده روزمینی و موجودی کربن این جنگل‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده به‌عنوان متغیر پایه، ضرورتی بنیادی در ارزیابی، پایش و مدیریت وضعیت انتشار و ترسیب کربن این جنگل‌ها و آگاهی از وضعیت کمی و کیفی آنها محسوب می‌شود. تخمین موجودی کربن درختان جنگلی و رابطه آن با تغییرات تنوع گونه‌ای و ساختاری و پایش آن در طی زمان برای دستیابی به توسعه پایدار و حفاظت از بوم‌سازگان‌های جنگلی ضروری بوده و همچنین برای آگاهی از مقدار موجودی کربن روزمینی به‌منظور رویارویی با بحران گرمایش جهانی کاربردی دارد. بنابراین، با توجه به مطالب فوق، این تحقیق با هدف شناخت تغییرات مؤلفه‌های ساختار و شاخص‌های تنوع گونه‌ای توده‌های جنگلی و تعیین اثرات آنها بر موجودی کربن روزمینی طی یک بازه زمانی ۳۰ ساله (سه دهه) در جنگل‌های مدیریت‌شده در مقایسه با جنگل‌های مدیریت‌نشده تیروم‌رود شهرستان تنکابن استان مازندران صورت گرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه جزء طرح جنگلداری تیرم‌رود، بخش چهار و موسوم به جنگل توساکی از حوزه آبخیز ۳۲ است که از نظر استحفاظی در حوزه اداره منابع طبیعی و آبخیزداری تنکابن و تحت مدیریت اداره کل منابع طبیعی استان مازندران-نوشهر است. این منطقه بین عرض جغرافیایی $36^{\circ} 40' 25''$ تا $36^{\circ} 44' 30''$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ} 40' 10''$ تا $50^{\circ} 43' 48''$ شرقی قرار دارد. براساس مطالعات طرح تجدید نظر سطح کل بخش ۲۶۱۴ هکتار بوده و حداقل و حداکثر ارتفاع از سطح دریا به‌ترتیب ۴۰۰ و ۲۳۷۰ متر است. در شکل ۱، نقشه موقعیت منطقه طرح به‌همراه موقعیت قرارگیری پارسل‌ها در حوزه آبخیز ۳۲ ارائه شده است. از نظر اقلیمی این حوزه جزء اقلیم معتدل و مرطوب محسوب می‌شود، اما ارتفاعات این بخش دارای اقلیم سرد کوهستانی است. میانگین بارندگی سالانه این بخش بین ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ میلی‌متر نوسان داشته و فصول خشک این بخش شامل ماه‌های تیر

و مرداد و شهریور است. میانگین دمای سالانه ۱۲/۳ درجه سانتی‌گراد، میانگین حداکثر دما در مرداد ماه ۲۳/۸ درجه سانتی‌گراد و حداقل دما در بهمن ماه ۱/۶ درجه سانتی‌گراد است. تیپ‌های جنگلی اصلی این بخش شامل تیپ‌های راش، راش-ممرز، توسکا-ممرز، راش-ممرز-توسکا و ممرز-توسکا-افرا می‌باشند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، ایران

۲-۲. روش آماربرداری

پس از بررسی‌های انجام شده و در راستای اهداف پژوهش حاضر، دو پارسل ۴۳۱ (تک‌گزینی فردی و گروه‌گزینی) و ۴۲۷ (پارسل شاهد) انتخاب شدند (شکل ۱). پارسل‌ها تا حد امکان ترکیب گونه‌ای مشابه داشته و در محدوده ارتفاعی ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ متر واقع شده بودند. خصوصیات (تراکم در هکتار، حجم در هکتار و ترکیب گونه‌ای) پارسل شاهد و پارسل مدیریت‌شده قبل از اجرای برش‌های تک‌گزینی فردی و گروه‌گزینی در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌های قطر برابر سینه و ارتفاع گونه‌های درختی ثبت شده از قطعات نمونه ۱۰ آری (۱۰۰۰ متر مربعی) با استفاده از یک شبکه آماربرداری به ابعاد ۱۵۰×۲۰۰ متر با جهت نوار شمالی جنوب برداشت شده در دو دهه ۸۲ و ۹۲، استخراج و برای تجزیه و تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور دستیابی به داده‌های دهه سوم، قطعات نمونه مورد آماربرداری‌های قبلی (۱۴ قطعه نمونه در توده‌های مدیریت‌نشده و ۱۷ قطعه نمونه در توده‌های مدیریت‌شده) شناسایی و پس از تعیین نام گونه‌های درختی موجود، قطر برابر سینه و ارتفاع درختان در هر قطعه نمونه ثبت شدند. ابتدا زی‌توده و موجودی کربن روزمینی تک‌تک درختان در هر قطعه نمونه، تعیین شد. سپس، متغیرهای ساختاری (تعداد در هکتار، تغییرات ابعاد قطر برابر سینه، تغییرات ابعاد سطح رویه زمینی و تغییرات ابعاد ارتفاع درختان) و شاخص‌های تنوع زیستی (غنا، تنوع گونه‌ای شانون-وینر و یکنواختی سیمپسون) و مجموع موجودی کربن روزمینی هر یک از قطعات نمونه توده‌های جنگلی مدیریت‌شده (تک‌گزینی و گروه‌گزینی) و توده مدیریت‌نشده (شاهد) در فواصل زمانی ۱۰ ساله و در طی سه دهه (۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲) محاسبه شد. در نهایت، نتایج حاصل از هر دهه با یکدیگر و با توده شاهد مورد مقایسه قرار گرفتند.

جدول ۱. خصوصیات (تراکم در هکتار، حجم در هکتار و ترکیب گونه‌ای پارسل) مدیریت‌شده قبل از اجرای برش‌های تک‌گزینی فردی و گروه‌گزینی و پارسل شاهد (مدیریت‌نشده)

نوع پارسل	تراکم در هکتار	حجم (متر مکعب در هکتار)	درصد آمیختگی گونه‌ها
۴۲۷ (مدیریت‌نشده)	۱۲۳/۳۳	۳۲۰/۵۳	راش (۱۱/۸۱ درصد)، ممرز (۲۰/۴۴ درصد)، توسکا بیلاقی (۳۳/۴۲ درصد) و سایر گونه‌ها (۳۴/۳۳ درصد)
۴۳۱ (مدیریت‌شده)	۱۴۷/۱۴	۳۴۸/۶۶	راش (۱۴/۱۴ درصد)، ممرز (۲۱/۷۴ درصد)، توسکا بیلاقی (۳۳/۶۴ درصد) و سایر گونه‌ها (۳۰/۴۳ درصد)

۲-۳. محاسبه ویژگی‌های ساختاری توده (ضریب تغییرات قطر برابر سینه، ارتفاع کل)

ضریب تغییرات قطر برابر سینه، سطح رویه زمینی و ارتفاع تمامی پایه‌های درختی به‌عنوان شاخصی از تغییرات ابعاد گونه‌های موجود در هر قطعه نمونه مورد استفاده قرار گرفت [۹-۱۰]. ضریب تغییرات از نسبت انحراف معیار تمام اندازه‌گیری‌های صورت گرفته هر یک از متغیرهای فوق به میانگین مقادیر آن متغیر محاسبه شد و به‌عنوان شاخصی از تغییرات ابعاد درختان در هر قطعه نمونه مورد استفاده قرار گرفته و مقدار آن به درصد بیان شد (رابطه‌های ۱، ۲ و ۳).

$$CV_{jx} = \frac{S_{jx}}{\bar{X}_{jx}} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

x : متغیر قطر برابر سینه یا سطح رویه زمینی و یا ارتفاع تمام گونه‌های درختی در قطعه نمونه j ام؛ CV_{jx} : ضریب تغییرات متغیر x در قطعه نمونه j ام؛ S_{jx} (رابطه ۲) انحراف معیار متغیر x در قطعه نمونه j ام $\bar{X}_{jx}$ و (رابطه ۳): میانگین متغیر x در قطعه نمونه j ام

$$S_{jx} = \sqrt{\frac{(x_j - \bar{X}_j)^2}{n_j - 1}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\bar{X}_{jx} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n_i} \quad \text{رابطه ۳}$$

۲-۴. شاخص‌های غنای گونه‌ای، تنوع گونه‌ای و یکنواختی

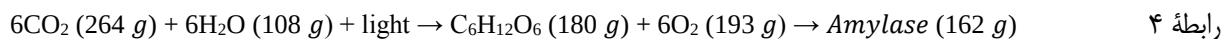
در این پژوهش، در هر قطعه نمونه، شاخص غنای گونه‌ای (S) با تعیین تعداد کل افراد در هر قطعه نمونه (N) تعیین شد. یکنواختی در توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده با استفاده از شاخص یکنواختی سیمپسون محاسبه شد. شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر، دو مقدار غنای گونه‌ای و یکنواختی را که دو جزء تنوع گونه‌ای هستند و تولید جنگل را تحت تأثیر قرار می‌دهند را به یک کمیت تبدیل می‌کند [۱۲]. از آنجاکه در محاسبه شاخص‌های تنوع، سطح رویه زمینی نسبت به فراوانی شاخص بهتری از عملکرد گیاه است، بنابراین، در هر قطعه نمونه سطح رویه زمینی نسبی گونه‌ها برای نشان دادن نسبت گونه‌های انفرادی مورد استفاده قرار گرفت [۹، ۱۴].

۲-۵. محاسبه زی‌توده و موجودی کربن روزمینی

برای محاسبه زی‌توده روزمینی برای هر گونه درختی از فرمول‌های آلومتریک ارائه شده بر اساس قطر برابر سینه (DBH) برحسب سانتی‌متر، ارتفاع (H) برحسب متر و دانسیته بحرانی چوب (ρ) برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شده توسط Kazempour Larsary و همکاران (۲۰۲۱) برای هر یک از گونه‌های درختی استفاده شد [۹]. سپس، زی‌توده روزمینی برحسب کیلوگرم بر متر مربع و براساس فرمول‌های ارائه شده، به‌طور جداگانه، برای هر یک از گونه‌های درختی موجود در قطعه نمونه و برحسب کیلوگرم محاسبه و تبدیل واحد به مگاگرم در هکتار صورت گرفت. از ضریب کربن محاسباتی اندازه‌گیری شده توسط Kazempour Larsary و همکاران (۲۰۲۱) برای محاسبه موجودی کربن روزمینی استفاده شد [۹].

۲-۶. تخمین تولید اکسیژن (O₂) درختان

گیاهان و از جمله درختان ۲۶۴ گرم CO₂ را جذب می‌کنند تا ۱۹۳ گرم O₂ و ۱۶۲ گرم ماده خشک به شکل فیبر و نشاسته تولید کنند (رابطه ۴) [۱۵]. از طرف دیگر، طی فرآیند تنفس، گیاهان مقداری از اکسیژن تولید شده در فرآیند فتوسنتز را طبق معادله شیمیایی تنفس مصرف می‌کنند، بنابراین، تولید خالص اکسیژن توسط درختان تابعی از تولید اکسیژن در فتوسنتز منهای مقدار اکسیژن مصرفی در تنفس است [۱۶]. همچنین، از آنجاکه تولید خالص اکسیژن توسط یک درخت در طول یک سال ارتباط مستقیمی با مقدار کربن آزاد شده توسط درخت دارد، میزان اکسیژن تولید شده با تجمع زی‌توده درخت مرتبط است. بنابراین، اگر مقدار دی‌اکسید کربن جذب شده طی فرآیند فتوسنتز از دی‌اکسید کربن آزاد شده طی فرآیند تنفس (رابطه ۵) فراتر رود، کربن در درختان تجمع می‌یابد (ترسب کربن). از این رو، درختی که در طول یک سال دارای انباشت خالص کربن است، اکسیژن خالص نیز تولید می‌کند [۱۶]. مقدار خالص سالانه اکسیژن تولید شده براساس رابطه ۶ تخمین زده می‌شود [۱۶]. با توجه به رابطه ۶ میزان اکسیژن تولید شده (O₂) به کیلوگرم در سال از حاصلضرب کربن خالص (C) جذب شده (به کیلوگرم یا گرم) با نسبت وزن اتمی اکسیژن به کربن محاسبه می‌شود (۳۲/۱۲=۲/۶۷).



۲-۷. تخمین جذب دی‌اکسید کربن (CO₂) در واحد درختی

با توجه به معادله فتوسنتز، می‌توان نتیجه گرفت که برای هر واحد ذخیره کربن در زی‌توده، ۳/۶۷ واحد دی‌اکسید کربن جذب شده است. به این معنی که برای محاسبه جذب CO₂ در یک واحد درختی، مقدار ذخیره کربن در زی‌توده باید در ۳/۶۷ ضرب شود.

۲-۸. محاسبه متغیرهای فیزیوگرافی

مدل رقومی ارتفاع برای تولید نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰.۸.۲ استفاده و سپس ارزش متغیرهای فوق برای هر قطعه نمونه محاسبه شد. جهت دامنه (Aspect) برای به‌کارگیری در تجزیه و تحلیل‌های چند متغیره از طریق دو رابطه (Cos A+1) و (Sin A+1) که در آن A آزمون دامنه از بالا به پایین شیب است، به‌ترتیب، به متغیرهای کمی شمال‌گرایی^۱ و شرق‌گرایی^۲ با دامنه تغییرات صفر (جهت جنوبی و غربی) تا دو (جهت شمالی و شرقی) تبدیل شد [۱۷].

۲-۹. آنالیزهای آماری

پس از محاسبه موجودی کربن روزمینی، متغیرهای ساختاری و شاخص‌های تنوع زیستی و پیش از انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی، نرمال بودن داده‌ها براساس آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. از آزمون t-test مستقل با استفاده از بسته Rstatix برای مقایسه میانگین متغیرهای ساختاری، شاخص‌های تنوع گونه‌ای و موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده در هر دوره آماری استفاده شد. از تحلیل واریانس آمیخته^۳ با استفاده از بسته Rstatix برای مقایسه میانگین متغیرهای ساختاری، شاخص‌های تنوع گونه‌ای و موجودی کربن روزمینی سه دوره آماری (۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲) هر یک از توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده استفاده شد. از مدل رگرسیون خطی چندگانه برای ارزیابی میزان تأثیر متغیرهای ساختاری، شاخص‌های تنوع گونه‌ای و متغیرهای فیزیوگرافی بر موجودی کربن روزمینی هر دوره آماری و در هر یک از دو توده مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده استفاده شد. از مدل‌های معادلات ساختاری برای بررسی روابط چندمتغیره و ارزیابی اثرات مستقیم، غیر مستقیم و کلی بین متغیرهای ساختاری، شاخص‌های تنوع گونه‌ای و متغیرهای فیزیوگرافی هر دوره آماری و در هر یک از دو توده مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده

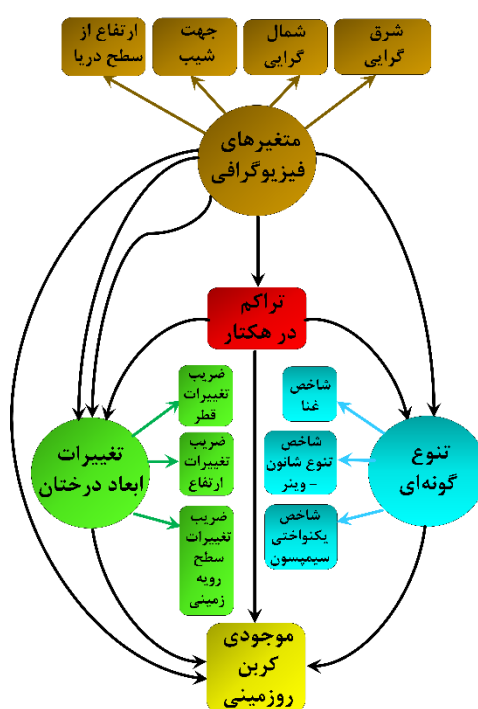
^۱Northness

^۲Eastness

^۳Mixed Between-Within Subjects ANOVA

براساس مدل‌های مفهومی پیشنهاد شده در شکل ۲ استفاده شد.

برای تفسیر نتایج در مدل‌های معادلات ساختاری، روابط دومتغیره بین هر یک از مسیرهای علی و یا اثرات مبتنی بر فرضیه‌ها در مدل‌ها یا چارچوب‌های مفهومی با استفاده از تحلیل رگرسیون ساده و همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه برای ارزیابی روابط چند متغیره بین موجودی کربن روزمینی با سایر متغیرهای پیش‌بینی کننده براساس فرضیه‌های موجود و در چارچوب یا مدل مفهومی پیشنهاد شده مورد استفاده قرار گرفت. در این مسیر، پس از انجام تجزیه وتحلیل‌های مرتبط با رگرسیون و به شرط برازش، مدل مطلوب که کمترین AIC را داشت، انتخاب شد. در این راستا، چندین آزمون برای ارزیابی نیکویی برازش مدل معادلات ساختاری مورد استفاده قرار گرفت که شامل آزمون کای‌اسکویر (χ^2)، شاخص نیکویی برازش (GFI)، شاخص برازش مقایسه‌ای (CFI)، ریشه میانگین مربعات باقی‌مانده استاندارد شده (SRMR) و معیار اطلاعاتی AIC بودند. آماره آزمون کای‌اسکویر غیر معنی‌دار ($P > 0.05$)؛ $SRMR < 0.08$ ؛ $GFI > 0.90$ و $CFI > 0.95$ نشان‌دهنده مدلی هستند که بهترین برازش را با داده‌ها دارد که در بین این مدل‌ها، مدلی که کمترین معیار اطلاعاتی آکائیک را دارد، به‌عنوان مدل نهایی انتخاب شد. اثر غیر مستقیم یک پیش‌بینی کننده با ضرب کردن اثرات استاندارد شده تمام مسیرها در مسیر یک متغیر پیش‌بینی کننده به متغیر واسطه و سپس به موجودی کربن روزمینی محاسبه شد، درحالی‌که، اثر کلی از مجموع مقادیر اثرات مستقیم و غیر مستقیم استاندارد شده محاسبه شد [۱۴]. بررسی‌های مرتبط با مدل معادلات ساختاری با استفاده از بسته Lavaan صورت گرفت. تمامی تجزیه‌وتحلیل‌ها در زبان برنامه‌نویسی R نسخه 4.5.1 انجام گرفت.



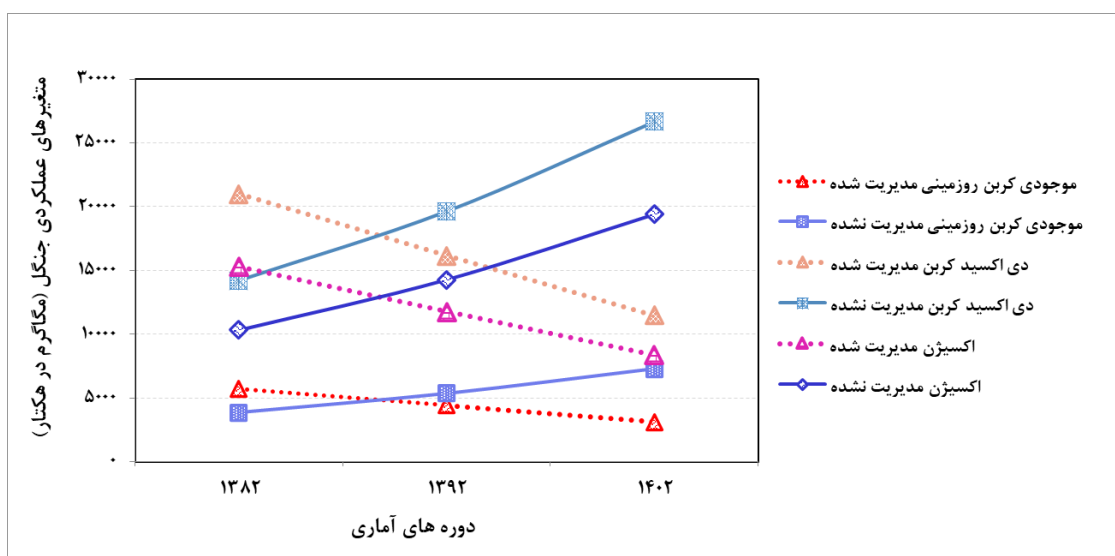
شکل ۲. مدل مفهومی پیشنهاد شده برای بررسی روابط چند متغیره بین موجودی کربن روزمینی با متغیرهای ساختاری (تنوع ساختاری، تراکم در هکتار و شاخص‌های تنوع زیستی) و متغیرهای فیزیوگرافی

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. روند تغییرات موجودی کربن روزمینی، جذب دی‌اکسید کربن و تولید اکسیژن

مجموع موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده در دوره آماری ۱۳۸۲ به‌ترتیب برابر با ۵۷۱۶/۳۳ و ۳۸۶۴/۸۶ مگاگرم در هکتار، تولید اکسیژن به‌ترتیب برابر با ۱۵۲۸۲/۶۶ و ۱۰۳۱۹/۱۹ مگاگرم در هکتار و جذب دی‌اکسید کربن به‌ترتیب برابر با ۲۰۹۷۹/۲۹ و ۱۴۱۸۴/۰۵ مگاگرم در هکتار بود. مقادیر هر سه متغیر در توده‌های مدیریت‌شده نسبت به توده‌های مدیریت‌نشده بیشتر

بودند. در دوره آماری ۱۳۹۲، مجموع موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده به‌ترتیب برابر با ۴۴۰۴/۵۶ و ۵۳۴۷/۱۰ مگاگرم در هکتار، تولید اکسیژن به‌ترتیب برابر با ۱۱۷۶۰/۱۸ و ۱۴۲۷۶/۷۵ مگاگرم در هکتار و جذب دی‌اکسیدکربن به‌ترتیب برابر با ۱۶۱۶۴/۷۴ و ۱۹۶۲۳/۸۵ مگاگرم در هکتار بود. مقادیر هر سه متغیر در توده‌های مدیریت‌شده نسبت به توده‌های مدیریت‌نشده کمتر بود. در دوره آماری ۱۴۰۲، مجموع موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده به‌ترتیب برابر با ۳۲۲۳/۲۸ و ۷۲۷۰/۲۲ مگاگرم در هکتار، تولید اکسیژن به‌ترتیب برابر با ۸۳۳۹/۱۶ و ۱۹۴۱۱/۴۷ مگاگرم در هکتار و جذب دی‌اکسیدکربن به‌ترتیب برابر با ۱۱۴۶۲/۴۴ و ۲۶۶۸۱/۲۹ مگاگرم در هکتار بود. مقادیر هر سه متغیر در توده‌های مدیریت‌شده نسبت به توده‌های مدیریت‌نشده کمتر بود (شکل ۳). به‌طورکلی، موجودی کربن روزمینی، تولید اکسیژن و جذب دی‌اکسیدکربن توده‌های مدیریت‌نشده از سال ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲ روند افزایشی داشت، درحالی‌که در توده‌های مدیریت‌شده روند کاهشی را نشان دادند.



شکل ۳. روند تغییرات موجودی کربن روزمینی، جذب دی‌اکسیدکربن و تولید اکسیژن در سه دوره آماری ۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲

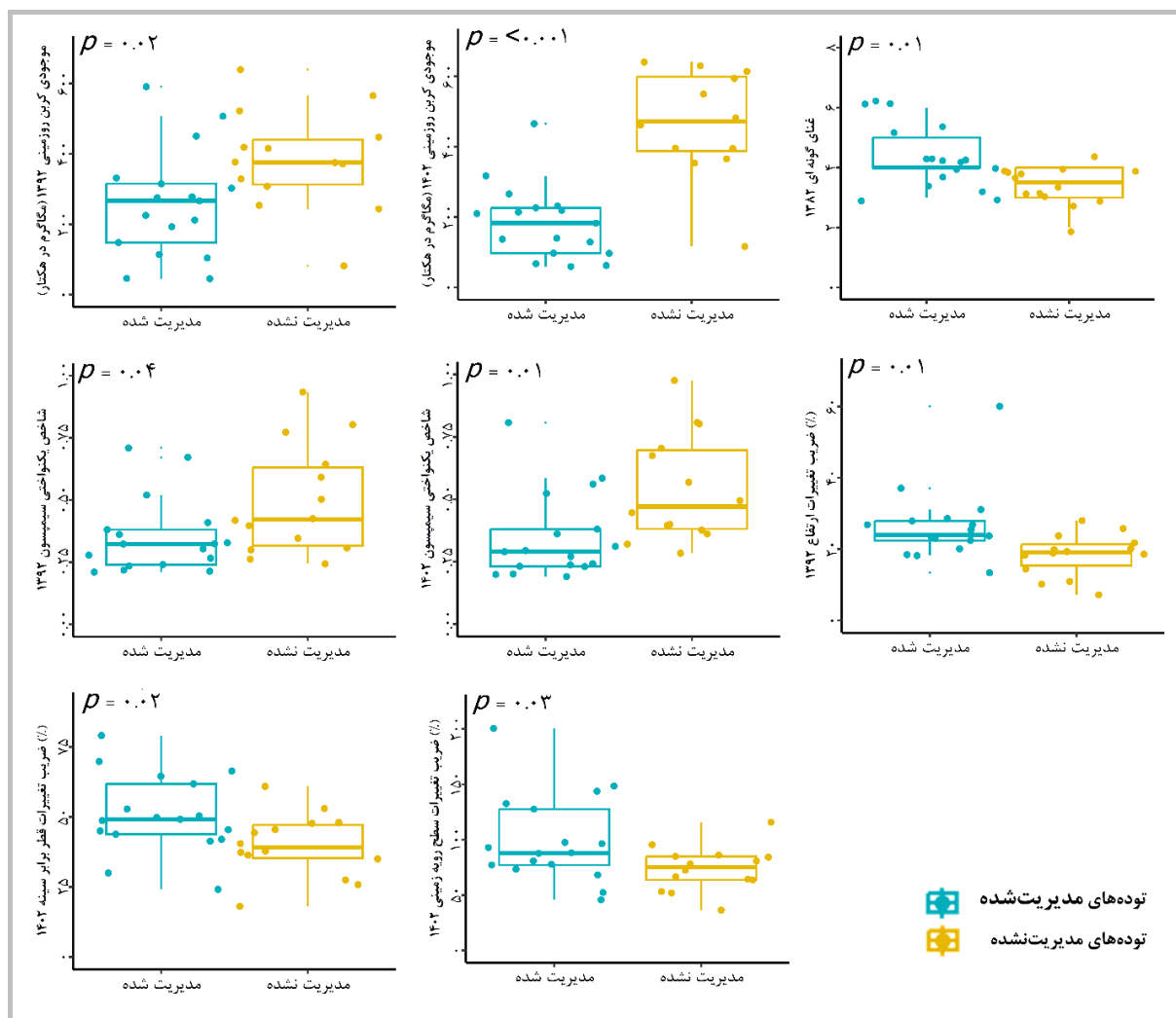
۲-۳. آزمون t مستقل موجودی کربن روزمینی و متغیرهای ساختاری توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده در سه دوره آماری (۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲)

نتایج مقایسه‌های میانگین موجودی کربن روزمینی، متغیرهای ساختاری و شاخص‌های تنوع گونه‌ای توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده در دوره آماری ۱۳۸۲ نشان داد که فقط شاخص غنای گونه‌ای، تفاوت معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ نشان داد و میانگین سایر متغیرها، تفاوت معنی‌داری نداشتند. در دوره آماری ۱۳۹۲، فقط ضریب تغییرات ارتفاع درختان، موجودی کربن روزمینی و شاخص یکنواختی سیمپسون، در سطح ۰/۰۵ دارای تفاوت معنی‌داری بین توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده بودند. موجودی کربن روزمینی، شاخص یکنواختی سیمپسون، ضریب تغییرات قطر برابر سینه و ضریب تغییرات سطح رویه زمینی دوره آماری ۱۴۰۲، تفاوت معنی‌داری بین توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده نشان دادند (شکل ۴).

۳-۳. آزمون تحلیل واریانس آمیخته موجودی کربن روزمینی و متغیرهای ساختاری توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده در سه دوره آماری (۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲)

شکل ۵ نشان‌دهنده میانگین موجودی کربن روزمینی و کلیه متغیرهای ساختاری و تغییرات آنها در سه دوره آماری ۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲ در توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده است. بررسی متغیرهای ساختاری و موجودی کربن روزمینی نشان داد که نوع مدیریت بر موجودی کربن روزمینی، شاخص غنای گونه‌ای، شاخص یکنواختی سیمپسون و ضرایب تغییرات قطر برابر سینه، ارتفاع و سطح رویه زمینی درختان تأثیر معنی‌داری داشت، ولی بر شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر و تراکم درختان در هکتار تأثیر

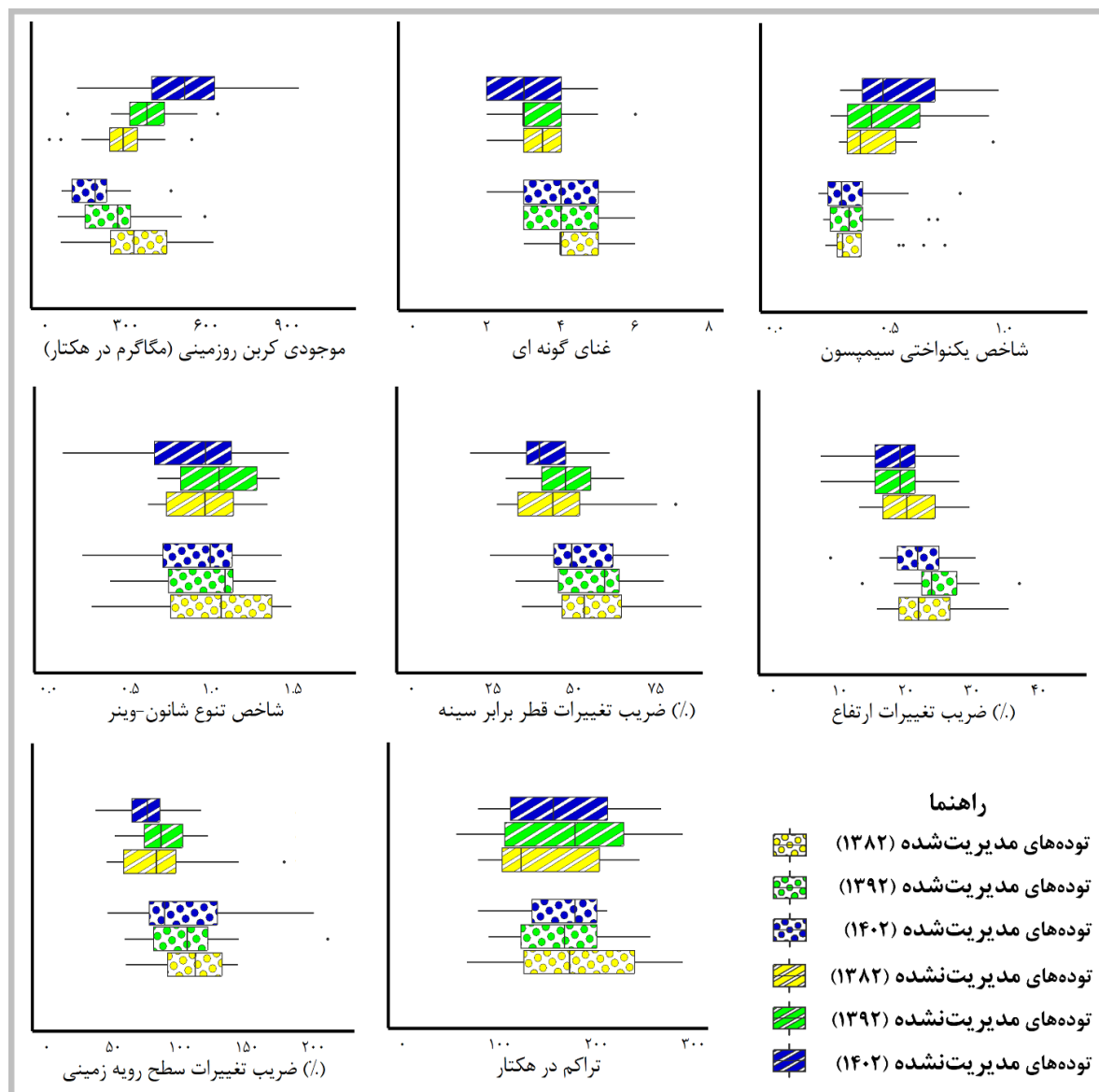
معنی‌داری نداشت (جدول ۲). همین‌طور، گذشت زمان (دوره آماری) بر ضریب تغییرات قطر برابر سینه درختان تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). با در نظر گرفتن همزمان نوع مدیریت به‌عنوان عامل بین گروهی و زمان (دوره آماری) به‌عنوان عامل درون گروهی، در دوره آماری ۱۳۸۲، اختلاف معنی‌داری در شاخص غنای گونه‌ای و ضریب تغییرات قطر برابر سینه درختان بین توده‌های مدیریت‌نشده و مدیریت‌شده مشاهده شد (جدول ۳). همچنین، در دوره آماری ۱۳۹۲، تفاوت معنی‌داری در موجودی کربن روزمینی، شاخص یکنواختی سیمپسون و ضرایب تغییرات قطر برابر سینه و ارتفاع درختان توده‌های مدیریت‌نشده و مدیریت‌شده وجود داشت (جدول ۳). موجودی کربن روزمینی، شاخص یکنواختی سیمپسون و ضرایب تغییرات قطر برابر سینه و سطح رویه زمینی درختان توده‌های مدیریت‌نشده با توده‌های مدیریت‌شده، به‌طور معنی‌داری متفاوت بودند (جدول ۳ و شکل ۵).



شکل ۴. نتایج آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین موجودی کربن روزمینی و کلیه متغیرهای ساختاری در توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده در دوره‌های آماری ۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲

۳-۴. مدل‌های رگرسیون چندگانه توده‌های مدیریت‌نشده سه دوره آماری (۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲)

بررسی تأثیر متغیرهای ساختاری و عوامل توپوگرافی بر موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت‌نشده دوره آماری ۱۳۸۲ نشان داد که این مدل می‌تواند ۸۴ درصد از تغییرات در موجودی کربن روزمینی را تشریح کند (شکل ۶ الف). شاخص یکنواختی سیمپسون ($P\text{-value} < 0.001$ ؛ -0.98) و ارتفاع از سطح دریا ($P\text{-value} < 0.01$ ؛ -0.58) تأثیر منفی و معنی‌دار و شاخص غنای گونه‌ای ($P\text{-value} = 0.01$ ؛ 0.47) و جهت شیب ($P\text{-value} = 0.02$ ؛ 0.45) تأثیر مثبت و معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشت.



شکل ۵. میانگین موجودی کربن روزمینی و کلیه متغیرهای ساختاری در سه دوره آماری ۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲ در توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت نشده

جدول ۲. تأثیر نوع مدیریت و زمان (سه دوره آماری ۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲) و اثر متقابل آنها بر متغیرهای ساختاری و موجودی کربن روزمینی با استفاده از تحلیل واریانس آمیخته درون-بین گروهی

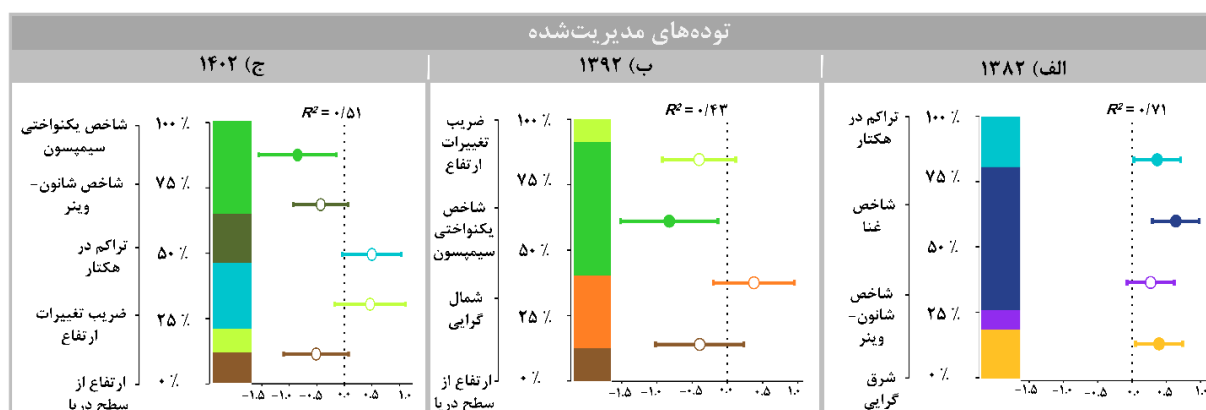
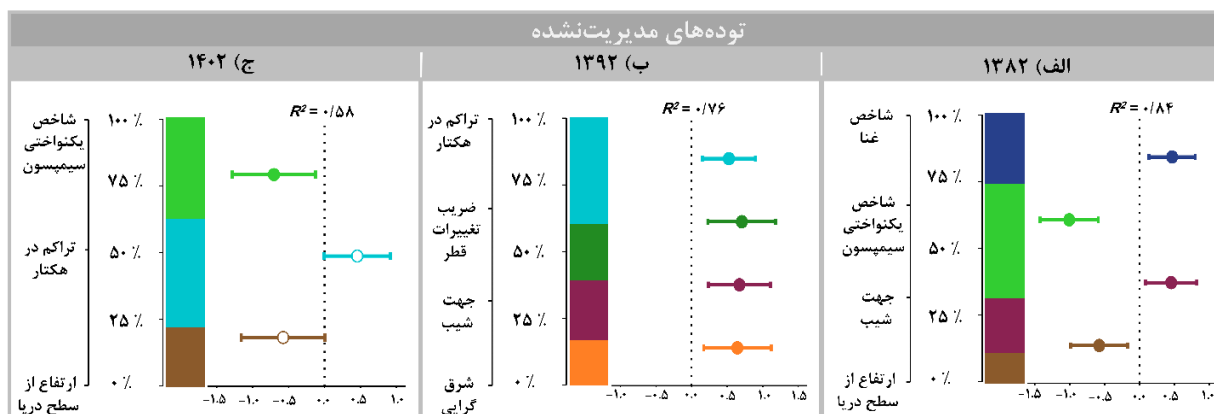
دوره آماری نوع مدیریت		دوره آماری		نوع مدیریت		مشخصه‌های اندازه‌گیری شده
P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	
< ۰/۰۰۱***	۲۶/۲۲۰	۰/۲۶۴	۱/۴۳۶	< ۰/۰۰۱***	۹/۲۰۱	موجودی کربن روزمینی
۰/۷۶۲	۰/۲۷۳	۰/۴۵۴	۰/۸۰۰	۰/۰۳*	۵/۹۲۸	شاخص غنای گونه‌ای
۰/۰۱*	۴/۸۰۵	۰/۱۴۵	۲/۰۰۰	۰/۰۴*	۴/۸۹۹	شاخص یکنواختی سیمپسون
۰/۵۵۲	۰/۶۰۰	۰/۲۵۹	۱/۳۸۴	۰/۸۴۱	۰/۰۴۱	شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر
۰/۷۸۱	۰/۲۴۸	۰/۰۴*	۳/۳۵۳	۰/۰۳*	۵/۸۱۷	ضریب تغییرات قطر برابر سینه درختان
۰/۱۰۷	۲/۳۲۷	۰/۳۴۰	۱/۴۶۲	۰/۰۲*	۶/۴۷۵	ضریب تغییرات ارتفاع درختان
۰/۷۳۶	۰/۳۰۸	۰/۱۵۵	۱/۹۲۸	۰/۰۳*	۴/۸۵۸	ضریب تغییرات سطح رویه زمینی درختان
۰/۱۱۵	۲/۲۴۸	۰/۲۴۷	۱/۴۳۶	۰/۹۷۳	۰/۰۰۱	تراکم درختان در هکتار

جدول ۳. میانگین و اشتباه معیار تأثیر عامل بین گروهی نوع مدیریت و عامل درون گروهی زمان (سه دوره آماری ۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲) بر متغیرهای ساختاری و موجودی کربن روزمینی

مشخصه‌های اندازه‌گیری شده	دوره آماری ۱۳۸۲		دوره آماری ۱۳۹۲		دوره آماری ۱۴۰۲	
	مدیریت نشده	مدیریت شده	مدیریت نشده	مدیریت شده	مدیریت نشده	مدیریت شده
موجودی کربن روزمینی	۲۷۶/۰ ± ۳۷/۴ ^a	۳۳۶/۳ ± ۳۶/۶ ^a	۳۷۹/۰ ± ۴۰/۷ ^a	۲۵۹/۱ ± ۳۶/۲ ^b	۵۱۲/۶ ± ۴۹/۹ ^a	۱۸۳/۷ ± ۲۵/۵ ^b
شاخص غنای گونه‌ای	۳/۴ ± ۰/۲ ^b	۴/۲ ± ۰/۳ ^a	۳/۶ ± ۰/۳ ^a	۴/۱ ± ۰/۲ ^a	۳/۲ ± ۰/۳ ^a	۳/۹ ± ۰/۳ ^a
شاخص یکنواختی سیمپسون	۰/۴۴ ± ۰/۰۵ ^a	۰/۳۷ ± ۰/۰۴ ^a	۰/۵۰ ± ۰/۰۶ ^a	۰/۳۵ ± ۰/۰۴ ^b	۰/۵۴ ± ۰/۰۶ ^a	۰/۳۵ ± ۰/۰۴ ^b
تنوع گونه‌ای شانون-وینر	۰/۹۵ ± ۰/۰۶ ^a	۱/۰۱ ± ۰/۰۹ ^a	۱/۰۴ ± ۰/۰۴ ^a	۰/۹۸ ± ۰/۰۸ ^a	۰/۹۳ ± ۰/۰۸ ^a	۰/۸۷ ± ۰/۱ ^a
ضریب تغییرات قطر برابر سینه درختان	۴۶/۱ ± ۴/۴ ^b	۵۶/۱ ± ۳/۶ ^a	۴۷/۳ ± ۲/۶ ^a	۵۴/۷ ± ۳/۳ ^b	۵۰/۸ ± ۳/۴ ^a	۳۹/۸ ± ۳/۱ ^b
ضریب تغییرات ارتفاع درختان	۲۰/۷ ± ۱/۵ ^a	۲۳/۱ ± ۱/۵ ^a	۱۸/۳ ± ۱/۶ ^b	۲۶/۵ ± ۲/۵ ^a	۱۸/۳ ± ۱/۶ ^a	۲۱/۹ ± ۱/۳ ^a
ضریب تغییرات سطح روبه زمینی درختان	۸۸/۱ ± ۱۰/۱ ^a	۱۰۶/۷ ± ۵/۹ ^a	۸۷/۰ ± ۵/۶ ^a	۱۰۴/۰ ± ۹/۳ ^a	۷۳/۹ ± ۵/۴ ^b	۹۹/۵ ± ۹/۶ ^a
تراکم درختان در هکتار	۱۴۶/۷ ± ۱۵/۶ ^a	۱۷۹/۶ ± ۱۷/۲ ^a	۱۸۲/۴ ± ۲۶/۳ ^a	۱۶۲/۶ ± ۱۳/۰ ^a	۱۷۳/۶ ± ۲۷/۸ ^a	۱۶۲/۶ ± ۱۰/۶ ^a

بیشترین اهمیت نسبی متغیرها در تشریح واریانس موجودی کربن روزمینی به ترتیب مربوط به شاخص یکنواختی سیمپسون (۴۲ درصد) و شاخص غنای گونه‌ای (۲۶ درصد) بود (شکل ۶ الف). نتایج حاصل از اثر متغیرهای فوق بر موجودی کربن روزمینی دوره آماری ۱۳۹۲ حاکی از تشریح ۷۶ درصد تغییرات در موجودی کربن روزمینی و تأثیر مثبت و معنی‌دار ضریب تغییرات قطر برابر سینه ($P\text{-value} = ۰/۰۰۹$ ؛ $۰/۷۱$)، جهت شیب ($P\text{-value} = ۰/۰۰۷$ ؛ $۰/۶۷$)، شمال‌گرایی ($P\text{-value} = ۰/۰۱$ ؛ $۰/۶۴$) و تراکم در هکتار ($P\text{-value} = ۰/۰۱۱$) بود. بیشترین اهمیت نسبی در مدل این دوره آماری به ترتیب متعلق به تراکم در هکتار (۴۰ درصد)، جهت شیب (۲۲ درصد) و ضریب تغییرات قطر برابر سینه (۲۲ درصد) بود (شکل ۶ ب). تأثیر متغیرهای ساختاری و عوامل توپوگرافی بر موجودی کربن روزمینی دوره آماری ۱۴۰۲ حاکی از تشریح ۵۸ درصد تغییرات در موجودی کربن روزمینی و تأثیر منفی و معنی‌دار شاخص یکنواختی سیمپسون ($P\text{-value} = ۰/۰۲۲$ ؛ $۰/۷۰$) بود. همچنین، ارتفاع از سطح دریا ($P\text{-value} = ۰/۰۵۳$ ؛ $۰/۵۸$) تأثیر منفی و تراکم در هکتار ($P\text{-value} = ۰/۰۵۳$ ؛ $۰/۴۶$) تأثیر مثبتی بر موجودی کربن روزمینی داشتند. بیشترین اهمیت نسبی در مدل این دوره آماری متعلق به متغیرهای تراکم در هکتار (۴۰ درصد) و شاخص یکنواختی سیمپسون (۳۷ درصد) بود (شکل ۶ ج).

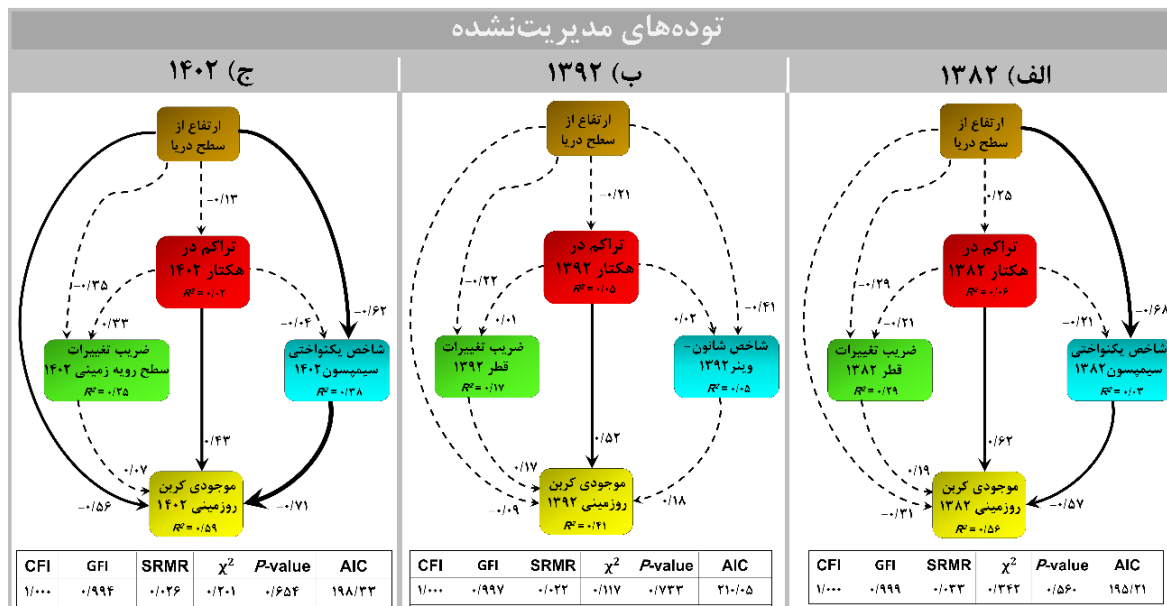
بررسی تأثیر متغیرهای ساختاری و عوامل توپوگرافی بر موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت‌شده دوره آماری ۱۳۹۲ نشان داد که این مدل می‌تواند ۷۱ درصد از تغییرات در موجودی کربن روزمینی را تشریح کند (شکل ۷ الف). شاخص غنای گونه‌ای ($P\text{-value} = ۰/۰۰۲$ ؛ $۰/۶۴$)، شرق‌گرایی ($P\text{-value} = ۰/۰۳$ ؛ $۰/۳۹$) و تراکم در هکتار ($P\text{-value} = ۰/۰۴$ ؛ $۰/۳۷$) تأثیر مثبت و معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشتند. بیشترین اهمیت نسبی متغیرها در تشریح واریانس موجودی کربن روزمینی به ترتیب مربوط به شاخص غنای گونه‌ای (۵۵ درصد)، شرق‌گرایی (۲۰ درصد) و تراکم در هکتار (۱۹ درصد) بود (شکل ۷ ب). نتایج حاصل از اثر متغیرهای فوق بر موجودی کربن روزمینی دوره آماری ۱۳۹۲ حاکی از تشریح ۴۳ درصد تغییرات در موجودی کربن روزمینی و تأثیر منفی و معنی‌دار شاخص یکنواختی سیمپسون ($P\text{-value} = ۰/۰۲۳$ ؛ $۰/۸۳$) بر موجودی کربن روزمینی بود. همچنین، ارتفاع از سطح دریا ($P\text{-value} = ۰/۱۹۷$ ؛ $۰/۳۹$) و شمال‌گرایی ($P\text{-value} = ۰/۱۲۰$ ؛ $۰/۴۰$) تأثیر منفی بر موجودی کربن روزمینی داشتند. همچنین، ضریب تغییرات ارتفاع درختان ($P\text{-value} = ۰/۱۷۸$ ؛ $۰/۳۸$) تأثیر مثبت بر موجودی کربن روزمینی داشتند. بیشترین اهمیت نسبی در مدل این دوره آماری به ترتیب متعلق به شاخص یکنواختی سیمپسون (۵۱ درصد) و شمال‌گرایی (۲۸ درصد) بود. (شکل ۷ ب). تأثیر متغیرهای ساختاری و عوامل توپوگرافی بر موجودی کربن روزمینی دوره آماری ۱۴۰۲ حاکی از تشریح ۵۱ درصد تغییرات در موجودی کربن روزمینی و تأثیر مثبت تراکم در هکتار ($P\text{-value} = ۰/۰۶۶$ ؛ $۰/۵۰$) بود. همچنین، ارتفاع از سطح دریا ($P\text{-value} = ۰/۰۸۲$ ؛ $۰/۵۱$) و شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر ($P\text{-value} = ۰/۰۸۵$ ؛ $۰/۴۳$)، تأثیر منفی و شاخص یکنواختی سیمپسون ($P\text{-value} = ۰/۰۲۲$ ؛ $۰/۸۵$) و ضریب تغییرات ارتفاع درختان ($P\text{-value} = ۰/۱۳۶$ ؛ $۰/۴۷$) تأثیر مثبت بر موجودی کربن روزمینی داشتند. بیشترین اهمیت نسبی در مدل این دوره آماری متعلق به متغیر شاخص یکنواختی سیمپسون (۳۶ درصد) و تراکم در هکتار (۲۵ درصد) بود (شکل ۷ ج).



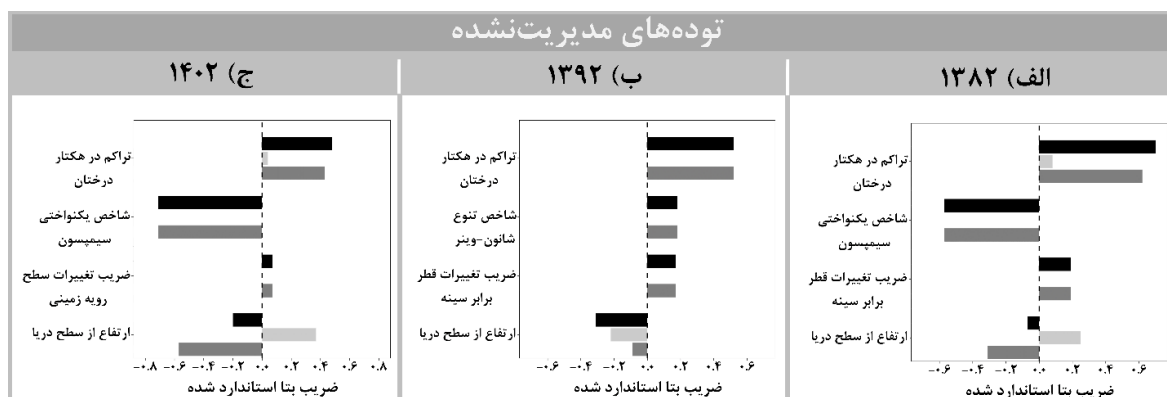
۳-۵. مدل معادلات ساختاری توده‌های مدیریت نشده و مدیریت شده سه دوره آماری (۱۳۸۲، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲)

بهترین مدل معادله ساختاری برازش شده توده‌های مدیریت نشده دوره آماری ۱۳۸۲ نشان داد که ارتفاع از سطح دریا تأثیر منفی و شاخص یکنواختی سیمپسون تأثیر منفی و معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشتند (شکل ۸ الف). همچنین، تراکم در هکتار تأثیر مثبت و معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشت (شکل ۸ الف). علاوه بر این، تراکم در هکتار اثر مستقیم و منفی ناچیزی بر شاخص یکنواختی سیمپسون و ضریب تغییرات قطر برابر سینه داشت. ارتفاع از سطح دریا اثر مستقیم منفی و معنی‌داری بر شاخص یکنواختی سیمپسون داشت، درحالی‌که اثر منفی آن بر ضریب تغییرات قطر برابر سینه و تراکم در هکتار معنی‌دار نبود (شکل ۸ الف). بهترین مدل معادله ساختاری برازش شده توده‌های مدیریت نشده دوره آماری ۱۳۹۲ نشان داد که ارتفاع از سطح دریا تأثیر منفی بسیار ناچیزی، شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر تأثیر مثبت و ناچیزی و تراکم در هکتار تأثیر مثبت و معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشتند (شکل ۸ ب). علاوه بر این، تراکم در هکتار اثر مستقیم بسیار ناچیزی بر شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر و ضریب تغییرات قطر برابر سینه داشت. ارتفاع از سطح دریا، اثر مستقیم منفی بر تراکم در هکتار، ضریب تغییرات قطر برابر سینه و شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر داشت (شکل ۸ ب). در نهایت، بهترین مدل معادله ساختاری برازش شده توده‌های مدیریت نشده دوره آماری ۱۴۰۲ نشان داد که ارتفاع از سطح دریا تأثیر منفی معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشت (شکل ۸ ج). شاخص یکنواختی سیمپسون تأثیر منفی معنی‌داری و تراکم در هکتار تأثیر مثبت معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشتند (شکل ۸ ج). علاوه بر این، تراکم در هکتار اثر مستقیم منفی بسیار ناچیزی بر شاخص یکنواختی سیمپسون و اثر مستقیم

مثبت حاشیه‌ای بر ضریب تغییرات سطح رویه زمینی داشت. ارتفاع از سطح دریا، اثر مستقیم منفی معنی‌داری بر شاخص یکنواختی سیمپسون داشت (شکل ۸ ج). همین‌طور، نتایج نشان داد که ارتفاع از سطح دریا به‌طور غیر مستقیم و از طریق شاخص یکنواختی سیمپسون، منجر به کاهش موجودی کربن روزمینی دوره آماری ۱۳۸۲ و ۱۳۹۲ شدند (شکل ۹).



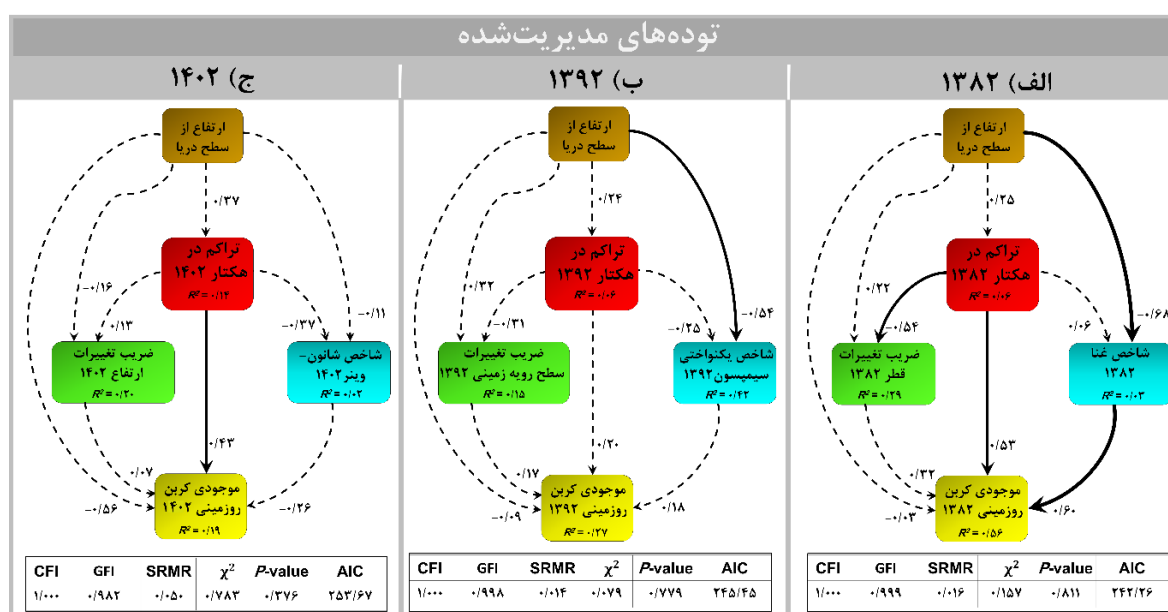
شکل ۸. بهترین مدل معادلات ساختاری برازش شده برای بررسی روابط چند متغیره بین عوامل فیزیوگرافی و متغیرهای ساختاری با موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت شده



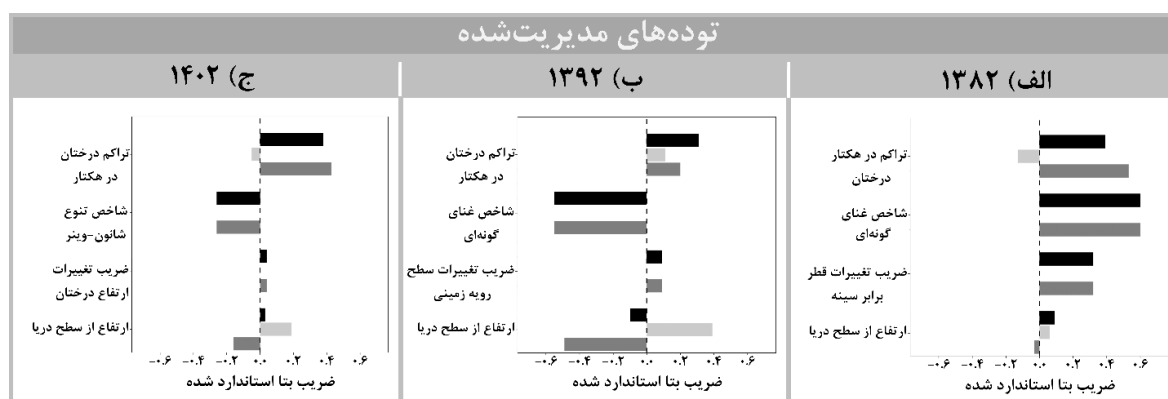
شکل ۹. اثرات مستقیم (طوسی تیره)، غیر مستقیم (طوسی روشن) و کلی (مشکی) عوامل فیزیوگرافی و متغیرهای ساختاری مورد استفاده در مدل معادلات ساختاری بر موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت شده

بهترین مدل معادله ساختاری برازش شده توده‌های مدیریت شده دوره آماری ۱۳۸۲ نشان داد که ارتفاع از سطح دریا تأثیر منفی ناچیزی بر موجودی کربن روزمینی داشت (شکل ۱۰ الف). با این حال، تراکم در هکتار و شاخص غنای گونه‌ای تأثیر مثبت و معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشتند (شکل ۱۰ الف). علاوه بر این، ضریب تغییرات قطر برابر سینه اثر مستقیم و مثبتی بر موجودی کربن روزمینی داشت. ارتفاع از سطح دریا اثر مستقیم منفی بر شاخص غنای گونه‌ای داشت، درحالی‌که اثر آن بر ضریب تغییرات قطر برابر سینه و تراکم در هکتار در عین مثبت بودن، معنی‌دار نبود (شکل ۱۰ الف). همچنین، تراکم در هکتار اثر مستقیم و منفی معنی‌داری بر ضریب تغییرات قطر برابر سینه داشت. بهترین مدل معادله ساختاری برازش شده توده‌های مدیریت شده دوره آماری ۱۳۹۲ نشان داد ارتفاع از سطح دریا و شاخص یکنواختی سیمپسون تأثیر منفی معنی‌داری بر موجودی کربن روزمینی داشتند

(شکل ۱۰ ب). علاوه بر این، تراکم در هکتار اثر مستقیم مثبت بسیار ناچیزی بر موجودی کربن روزمینی داشت، در حالی که اثر منفی آن بر شاخص یکنواختی سیمپسون و ضریب تغییرات سطح رویه زمینی ناچیز بود. ارتفاع از سطح دریا، اثر مستقیم منفی معنی‌دار بر شاخص یکنواختی سیمپسون داشت، در حالی که اثر منفی آن بر شاخص یکنواختی سیمپسون و ضریب تغییرات سطح رویه زمینی معنی‌دار نبود (شکل ۱۰ ب). در نهایت، بهترین مدل معادله ساختاری برازش‌شده توده‌های مدیریتی‌شده دوره آماری ۱۴۰۲ نشان داد که ارتفاع از سطح دریا تأثیر منفی بر موجودی کربن روزمینی داشت (شکل ۱۰ ج). شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر اثر منفی و ضریب تغییرات ارتفاع درختان تأثیر مثبت ناچیزی بر موجودی کربن روزمینی داشتند (شکل ۱۰ ج). علاوه بر این، تراکم در هکتار اثر مستقیم مثبت بسیار ناچیزی بر ضریب تغییرات ارتفاع درختان و اثر مستقیم منفی بر شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر داشت. ارتفاع از سطح دریا، اثر مستقیم منفی ناچیزی بر شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر داشت (شکل ۱۰ ج). همین‌طور، نتایج نشان داد که ارتفاع از سطح دریا به‌طور غیر مستقیم و از طریق شاخص یکنواختی سیمپسون، منجر به کاهش موجودی کربن روزمینی دوره آماری ۱۳۹۲ شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۰. بهترین مدل معادله ساختاری برازش شده برای بررسی روابط چند متغیره بین عوامل فیزیوگرافی و متغیرهای ساختاری با موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریتی‌نشده



شکل ۱۱. اثرات مستقیم (طوسی تیره)، غیر مستقیم (طوسی روشن) و کلی (مشکی) عوامل فیزیوگرافی و متغیرهای ساختاری مورد استفاده در مدل معادلات ساختاری بر موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریتی‌نشده

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بررسی مقادیر موجودی کربن روزمینی، تولید اکسیژن و جذب دی‌اکسیدکربن دوره‌های آماری ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲ حاکی از مقادیر بالاتر این متغیرها در توده‌های مدیریت‌نشده نسبت به توده‌های مدیریت‌شده بود. نتایج حاصل در راستای نتایج مطالعات دیگر بود که مقدار زی توده و موجودی کربن روزمینی جنگل‌های مدیریت‌شده و مدیریت‌نشده را مورد مقایسه قرار دادند [۱۸، ۱۹]. پژوهش‌های پیشین حاکی از افزایش موجودی کربن روزمینی ناشی از افزایش تراکم درختان در هکتار با گذشت زمان (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸) بود [۲۰] که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. در همین راستا، مقایسه موجودی کربن ثبت‌شده در قطعات نمونه مناطق حفاظت‌شده جنگلی (با غالبیت راش اروپایی (*Fagus sylvatica*))، نوئل نروژی (*Picea abies*) و نراد نقره‌ای (*Abies alba*) در طی سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸، حاکی از افزایش میانگین موجودی کربن روزمینی بود [۲۱]. همچنین، نتایج مطالعه حاضر با نتایج حاصل از تحقیق Nord-larsen و همکاران (۲۰۱۹) در توده‌هایی با غالبیت راش غربی (*Fagus sylvatica*) در دانمارک مطابقت داشت [۱۸]. بنابراین، تغییر در زی توده روزمینی توده‌های جنگلی حفاظت‌شده در طول زمان (۳۰ سال)، می‌تواند ناشی از بلوغ توده‌های جنگلی و فقدان دخالت‌های مدیریتی باشد [۲۱]. برخی از مطالعات نشان دادند که در مقایسه با جنگل‌های مدیریت‌شده، در جنگل‌های مدیریت‌نشده کاهش قابل توجه موجودی کربن می‌تواند به آشفتگی‌های ناشی از دخالت‌های انسانی نسبت داده شود [۲۰]. به‌طور معمول، جنگل‌های مدیریت‌شده شامل توده‌های جوان‌تری هستند که می‌توانند نرخ ترسیب کربن بالاتری نسبت به جنگل‌های مدیریت‌نشده با توده‌های قدیمی‌تر داشته باشند. کاهش تراکم درختان ناشی از برش‌گزینی می‌تواند رقابت بین درختان برای دستیابی به منابع محدود را کاهش داده و موجب افزایش رشد درختان باقی‌مانده شود. برخی پژوهشگران معتقدند که در جنگل‌های مدیریت‌شده به دلیل تراکم کمتر درختان، رقابت کمتر و دسترسی بیشتر به مواد غذایی، انتظار می‌رود موجودی کربن کمتری نسبت به جنگل‌های مدیریت‌نشده داشته باشند [۲۲]. برخلاف نتایج مطالعه حاضر، برخی مطالعات نشان داد که بهبود شرایط رشد ناشی از تیمارهای جنگل‌شناسی با به حداقل رساندن سایر عوامل محدودکننده رشد می‌تواند تأثیر شرایط آب‌وهوایی مطلوب را تسهیل و رشد و ترسیب کربن توده‌های مدیریت‌شده را افزایش دهد [۲۳]. Kern و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که ترسیب کربن در سال‌های اولیه پس از برداشت به بالاترین حد خود رسید، بنابراین، چرخه‌های کوتاه برداشت ممکن است برای مدیریت کربن جنگل‌های ناهمسال مفید باشد [۲۴]. این روند می‌تواند به افزایش کوتاه‌مدت منابع مورد نیاز درختان بلافاصله پس از اعمال شیوه‌گزینی، نسبت داده شود.

پیش‌بینی روند تغییرات تنوع زیستی برای درک تأثیر تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی و تأثیر تغییر کاربری و پوشش زمین در مقیاس محلی بر بوم‌سازگان و انسان‌ها بسیار مهم است. نتایج مطالعه حاضر در بررسی شاخص‌های تنوع گونه‌ای طی سه دهه، حاکی از مقادیر بیشتر غنای گونه‌ای در توده‌های مدیریت‌شده در مقایسه با توده‌های مدیریت‌نشده بود. این درحالی است که ضمن افزایش شاخص یکنواختی سیمپسون در طی سه دهه، این شاخص مقادیر بالاتری را نسبت به توده‌های مدیریت‌شده داشت. شاخص تنوع شانون-وینر ضمن اینکه مقادیر تقریباً یکسانی را در هر دو نوع توده نشان داد، در سال ۱۴۰۲ مقادیر به نسبت بیشتری در توده‌های مدیریت‌نشده داشت. به‌علاوه، بین شاخص غنای گونه‌ای دو توده در دوره آماری ۱۳۸۲ و شاخص یکنواختی سیمپسون در دوره‌های آماری ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲، تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. Eshaghirad و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی تأثیر شیوه تک‌گزینی بر تنوع گیاهان چوبی در سه توده راش، راش-ممرز و ممرز در غرب گیلان، به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های غنای گونه‌ای، تنوع گونه‌ای شانون-وینر و سیمپسون پس از اجرای شیوه تک‌گزینی (یک دوره ده‌ساله) افزایش یافت، ولی بین میانگین‌ها اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نشد [۲۵] که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی داشت. نتایج بررسی Seyd و همکاران (۲۰۱۵) در راستای نتایج مطالعه حاضر و حاکی از مقادیر بیشتر غنا در توده مدیریت‌شده نسبت به توده مدیریت‌نشده و مقادیر کمتر یکنواختی نسبت به توده مدیریت‌نشده بود [۲۶]. مقادیر بالای غنای گونه‌ای در توده‌های مدیریت‌شده نسبت به توده‌های دست‌نخورده می‌تواند به افزایش ریشه‌های تاج‌پوشش و مستقر شدن گونه‌های درختی نورپسند مانند خرمندی، شیردار، پلت و غیره نسبت داده شود. همچنین، مطالعات پیشین نشان دادند که تأثیر مدیریت جنگل بر تنوع گونه‌ای به شرایط زیستی، محیطی و رویکردهای مدیریتی جنگل بستگی دارد. به‌عنوان مثال، Schall و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که نوع مدیریت جنگل بر تنوع زیستی در مقیاس

منطقه‌ای تأثیر می‌گذارد؛ اما، تأثیر آن در مقیاس محلی بر جنگل‌های راش اروپایی بسیار ناچیز بود [۲۷]. همچنین، جنگل‌های مدیریت‌شده با سیستم گزینشی در اسپانیا، تنوع گونه‌ای بالاتری در مقایسه با جنگل‌های مدیریت‌نشده داشتند [۲۸]. راش شرقی (*Fagus Orientalis*) که به‌طور طبیعی گونه غالب جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شود، گونه‌ای سایه‌پسند با قابلیت زادآوری و قدرت رقابت بالا در زیر تاج‌پوشش بسته یا تقریباً بسته است [۲۹]. بنابراین، باز شدن تاج‌پوشش با تنک کردن یا برداشت، ممکن است موجب ایجاد روشنه‌های بزرگ‌تری نسبت به روشنه‌های طبیعی شود و شدت نور کف جنگل را افزایش دهد. افزایش ناهمگنی و دسترسی بیشتر به نور می‌تواند باعث افزایش زادآوری گونه‌های درختی غیر از راش شرقی شود که منجر به تنوع بیشتر لایه‌های درختی در جنگل‌های مدیریت‌شده می‌شود.

نتایج این مطالعه حاکی از بالاتر بودن میانگین تراکم در هکتار درختان توده‌های مدیریت‌شده نسبت به توده‌های مدیریت‌نشده بود، هر چند که این اختلاف معنی‌دار نبود. Van Winckel و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند که تراکم درختان در توده‌های مدیریت‌شده بیشتر بود و این امر ناشی از غلبه درختان کوچک‌تر و تعداد درختان متعلق به طبقات کم قطر بود [۱۹]. به‌علاوه، نتایج حاکی از تأثیر مثبت و معنی‌دار تراکم درختان در هکتار بر موجودی کربن رو زمینی بود. Cai و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان دادند که مؤلفه‌های ساختاری جنگل مانند تراکم در هکتار، بهترین متغیر پیش‌بینی‌کننده ترسیب کربن در جنگل‌های چین بود [۳۰].

نتایج مدل‌های رگرسیون چندگانه و مدل‌های معادلات ساختاری مطالعه حاضر حاکی از تأثیر منفی و معنی‌دار شاخص یکنواختی سیمپسون بر موجودی کربن روزمینی بود که با نتایج پژوهشی در جنگل‌های استوایی ویتنام هم‌خوانی داشت [۱۱]. در توده‌های مدیریت‌نشده، موجودی کربن روزمینی با افزایش ارتفاع از سطح دریا کاهش یافت، هر چند که این کاهش معنی‌دار نبود. بر عکس، موجودی کربن روزمینی توده‌های مدیریت‌نشده با افزایش ارتفاع از سطح دریا، روند افزایشی ناچیزی داشت. Siemonsmeier و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که تأثیر دخالت‌های جنگل‌شناسی بر زی‌توده جنگل‌های مدیریت‌شده واقع در ارتفاعات بالا بسیار ناچیز بود، در حالی که، در ارتفاعات پایین، زی‌توده جنگل‌های مدیریت‌شده در مقایسه با ذخیره‌گاه‌های جنگلی به‌شدت محافظت شده، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کم‌تر بود [۲۱] که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی داشت. روند مشابه کاهش میانگین موجودی کربن روزمینی جنگل با افزایش ارتفاع از سطح دریا توسط Seedre و همکاران (۲۰۱۵) در توده‌های جنگلی پیش‌رسته بوهیمیان جمهوری چک به‌دست آمد [۳۱]. در زیست‌بوم‌های معتدله و در مقیاس‌های مختلف، این واقعیت که دما به‌عنوان عامل محدودکننده رشد درخت، نه فقط تعیین‌کننده دارمزرز گونه‌های درختی در ارتفاعات آلفی است، بلکه تولید جنگل در ارتفاعات بالا و در دامنه ارتفاعی پایین‌تر از دارمزرز را محدود می‌کند، مورد تأکید قرار گرفته است [۳۲]. به‌طور کلی، افزایش ارتفاع از سطح دریا، تأثیر منفی بر شاخص یکنواختی سیمپسون گونه‌های درختی دارد، چرا که شرایط سخت محیطی در ارتفاعات بالاتر (درجه حرارت پایین‌تر، کاهش حاصلخیزی خاک و محدود شدن دوره‌های رویش) منجر به کاهش تنوع گونه‌ها می‌شود و می‌تواند منجر به غالبیت یک یا چند گونه محدود (یکنواختی بیشتر) شود. در جنگل‌های مدیریت‌نشده، ممکن است ساختارهای متعددی در مقیاس کوچک ایجاد شوند که منجر به الگوی نامنظم و تکه‌تکه ساختاری شوند. همچنین، تغییر مؤلفه‌های ساختاری جنگل منجر به ایجاد محدوده‌های جنگلی با خصوصیات ساختاری متفاوتی خواهند شد که به‌نوبه خود رویش و کل موجودی کربن جنگل را متأثر می‌سازند [۳۳]. جنگل‌های مدیریت‌نشده و طبیعی با ساختاری پیچیده، ممکن است زی‌توده بالاتری داشته باشند که می‌تواند منتج از سازوکارهای مرتبط با ناهمگنی منابع، تمایز آشیان بوم‌شناختی گونه‌ها باشد که به‌طور معمول به تاج‌پوشش بسته و چند لایه، پر شدن روشنه‌ها از زادآوری گونه‌ها نسبت داده شود که به‌نوبه خود بر بهبود عملکرد جنگل (فتوسنتز، تنفس و تولید ناخالص جنگل) تأثیر می‌گذارد [۳۴].

بوم‌سازگان‌های جنگلی یکی از بزرگ‌ترین مخازن و ذخیره‌گاه‌های کربن هستند و مقادیر زیادی CO₂ را با جو مبادله می‌کنند. بنابراین، درک اثرات متقابل بین زی‌توده جنگل، تنوع گونه‌ای، مؤلفه‌های ساختاری و همچنین شناسایی تأثیر مدیریت جنگل بر این روابط و پایش آن، در مواجهه با تغییرات اقلیمی و کاهش تنوع زیستی در مقیاس جهانی ضروری است. با توجه به نتایج این پژوهش، شیوه تک‌گزینی به‌دلیل الگوبرداری از شرایط تخریب طبیعی در مقیاس کوچک، روشی مناسب برای حفظ و حتی ارتقای تنوع گونه‌ای توده‌های طبیعی جنگل‌های شمال کشور است و به‌عنوان یک شیوه جنگل‌شناسی مناسب برای حفظ تنوع گونه‌ای در کنار تولید چوب در جنگل‌های طبیعی شمال کشور، پیشنهاد می‌شود.

۵. منابع

- [1] Allen, M., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S. & Kainuma, M. (2018). Special report: Global warming of 1.5 C. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), 677, 393.
- [2] Goheer, M. A., Fatima, L., Farah, H., Hassan, S.S. & Abbas, N. (2023). Assessment of change in forests land, carbon stock and carbon emissions of KPK, Pakistan for past three decades using geospatial techniques. *Journal of Water and Climate Change*, 14(2), 442-453.
- [3] Kassaye, M., Emiru, E., Derebe, Y. & Tsega, A. (2025). Carbon stock dynamics in Ethiopian forests; a systematic review for sustainable forest management towards climate change mitigation. *Trees, Forests and People*, 20, 100841.
- [4] Maghsodlonejad, M., Bonyad, A. & Shataee, S. (2020). Estimation stock and economic value of carbon storage of *Juniperus excelsa* in Gorgan Chahar Bagh. *Forest and Wood Products*, 72(4), 301-311.
- [5] Mora, B., Herold, M., De Sy, V., Wijaya, A., Verchot, L. & Penman, J. (Eds.). (2013). Capacity development in national forest monitoring. CIFOR.
- [6] Alam, A., Kilpeläinen, A. & Kellomäki, S. (2008). Impacts of thinning on growth, timber production and carbon stocks in Finland under changing climate. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(6), 501-512.
- [7] Matasci, G., Hermosilla, T., Wulder, M.A., White, J.C., Coops, N.C., Hobart, G.W., Bolton, D.K., Tompalski, P. & Bater, C. W. (2018). Three decades of forest structural dynamics over Canada's forested ecosystems using Landsat time-series and lidar plots. *Remote Sensing of Environment*, 216, 697-714.
- [8] Lutz, J.A., Furniss, T.J., Johnson, D.J., Davies, S.J., Allen, D., Alonso, A., Anderson-Teixeira, K.J., Andrade, A., Baltzer, J., Becker, K.M. & Blomdahl, E.M. (2018). Global importance of large-diameter trees. *Global Ecology and Biogeography*, 27(7), 849-864.
- [9] Kazempour Larsary, M., Pourbabaei, H., Sanaei, A., Salehi, A., Yousefpour, R. & Ali, A. (2021). Tree-size dimension inequality shapes aboveground carbon stock across temperate forest strata along environmental gradients. *Forest Ecology and Management*, 496, 119482.
- [10] Ali, A. & Mattsson, E. (2017). Individual tree size inequality enhances aboveground biomass in homegarden agroforestry systems in the dry zone of Sri Lanka. *Science of the Total Environment*, 575, 6-11.
- [11] Van Con, T., Thang, N.T., Khiem, C.C., Quy, T. H., Lam, V.T., Van Do, T. & Sato, T. (2013). Relationship between aboveground biomass and measures of structure and species diversity in tropical forests of Vietnam. *Forest Ecology and Management*, 310, 213-218.
- [12] Zhang, Y., Chen, H.Y. & Reich, P.B. (2012). Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. *Journal of Ecology*, 100(3), 742-749.
- [13] Storch, F., Dormann, C.F. & Bauhus, J. (2018). Quantifying forest structural diversity based on large-scale inventory data: a new approach to support biodiversity monitoring. *Forest Ecosystems*, 5(1), 1-14.
- [14] Ali, A., Yan, E.R., Chen, H.Y., Chang, S.X., Zhao, Y.T., Yang, X.D. & Xu, M.S. (2016). Stand structural diversity rather than species diversity enhances aboveground carbon storage in secondary subtropical forests in Eastern China. *Biogeosciences*, 13(16), 4627-4635.
- [15] Blankenship, R. E. (2021). Molecular mechanisms of photosynthesis. John Wiley & Sons.
- [16] Nowak, D. J., Hoehn, R. & Crane, D.E. (2007). Oxygen production by urban trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(3), 220-226.
- [17] Dobrović, I., Safner, T., Jelaska, S.D. & Nikolić, T. (2006). Ecological and phytosociological characteristics of the association *Abieti-Fagetum* *pannonicum* «Rauš 1969 prov. on Mt. Medvednica (NW Croatia). *Acta Botanica Croatica*, 65(1), 41-55.
- [18] Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Bentsen, N.S. & Larsen, J.B. (2019). Ecosystem carbon stocks and their temporal resilience in a semi-natural beech-dominated forest. *Forest Ecology and Management*, 447, 67-76.
- [19] Van Winckel, S., Simons, J., Lhermitte, S. & Muys, B. (2025). Assessing the effect of forest management on above-ground carbon stock by remote sensing. *Biogeosciences*, 22(16), 4291-4307.

- [20] Yan, L., Meng, S., Yang, F., Dai, X. & Wang, H. (2023). Changes in Forest Vegetation Carbon Storage and Its Driving Forces in Subtropical Red Soil Hilly Region over the Past 34 Years: A Case Study of Taihe County, China. *Forests*, 14(3), 602.
- [21] Siemonsmeier, A., Förster, B. & Markus, B. (2020). Forest structures and carbon storage in managed and unmanaged forests along an altitudinal gradient in a Central European low mountain range. *CABI Databases*, 19, 71-88.
- [22] Noormets, A., Epron, D., Domec, J.C., McNulty, S.G., Fox, T., Sun, G. & King, J.S. (2015). Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*, 355, 124-140.
- [23] Dié, A., De Ridder, M., Cherubini, P., Kouamé, F.N., Verheyden, A., Kitin, P., Toirambe, B.B., Van den Bulcke, J., Van Acker, J. & Beeckman, H. (2015). Tree rings show a different climatic response in a managed and a non-managed plantation of teak (*Tectona grandis*) in West Africa. *Iawa Journal*, 36(4), 409-427.
- [24] Kern, C.C., Kenefic, L.S., Kuehne, C., Weiskittel, A.R., Kaschmitter, S.J., D'Amato, A.W., Dey, D.C., Kabrick, J.M., Palik, B.J. & Schuler, T.M. (2021). Relative influence of stand and site factors on aboveground live-tree carbon sequestration and mortality in managed and unmanaged forests. *Forest Ecology and Management*, 493, 119266.
- [25] Eshaghirad, J., Seyedi, N. & Hasanzad, N.I. (2010). Effect of single selection method on woody species diversity (case study: Janbe sara district-Guilan). *Iranian journal of Forest*, 1(4), 275-285.
- [26] Seyd, S. Z., Moayeri, M. H., & Mohammadi, J. (2015). Comparison of tree species diversity in the beech managed (selection cutting) and unmanaged forest stands (Case study: Shastkalateh Forest-Gorgan). *Journal of Plant Research*, 28(4), 784-793.
- [27] Schall, P., Gossner, M.M., Heinrichs, S., Fischer, M., Boch, S., Prati, D., Jung, K., Baumgartner, V., Blaser, S., Böhm, S. & Buscot, F. (2018). The impact of even-aged and uneven-aged forest management on regional biodiversity of multiple taxa in European beech forests. *Journal of applied Ecology*, 55(1), 267-278.
- [28] Torras, O., & Saura, S. (2008). Effects of silvicultural treatments on forest biodiversity indicators in the Mediterranean. *Forest Ecology and Management*, 255(8-9), 3322-3330.
- [29] Nasiri, N., Marvie Mohadjer, M. R., Etemad, V., Sefidi, K., Mohammadi, L. & Gharehaghaji, M. (2018). Natural regeneration of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) trees in canopy gaps and under closed canopy in a forest in northern Iran. *Journal of Forestry Research*, 29(4), 1075-1081.
- [30] Cai, W., He, N., Li, M., Xu, L., Wang, L., Zhu, J., Zeng, N., Yan, P., Si, G., Zhang, X. & Cen, X. (2022). Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: Spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. *Science Bulletin*, 67(8), 836-843.
- [31] Seedre, M., Kopáček, J., Janda, P., Bače, R. & Svoboda, M. (2015). Carbon pools in a montane old-growth Norway spruce ecosystem in Bohemian Forest: Effects of stand age and elevation. *Forest Ecology and Management*, 346, 106-113.
- [32] Sidor, C. G., Popa, I., Vlad, R. & Cherubini, P. (2015). Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania). *Trees*, 29(4): 985-997.
- [33] Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D.W., Minkinen, K. & Byrne, K.A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137(3-4), 253-268.
- [34] Kazempour Larsary, M., Pourbabaei, H., Salehi, A., Yousefpour, R. & Ali, A. (2025). Tree-based attributes of large trees more effectively regulate aboveground carbon stock than trait-based ones in temperate deciduous forests. *Plant Diversity*, 47, 653-665.