Journal of Forest Ecosystems Researches, 2025, 4(2): 26-37

Research Article

Estimation of carbon storage of tree cover in urban forest (study area: Mazandaran province, Sari city)

Elham Fazeli[1*], Asghar Fallah[1], Morteza Shabani[2], Mahya Tafazoli[1]

Extended Abstract

Background and objectives: One of the most significant factors contributing to global warming is the illegal emission of greenhouse gases, the most important of which are nitrogen dioxide (NO2), carbon dioxide (CO2), and methane (CH4). However, due to the large accumulation of carbon dioxide in the atmosphere, this gas is a key contributor to global warming. Therefore, to reduce atmospheric carbon dioxide and balance greenhouse gas levels, atmospheric carbon must be absorbed and stored in various forms. Urban forests have a high capacity to absorb atmospheric carbon dioxide and provide many environmental services in urban areas. Consequently, it is necessary to obtain accurate and reliable information in this regard to manage these forests optimally for increased carbon sequestration. This research aimed to estimate the carbon stock of the urban forest in Sari City, the capital of Mazandaran province.

Materials and methods: In this research, using selective sampling, 150 samples were taken (50 samples in each region), with efforts made to distribute these samples across the three regions. First, information related to the general characteristics of each sample, including elevation above sea level, slope, and aspect, was recorded. In each sample plot, species type, diameter at breast height, height, and small and large crown diameters of all trees were measured, and the number of each tree and shrub species was recorded. In each sample plot, the species type, breast diameter, height, and small and large crown diameters of all trees were measured, and the number of each tree and shrub species was counted and harvested. The center of each sample plot and each measured tree was recorded with a GPS device and transferred to the GIS software environment. After calculating the carbon sequestration of trees, the relationship between diameter and carbon sequestration was investigated using linear regression in SPSS software version 21. A carbon sequestration zoning map was then prepared for all areas of Sari using the conventional kriging method in GS+ software.

Results: The highest and lowest amounts of carbon sequestration by trees was observed in areas one (60.95 ± 31.10 tons per hectare) and three (13.68 ± 3.84 tons per hectare) of Sari city, respectively. Variance analysis of the relationships between diameter and carbon deposition showed that both linear and power regression models were significant. The evaluation results of the linear regression model ($R^2 = 0.74$) and the power model ($R^2 = 0.97$) indicated that both models are highly accurate in estimating carbon deposition on the ground of trees. According to the results, the highest potential for carbon sequestration was observed in the northeastern part, located in municipality area number one of Sari.

Conclusion: Conclusion: This research observed a high level of carbon sequestration in the city of Sari. the main reason for the substantial carbon deposition in Sari is that most of the trees in its green spaces are mature plane trees. The high carbon deposition of plane trees is due to the greater density of their wood compared to other species. Generally, young trees sequester carbon at a higher rate and speed than older trees, but mature trees store larger amounts of carbon over longer periods. the finding that trees in Sari can absorb 200 tons of carbon per hectare is both remarkable and promising. Prioritizing the preservation and growth of larger, older trees in urban environments may yield significant benefits for carbon sequestration. Additionally, examining the temporal dynamics of carbon sequestration, incorporating other environmental variables, or refining the spatial resolution of the analysis could further improve the accuracy of carbon sequestration estimates. Therefore, acquiring more information in this area is essential.

Keywords: Carbon Sequestration, Global Warming, Urban Forestry

[1]Department of Forestry, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

*Corresponding Author, Email: Fazelielham66@yahoo.com

[2]Department of Watershed, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

DOI: 10.21859/jfer.5.1.26
ISSN: 2423-4427 (Online); 2423-4095 (Print)

Received: 11.05.2025, Accepted: 19.09.2025, Online Published: 10.12.2025

مقاله پژوهشی

برآورد ذخیره کربن روی زمینی درختی در جنگل شهری (منطقه پژوهش: استان مازندران، شهرستان ساری)

الهام فاضلی[1*]، اصغر فلاح[1]، مرتضی شعبانی[2]، محیا تفضلی[1]

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد گرمایش جهانی پدیده انتشار گازهای گلخانه‌ای است؛ که مهم‌ترین آنها شامل دی‌اکسیدنیتروژن (NO_2)، دی‌اکسیدکربن (CO_2) و متان (CH_4) هستند. اما با توجه به حجم بیشتر تجمع دی‌اکسیدکربن در اتمسفر، این گاز یکی از کلیدی‌ترین گازها در پدیده گرمایش جهانی کره زمین مطرح گردیده است. بنابراین به‌منظور کاهش دی‌اکسیدکربن اتمسفری و ایجاد تعادل در محتوای گازهای گلخانه‌ای، کربن اتمسفر باید جذب و در شکل‌های متعدد ترسیب شود. جنگل‌های شهری ظرفیت بالایی در جذب دی‌اکسیدکربن اتمسفری دارند و خدمات محیط زیستی بسیاری را در مناطق شهری ایجاد می‌کنند. بنابراین، کسب اطلاعات درست و دقیق در این رابطه به‌منظور مدیریت بهینه این جنگل‌ها در افزایش ترسیب کربن لازم و ضروری است. هدف از اجرای این پژوهش برآورد مقدار ذخیره کربن جنگل شهری در شهر ساری، مرکز استان مازندران بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش با استفاده از نمونه‌برداری انتخابی تعداد ۱۵۰ قطعه نمونه (۵۰ قطعه نمونه در هر منطقه شهری) برداشت شد و تلاش گردید که این قطعات نمونه در کل مناطق شهری سه‌گانه دارای پراکنش مناسبی باشند. ابتدا اطلاعات مربوط به ویژگی‌های عمومی هریک از قطعات نمونه شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت اندازه‌گیری و یادداشت شد. در هر قطعه نمونه، نوع گونه، قطر برابر سینه، ارتفاع و قطرهای کوچک و بزرگ تاج پوشش تمام درختان اندازه‌گیری شد، همچنین تعداد هرکدام از گونه‌های درختی و درختچه‌ای شمارش و برداشت شد. مرکز هر قطعه نمونه و درخت اندازه‌گیری شده با دستگاه GPS ثبت و به محیط نرم‌افزار GIS انتقال داده شد. پس از محاسبه ترسیب کربن درختان، رابطه قطر و ترسیب کربن با استفاده از رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. سپس نقشه پهنه‌بندی ترسیب کربن در کل مناطق شهر ساری با استفاده از روش کریجینگ معمولی و در نرم‌افزار GS+ تهیه شد.

یافته‌ها: بیشترین و کمترین مقدار ترسیب کربن درختان به‌ترتیب در مناطق یک (۶۰/۹۵±۳۱/۱۰ تن در هکتار) و سه (۱۳/۶۸±۳/۸۴ تن در هکتار) شهر ساری مشاهده شد. تجزیه واریانس روابط قطر و ترسیب کربن نشان داد که مدل‌های رگرسیون خطی و توانی معنی‌دار بودند. نتایج ارزیابی مدل رگرسیون خطی (R^2=۰/۷۴) و توانی (R^2=۰/۹۷) نشان داد که هر دو مدل دقت بالایی در برآورد ترسیب کربن روی زمینی درختان دارند. مطابق نتایج به‌دست آمده بالاترین پتانسیل ترسیب کربن در قسمت شمال شرقی و واقع در منطقه یک شهر ساری مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: در این پژوهش مقدار قابل توجهی از ترسیب کربن در شهر ساری مشاهده شد. می‌توان دلیل اصلی بالا بودن مقدار ترسیب کربن در شهر ساری را ناشی از این بیان کرد بیشتر درختان در فضای سبز شهر ساری را درختان چنار کنهسال تشکیل می‌دهد. دلیل بالا بودن میزان ترسیب کربن درخت چنار بالا بودن چگالی چوب آن نسبت به سایر درختان است. به‌طور کلی درختان جوان میزان و سرعت ترسیب کربن بیشتری نسبت به درختان مسن دارند اما درختان مسن نیز کربن را به‌میزان بیشتری و مدت زمان طولانی‌تری ترسیب می‌کنند. کسب نتایج در مورد اینکه درختان شهر ساری ظرفیت جذب ۲۰۰ تن کربن در هر هکتار را دارند، قابل توجه و امیدوارکننده است. اولویت دادن به حفظ و رشد درختان بزرگتر و مسن‌تر در محیط‌های شهری ممکن است نتایج قابل‌توجهی برای ترسیب‌کربن به‌همراه داشته باشد. در عین حال بررسی پویایی زمانی ترسیب‌کربن، ترکیب سایر متغیرهای محیطی، یا اصلاح تفکیک مکانی تجزیه و تحلیل می‌تواند دقت تخمین ترسیب‌کربن را بیشتر افزایش دهد، بنابراین کسب اطلاعات بیشتر در این راستا لازم و ضروری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ترسیب‌کربن، جنگلداری شهری، گرمایش جهان.

[1] گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
Fazelielham66@yahoo.com

[2] گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

DOI: 10.21859/jfer5.1.26
شاپا: ۴۴۲۷-۲۴۲۳ (برخط)؛ ۴۰۹۵-۲۴۲۳ (چاپی)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸
تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد گرمایش جهانی پدیده انتشار گازهای گلخانه‌ای است که مهم‌ترین آنها شامل دی‌اکسید نیتروژن (NO2)، دی‌اکسیدکربن (CO2) و متان (CH4) هستند (Osabohien *et al*., 2019). اما با توجه به حجم بیشتر تجمع دی‌اکسیدکربن در اتمسفر، این گاز یکی از کلیدی‌ترین گازها در پدیده گرمایش جهانی کره زمین مطرح گردیده است که با توجه به افزایش احتراق سوخت‌های فسیلی و جنگل‌زدایی مقدار آن در جو رو به افزایش است (Srivastava *et al*., 2012). پالایش کربن با روش‌های مصنوعی مثل فیلتر، هزینه‌های سنگینی دربر دارد (Cannell *et al*., 2003)، بنابراین به‌منظور کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفری و ایجاد تعادل در محتوای گازهای گلخانه‌ای، کربن اتمسفر باید جذب و در شکل‌های متعدد ترسیب شود (Hojjati *et al al*., 2020; Naderi *et al*., 2021). ترسیب کربن در زی‌توده گیاهی و خاک-هایی که تحت این زی‌توده هستند، ساده‌ترین و از نظر اقتصادی عملی‌ترین راهکار ممکن به‌منظور کاهش دی‌اکسیدکربن اتمسفری است (Naghipour Borj *et al*., 2008; Hojjati *et al*., 2020; Hojjati *et al*., 2023). در این میان، جنگل‌ها که از جمله مهم‌ترین اکوسیستم‌های خشکی نیز به‌حساب می‌آیند، نقش مهمی در چرخه گاز دی‌اکسیدکربن ایفا می‌کنند و یکی از مهم‌ترین محل ذخیره کربن و ترسیب کربن می‌باشند (Alazmani *et al*., 2021; Hojjati *et al*., 2022) توانایی بالایی در جلوگیری از انتشار، جذب و ترسیب کربن اتمسفری دارند (Varamesh *et al*., 2011; 2013). امروزه جنگلداری شهری یکی از روش‌های نوین توسعه فضای سبز با اهداف مختلف است که هدف اصلی آن، اهمیت دادن به تأثیر فضای سبز و به‌خصوص درختان در ساختار پیچیده و ابعاد کلان‌شهرها است. جنگل‌های شهری ظرفیت بالایی در جذب دی‌اکسیدکربن اتمسفری دارند و خدمات محیط زیستی بسیاری را در مناطق شهری ایجاد می‌کنند. در نتیجه، فضای سبز شهری می‌تواند به‌عنوان یک مخزن کربن عمل کرده و تأثیر زیادی در نگهداری کربن ایفا نماید. جنگل‌های شهری، اکوسیستم‌های مشخص درختی و پوشش گیاهی موجود در اجتماع مردم هستند (Nowak, *et al*., 2001; Varamesh *et al*., 2011) و شامل درختان موجود در طول خیابان‌ها، بزرگراه‌ها، داخل پارک‌ها، حیاط خانه‌های مسکونی و جنگل‌کاری‌های اطراف مراکز پرجمعیت هستند (Nowak, 2001). از سوی دیگر اندازه‌گیری تأثیر جنگل‌های شهری بر ترسیب کربن، یک پیش شرط مهم برای مدیریت بهتر می‌باشد. از آنجایی‌که درختان مهمترین مؤلفه جنگل‌های شهری هستند، بنابراین کسب اطلاعات درست و دقیق از نقش بسیار مهم درختان شهری در ترسیب کربن اتمسفر لازم و ضروری است.

با توجه به اهمیت موضوع مطالعاتی در این راستا انجام شده است. Varamesh و همکاران در سال (۲۰۱۳) با بررسی تأثیر جنگلکاری با گونه‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ بر ترسیب کربن خاک پارک جنگلی چیتگر گزارش دادند که میزان ترسیب کربن خاک در اثر درخت‌کاری افزایش پیدا می‌کند. Panahi همکاران در سال (۲۰۱۱) با برآورد زی‌توده و ذخیره کربن برگ گونه بنه در باغ گیاهشناسی ملی ایران، به اهمیت و نقش جنگلکاری در افزایش ترسیب کربن اشاره کردند. Heidarian و Ghasemi Aghbash در سال (۲۰۲۰) به بررسی ترسیب کربن پوشش درختی و خاک در دو پارک شهری کوهدشت پرداختند. نتایج نشان داد مقدار ترسیب کربن خاک در اعماق ۰ تا ۵۱ و ۵۱ تا ۱۰۰ سانتیمتری در پارک شقایق و منطقه شاهد آن به‌ترتیب ۱۰۶/۷، ۲۵۱/۶۵، ۲۳/۵۲ و ۴۵/۴۸ تن در هکتار از پارک شهید بهشتی و منطقه شاهد آن به‌ترتیب ۱۱/۹۳، ۲۰/۸۳، ۲۳/۰۵ و ۵۳/۱۳ تن در هکتار به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. Mahmoudi و همکاران در سال (۲۰۲۱) در پژوهش خود به بررسی ذخیره کربن خاک در پارک جنگلی لویزان تهران پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار کربن ذخیره شده به‌ترتیب مربوط به تیپ‌های کاج تهران و ون است. پژوهش Ariluoma و همکاران در سال (۲۰۲۱) در شهر هلسینکی نشان داد که ترکیب بیوچار در خاک و کاشت درختان می‌تواند به‌طور قابل توجهی ظرفیت جذب و ذخیره‌سازی کربن را افزایش دهد. در این مطالعه، مشخص شد که فضاهای سبز مسکونی می‌توانند تا ۵۲۰ کیلوگرم CO_2 به‌ازای هر ساکن طی ۵۰ سال ذخیره کنند و در سطح شهری منجر به ذخیره‌سازی ۳۳۰،۰۰۰ تن CO_2 در همین بازه زمانی شوند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که برنامه‌ریزی شهری می‌تواند از طریق ترویج استفاده از بیوچار و کاشت درختان به کاهش تغییرات اقلیمی کمک کند. تحقیق Moreno و همکاران در سال (۲۰۲۴) در شهر لیما پرو نشان داد که درختان تحت

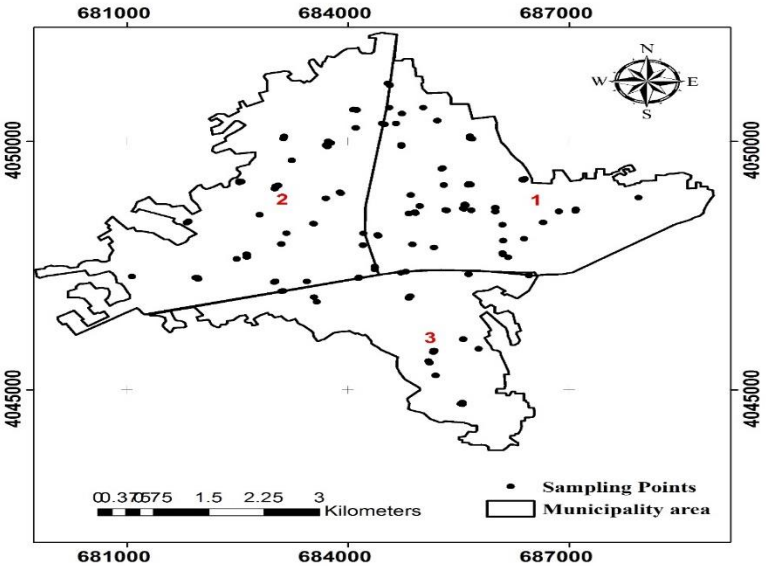
مدیریت عمومی به‌طور قابل توجهی به کاهش آلاینده‌ها و جذب CO_2 کمک می‌کنند. این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار i-Tree نشان داد که درختان شهری لیما قادر به جذب و ذخیره‌سازی CO2 به‌میزان نزدیک به ۵۰ درصد از سطوح ذخیره‌سازی جنگل‌های معتدل بومی در آمریکای لاتین هستند. همچنین تفاوت‌های قابل توجهی بین گونه‌های مختلف درختان از نظر کاهش آلاینده‌ها مشاهده شد، به‌طوری که گونه‌های *Ficus pertusa* و *Eucalyptus camaldulensis* بیشترین تأثیر را داشتند.

بر اساس اطلاعات موجود تاکنون پژوهشی در ارتباط با برآورد مقدار ذخیره کربن جنگل شهری در شهرستان ساری، مرکز استان مازندران انجام نشده است. آگاهی از ساختار و عملکرد جنگل‌های شهری به‌منظور افزایش مزایا و کاهش هزینه‌های مدیریت وابسته به درختان شهری لازم و ضروری است. همچنین با توجه به اهمیت ذخیره کربن آلی در کاهش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی، به‌ویژه در شهرهای بزرگ، اندازه‌گیری ترسیب کربن در مناطق مختلف کشور داده‌های ارزشمندی را در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان منابع طبیعی، محیطی زیست، جنگلداری شهری و همچنین سازمان پارک‌ها و فضای سبز قرار خواهد داد.

مواد و روش‌ها

با استفاده از نمونه‌برداری انتخابی تعداد ۱۵۰ قطعه نمونه در مناطق سه‌گانه سطح شهر ساری (۵۰ قطعه نمونه در هر منطقه) برداشت شد و تلاش گردید که این قطعات نمونه در کل مناطق سه‌گانه دارای پراکنش مناسبی باشند. نمونه‌برداری از بلوارهای شهر با استفاده از روش خطی و در میادین شهر با کمک روش پیاده کردن قطعه نمونه دایره‌ای انجام شد.

ابتدا اطلاعات مربوط به ویژگی‌های عمومی هریک از قطعات نمونه شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت اندازه‌گیری و یادداشت شد. در هر قطعه نمونه، نوع گونه، قطر برابر سینه و ارتفاع تمام درختان اندازه‌گیری شد. مرکز هر قطعه نمونه و درخت اندازه‌گیری شده با دستگاه GPS ثبت و به محیط نرم‌افزار GIS انتقال داده شد.



شکل ۱- مرکز قطعات نمونه مورد مطالعه در شهر ساری

Figure 1- The center of the sample pieces studied in Sari city

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور برآورد زی‌توده تنه درختان از رابطه ۲ استفاده شد (Vahedi and Mattagi 2014). در این رابطه dbh قطر در ارتفاع برابر سینه، h_t ارتفاع تنه، f ضریب شکل تنه و p چگالی چوب است. جهت برآورد ذخیره کربن تنه از رابطه ۳ استفاده شد. در بیشتر تحقیقات و مطالعات مربوط به ضریب شکل درختان در رابطه با جنگل‌های طبیعی شمال ایران و یا خارج از آن ضریب شکل را به‌طور میانگین ۰/۵ درنظر می‌گیرند (Namiranian, 2007). در نهایت پس از محاسبه زی‌توده، مقدار ترسیب کربن با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$Biomass = \frac{\pi}{4} dbh^2 \times h_t \times f \times \rho \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$C_t = Biomass \times 0.47 \quad \text{رابطه (۳)}$$

پس از محاسبه ترسیب کربن درختان، مقایسه میانگین‌ها بین سه منطقه با استفاده از آنالیز واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) و رابطه قطر و ترسیب کربن با استفاده از رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه درون گروهی با استفاده از آزمون دانکن بررسی شد. سپس نقشه پهنه‌بندی ترسیب کربن در کل مناطق شهر ساری با استفاده از روش کریجینگ معمولی و در نرم‌افزار GS+ تهیه شد. به‌طور کلی این روش شامل دو بخش اصلی واریوگرافی و کریجینگ است. واریوگرافی اولین قدم برای مدل‌سازی ساختار مکانی به‌منظور استفاده در کریجینگ است. از بین مدل‌های موجود به‌منظور برازش واریوگرام (شامل خطی، کروی، نمایی و گوسی) متداول‌ترین مدلی که بیشترین کاربرد را در پژوهش‌های زیست‌محیطی دارد، مدل کروی و نمایی است (Oliver & Webster, 2015).

نتایج

مشخصات کمی درختان در شهر ساری

نتایج مشخصات کمی درختان به تفکیک مناطق سه‌گانه شهر ساری در جدول ۱ نشان داد که هیچ کدام از مشخصات کمی مورد مطالعه بین سه منطقه اختلاف معنی‌داری ندارد.

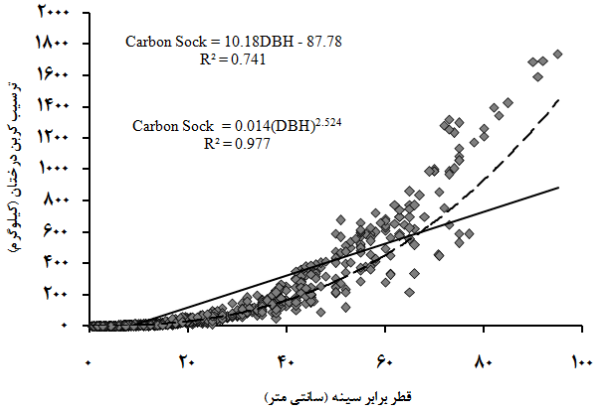
جدول ۱- مشخصات کمی درختان در مناطق سه‌گانه شهر ساری

Table1- Quantitative characteristics of trees in three areas of Sari city

	منطقه Area	میانگین ± انحراف معیار Mean ± standard deviation
تراکم درختان (اصله در هکتار) Density (tree per hectare)	1	738.28 ± 180.69a
	2	506.91 ± 140.47a
	3	565.39 ± 172.32a
ارتفاع (متر) Height (m)	1	5.54 ± 0.35a
	2	6.02 ± 0.53a
	3	5.04 ± 0.42a
قطر برابر سینه (سانتی‌متر) DBH (cm)	1	16.61 ± 1.36a
	2	15.76 ± 1.77a
	3	15.65 ± 2.04a
سطح مقطع (متر مربع در هکتار) Basal area (m^2/ha)	1	35.242 ± 14.746a
	2	13.299 ± 3.140a
	3	10.894 ± 2.664a
حجم (متر مکعب در هکتار) Volume (m^3/ha)	1	237.783 ± 114.944a
	2	83.330 ± 23.909a
	3	53.771 ± 16.467a

حروف لاتین مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح خطای ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن است

Similar Latin letters indicate no significant difference at the 5% probability level according to Duncan's test.



شکل ۳- رابطه قطر برابرسینه درختان و ترسیب کربن

Figure 3- The relationship between tree diameter and carbon deposition

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس برآورد ترسیب کربن با استفاده از مدل‌های مورد بررسی

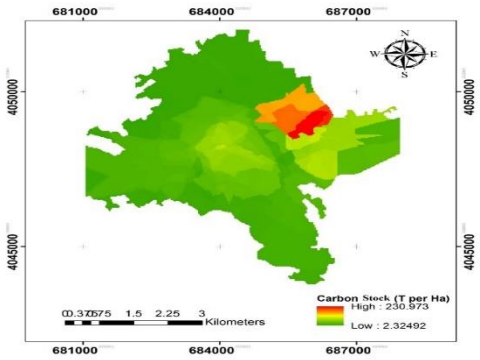
Table 3- Results of variance analysis of carbon sequestration estimation using the studied models

Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Linear	Regression	49350192.087	1	49350192.087	4504.787	0.000
	Residual	17166571.801	1567	10955.055		
	Total	66516763.888	1568			
Power	Regression	11961.724	1	11961.724	66450.715	0.000
	Residual	282.074	1567	.180		
	Total	12243.798	1568			

جدول ۴- نتایج ارزیابی مدل‌های مورد بررسی برای برآورد ترسیب کربن

Table 4- Evaluation results of the investigated models for estimating carbon sequestration

Model	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
Linear	0.742	0.742	104.66640
Power	0.977	0.977	0.424



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی ترسیب کربن در شهر ساری

Figure 4- Carbon sequestration zoning map in Sari city

بحث و نتیجه‌گیری

شهرنشینی یک روند جهانی برگشت‌ناپذیر است که بیش از نیمی از جمعیت جهان در شهرها ساکن هستند. با گسترش مناطق شهری، نیاز به محیط‌های شهری پایدار و تاب‌آور به‌طور فزاینده‌ای حیاتی می‌شود. جنگل‌های شهری نقشی محوری در این زمینه ایفا می‌کنند و طیف وسیعی از مزایای اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی را ارائه می‌دهند. آنها تنوع زیستی را افزایش می‌دهند، اثر جزیره گرمایی شهری را کاهش می‌دهند، کیفیت هوا را بهبود می‌بخشند و فضاهای زیبایی و تفریحی را فراهم می‌کنند. علاوه بر این، درختان شهری به‌طور قابل‌توجهی به ترسیب کربن کمک می‌کنند و آنها را به اجزای ضروری استراتژی‌های کاهش تغییرات آب و هوایی تبدیل می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که درختان شهری منجر به حذف کربن اتمسفری از طریق رشد و فتوسنتز می‌شوند و کربن اضافی به‌صورت زی‌توده در ریشه‌ها، ساقه، شاخ و برگ‌ها ذخیره می‌شوند (Strohbach *et al.*, 2012). به‌طور کلی، بسیاری از تحقیقات نشان داده‌اند که جنگلکاری قابلیت زیادی در ترسیب کربن خاک دارد. بر اساس مطالعه‌ای رشد درختان شهری نسبت به درختان جنگلی کمتر است زیرا بخش قابل‌توجهی از ریشه‌ها در زیر سنگفرش قرار دارد و در دریافت بارش باران جهت رشد ناتوان است (Quigley, 2004).

در این پژوهش مقدار بالای ترسیب کربن در شهر ساری مشاهده شد. می‌توان دلیل اصلی بالا بودن مقدار ترسیب کربن در شهر ساری را ناشی از این بیان کرد بیشتر درختان در فضای سبز شهر ساری را درختان چنار کنهسال تشکیل می‌دهد. دلیل بالا بودن میزان ترسیب کربن درخت چنار بالا بودن چگالی چوب آن نسبت به سایر درختان است (Heidarian & Ghasemi Aghbash, 2020). به‌طور کلی درختان جوان میزان و سرعت ترسیب کربن بیشتری نسبت به درختان مسن دارند اما درختان مسن نیز کربن را به میزان بیشتری و مدت زمان طولانی‌تری ترسیب می‌کنند (Stephenson *et al.*, 2014). درخت به‌عنوان جذب‌کننده دی‌اکسیدکربن از طریق فتوسنتز و تثبیت آن در بیوماس و خاک عمل می‌کند. برخی از محققین معتقدند که گونه‌های تندرشد در مراحل ابتدایی زندگی خود به‌علت رشد سریع خود مقدار بیشتری بیوماس و در نتیجه کربن ذخیره می‌کنند (Eslamdoust & Sohrabi, 2018). از طرف دیگر گونه‌های کندرشد به‌علت تراکم بالای چگالی چوبشان نسبت به گونه‌های تندرشد، در بلندمدت بیوماس و کربن بیشتری ذخیره می‌کنند (Vieira *et al.*, 2017).

مطالعات قبلی نیز بر نقش جنگل‌کاری و پوشش درختی در ترسیب کربن تأکید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، Varamesh و همکاران در سال (۲۰۱۳) نشان دادند که در پارک جنگلی چیتگر، ترسیب کربن خاک با جنگل‌کاری گونه‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. این یافته‌ها هم‌راستا با نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که توسعه و مدیریت صحیح پوشش درختی می‌تواند میزان ترسیب کربن را در مناطق شهری بهبود بخشد. در تحقیق دیگری، Heidarian و Ghasemi Aghbash در سال (۲۰۲۰) ترسیب کربن درختی و خاک را در دو پارک شهری در کوهدشت بررسی کردند و نشان دادند که پارک‌هایی با پوشش گیاهی متراکم‌تر، توانایی بیشتری در ترسیب کربن دارند. این یافته‌ها بر اهمیت حفاظت از پوشش درختی شهری و استفاده از گونه‌های مناسب برای افزایش ترسیب کربن تأکید دارند، که با نتایج این پژوهش در شهر ساری همخوانی دارد. در پژوهش Mahmoudi و همکاران در سال (۲۰۲۱)، ذخیره کربن در پارک جنگلی لویزان تهران بررسی شد و نتایج نشان داد که تیپ‌های درختی مختلف، تأثیرات متفاوتی بر ترسیب کربن دارند؛ بیشترین میزان ترسیب کربن مربوط به گونه کاج تهران بود. این نتایج بر اهمیت انتخاب گونه‌های مناسب در پروژه‌های جنگل‌کاری شهری تأکید دارند که می‌تواند به بهبود پتانسیل ترسیب کربن منجر شود.

بر اساس نتایج Nowak و Crane (۲۰۰۲) میزان ذخیره‌سازی کربن در شهر نیویورک ۱۵/۳ تن در هکتار که در پژوهش حاضر این میزان برای شهر ساری حدود ۱۳ تا ۶۰ تن در هکتار بود. Shayesteh و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای با عنوان سنجش پتانسیل ذخیره‌سازی کربن توسط درختان شهری در شهر همدان، میزان ترسیب کربن درختان را در مقیاس شهری برآورد کردند. نتایج نشان داد که میانگین کربن آلی ذخیره‌شده در درختان شهری در شهر همدان حدود ۱/۶ تن در هکتار است. درختانی که در

حاشیه خیابان‌ها و بر روی سطوح نفوذناپذیر مانند آسفالت یا سنگفرش رشد کرده بودند، به‌طور میانگین حدود ۸۸/۲۹ کیلوگرم کربن ذخیره داشتند، در حالی‌که درختان واقع در فضاهای سبز با خاک و پوشش علفی طبیعی‌تر، به‌طور معنی‌داری میزان بالاتری از کربن (به‌طور میانگین ۱۴۸/۸۰ کیلوگرم) را ترسیب کردند. دلیل این تفاوت با پژوهش حاضر می‌تواند تفاوت در درصد پوشش درختی منطقه مورد مطالعه باشد. بر اساس مطالعه Quigley (۲۰۰۴) رشد درختان شهری نسبت به درختان جنگلی کمتر است زیرا بخش قابل توجهی از ریشهها در زیر سنگفرش قرار دارد و در دریافت بارش باران جهت رشد ناتوان است. همچنین، بر اساس مطالعه Dahlhausen و همکاران (۲۰۱۶) زی‌توده درختان جنگلی ۲۰ درصد بیشتر از درختان شهری است و از اینرو مقدار کربن آلی نیز در درختان جنگلی به دلیل پوشش کف جنگلی بیشتر است.

پژوهش حاضر به یک جنبه حیاتی از جنگلداری شهری - پتانسیل ترسیب کربن درختان در شهر ساری می‌پردازد. ترسیب کربن، فرآیند جذب و ذخیره دی‌اکسیدکربن، یک مکانیسم کلیدی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش تغییرات آب و هوایی است (Gür, 2022). کسب نتایج در مورد اینکه درختان شهر ساری ظرفیت جذب ۲۰۰ تن کربن در هر هکتار را دارند، قابل‌توجه و امیدوارکننده است. اهمیت این یافته نه‌تنها در مقدار کربن جذب شده بلکه در پیامدهای محلی و جهانی آن نهفته است. نرخ ترسیب ۲۰۰ تن در هکتار منعکس کننده یک کاهش کربن قابل‌توجه در چشم‌انداز شهری است و نقش ارزشمندی را که درختان شهری در جبران انتشار کربن انسانی ایفا می‌کنند، نشان می‌دهد. این اطلاعات به‌ویژه با توجه به تشدید نگرانی‌ها در مورد تغییرات آب و هوا و نیاز فوری به راه‌حل‌های عملی مناسب است. علاوه بر این، کمی‌سازی ترسیب کربن توسط درختان شهری به‌عنوان پایه‌ای برای تصمیم‌گیری آگاهانه در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت زیست محیطی عمل می‌کند (Rossi *et al.*, 2022). به‌عنوان مثال، اطلاعات دقیق در مورد ظرفیت ترسیب کربن گونه‌های مختلف درختی می‌تواند به مدیران شهری کمک کند تا تصمیمات بهتری در زمینه انتخاب گونه‌های مناسب برای کاشت در فضاهای سبز و پارک‌ها بگیرند. این نوع تصمیم‌گیری می‌تواند به بهبود کیفیت هوا، کاهش اثر جزیره حرارتی، و ایجاد محیط‌های زیستی پایدارتر منجر شود.

قطر درخت، که یک ویژگی اساسی است، اغلب به‌عنوان نماینده‌ای برای سن درخت، سرعت رشد و زیست توده کلی عمل می‌کند که همه اینها عوامل محوری هستند که بر توانایی درخت برای جذب کربن تأثیر می‌گذارند (Coomes *et al.*, 2012). استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و توانی امکان بررسی دقیق این رابطه را فراهم می‌کند (Chave *et al.*, 2005). ضریب تبیین تقریباً ۰/۷ در مدل رگرسیون خطی نشان دهنده یک همبستگی مثبت نسبتاً قوی بین قطر درخت و ترسیب کربن است (Chicco *et al.*, 2021). ضریب ۰/۷ نشان می‌دهد که ۷۰ درصد از تغییرپذیری در ترسیب کربن را می‌توان با تغییر در قطر درخت توضیح داد. این یافته با این انتظار عمومی مطابقت دارد که درختان بزرگتر و بالغ‌تر به‌دلیل زیست توده بیشتر، کربن بیشتری را جذب می‌کنند (Nowak & Crane 2002; Mildrexler *et al.*, 2020). با این‌حال، ذکر این نکته ضروری است، اگرچه مدل‌های خطی بینش‌های ارزشمندی را ارائه می‌دهند، ممکن است روابط غیرخطی بالقوه‌ای را که می‌تواند در سیستم‌های اکولوژیکی وجود داشته باشد، نشان ندهند (Valizadeh *et al.*, 2023). پویایی ترسیب کربن پیچیده است و یک مدل خطی ممکن است پیچیدگی فرآیندهای اساسی را بیش از حد ساده کند (Asadi *et al.*, 2025). مدل توانی، با ضریب تبیین حدود ۰/۹، نشان دهنده همبستگی قوی‌تر بین قطر درخت و ترسیب کربن در مقایسه با مدل خطی است (Chicco *et al.*, 2022). این ضریب بالاتر نشان می‌دهد که مدل توان ماهیت غیرخطی رابطه را بهتر نشان می‌دهد. این یافته مهم است، زیرا اهمیت درنظر گرفتن مدل‌های غیرخطی در درک و پیش‌بینی دینامیک ترسیب کربن درختان شهری را برجسته می‌کند.

تحلیل فضایی نه‌تنها جامعیت یافته‌های پژوهش را افزایش می‌دهد، بلکه بینش‌های ارزشمندی را برای برنامه‌ریزی شهری و تخصیص منابع در مقیاس وسیع‌تر ارائه می‌دهد (Ramachandra *et al.*, 2012). استفاده از روش کریجینگ معمولی در درون‌یابی ترسیب کربن برای فضای سبز شهر یک رویکرد پیچیده است. کریجینگ به‌ویژه برای

درون‌یابی فضایی در مطالعات محیطی مناسب است، زیرا همبستگی مکانی و تغییرپذیری داده‌ها را درنظر می‌گیرد (Li & Heap, 2014). این روش یک نمایش پیوسته فضایی از پتانسیل ترسیب کربن را ارائه می‌کند، که به درک دقیق‌تر و دقیق‌تری از نحوه تغییر این خدمات زیست‌محیطی حیاتی در شهر اجازه می‌دهد. کریجینگ، به‌عنوان یک تکنیک درون‌یابی زمین آماری، بر فرض وابستگی مکانی و ایستایی آماری تکیه دارد. مناسب بودن دقت نشان می‌دهد که این روش به‌طور مؤثر الگوهای فضایی و تغییرات در ترسیب کربن را به تصویر می‌کشد و تخمین‌های قابل اعتمادی را برای مناطقی با اندازه‌گیری‌های محدود یا بدون اندازه‌گیری مستقیم ارائه می‌دهد (Oliver & Webster, 1990). Ma و همکاران در سال (۲۰۲۱) با استفاده روش کریجینگ به بررسی ذخیره و ترسیب کربن در جنگل‌های شهری پکن پرداختند. آن‌ها داده‌های میدانی را از ۹۸۱ نمونه‌برداری جمع‌آوری کردند و نتایج نشان داد که الگوهای ذخیره و ترسیب کربن در جنگل‌های شهری دارای تنوع فضایی قابل توجهی هستند. یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2023) در مطالعه‌ای بر روی خدمات اکوسیستم جنگل شهری در شهر ژنگژو، از روش کریجینگ برای کمی‌سازی و نقشه‌برداری این خدمات استفاده کردند.

نتایج نشان داد که ذخیره کربن کل در جنگل شهری ژنگژو ۷۵/۷ تن و ترسیب کربن سالانه ۱۴/۶۶ تن است. همچنین، جنگل‌ها و درختچه‌ها سالانه ۳۰۷/۸۶ مترمکعب آب سطحی را مدیریت و ۴۱۱/۸ کیلوگرم آلودگی هوا را حذف می‌کنند. توزیع فضایی خدمات اکوسیستم در این مطالعه تنوع قابل‌توجهی داشت و ارزیابی فضایی با دقت بالاتری نسبت به ارزیابی‌های سنتی انجام شد. نتایج پژوهش حاضر پیامدهای عملی برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت جنگل دارد. شناخت رابطه غیرخطی بین قطر درخت و ترسیب کربن می‌تواند راهبردهایی را برای به حداکثر رساندن مزایای ترسیب کربن ارائه دهد. اولویت دادن به حفظ و رشد درختان بزرگتر و مسن‌تر در محیط‌های شهری ممکن است نتایج قابل‌توجهی برای ترسیب کربن به‌همراه داشته باشد. دقت مناسب کریجینگ به نمایش فضایی ترسیب کربن اعتبار می‌افزاید و ارتباط یافته‌ها را برای برنامه‌ریزان شهری، سیاست‌گذاران و محققانی که در ایجاد شهرهای پایدار و مقاوم در برابر کربن سرمایه‌گذاری کرده‌اند، تقویت می‌کند. در عین حال بررسی پویایی زمانی ترسیب کربن، ترکیب سایر متغیرهای محیطی یا اصلاح تفکیک مکانی تجزیه و تحلیل می‌تواند دقت تخمین ترسیب کربن را بیشتر افزایش دهد. بنابراین کسب اطلاعات بیشتر در این راستا لازم و ضروری می‌باشد.

منابع

Alazmani, M., Hojjati, S.M., Waez-Mousavi, S.M. & Tafazoli, M. 2021. Effect of alder plantation age on soil carbon sequestration. *Forest Research and Development*, 7(2): 279-291. [In Persian]

Ariluoma, M., Ottelin, J., Hautamäki, R., Tuhkanen, E.M. & Mänttäri, M. 2021. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57: 126939. ttps://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126939

Asadi, H., Jalilvand, H., Tafazoli, M. & Hosseini, S. F. 2025. Modeling suitable habitats of *Parrotia persica* (DC.) CA Mey. in the Hyrcanian Forests using environmental factors. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 33(1), 50-68. [In Persian]

Cannell, M.G. 2003. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy*, 24(2): 97-116. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00103-4

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T. & Lescure, J.P. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1): 87-99. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x

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

Coomes, D.A., Holdaway, R.J., Kobe, R.K., Lines, E.R. & Allen, R.B. 2012. A general integrative framework for modelling woody biomass production and carbon sequestration rates in forests. *Journal of Ecology*, 100(1): 42-64. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01920.x

Dahlhausen, J., Biber, P., Rötzer, T., Uhl, E. & Pretzsch, H., 2016. Tree species and their space requirements in six urban environments worldwide. *Forests*, 7(6), p.111. https://doi.org/10.3390/f7060111

Eslamdoust, J. & Sohrabi, H. 2018. Carbon storage in biomass, litter, and soil of different native and introduced fast-growing tree plantations in the South Caspian Sea. *Journal of Forestry Research*, 29(2): 449-457. https://doi.org/10.1007/s11676-017-0469-5

Gür, T. M. 2022. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: Review of materials, processes and technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 89, 100965 https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100965

Heidarian, Sh. & Ghasemi Aghbash, F. 2020. Study of Carbon sequestration in trees and soil in two urban parks of Kohdasht City. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(1): 215-225. [In Persian]

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

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

Li, J. & Heap, A.D. 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53: 173-189. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008

Ma, J., Li, X., Baoquan, J., Liu, X., Li, T., Zhang, W. & Liu, W. 2021. Spatial variation analysis of urban forest vegetation carbon storage and sequestration in built-up areas of Beijing based on i-Tree Eco and Kriging. *Urban Forestry & Urban Greening*, 66: 127413. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127413

Mahmoudi, M., Ramezani Kakroudi, E., Banj Shafiei, A., Salehi, A., Pato, M. & Hoseinzadeh, O. 2021. The study of soil carbon storage in Lavizan Forest Park, *Tehran. Forest Research and Development*, 7(2): 327-342. [In Persian]

Mildrexler, D.J., Berner, L.T., Law, B.E., Birdsey, R.A. and Moomaw, W.R. 2020. Large trees dominate carbon storage in forests east of the cascade crest in the United States Pacific Northwest. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3: 594274. https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.594274

Moreno, R., Nery, A., Zamora, R., Lora, Á. & Galán, C. 2024. Contribution of urban trees to carbon sequestration and reduction of air pollutants in Lima, Peru. *Ecosystem Services*, 67: 101618. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101618

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

Naghipour Borj, A.A., Haidarian Aghakhani, M., Dianati, G.A & Tavakoli, H. 2008. Role of Iran's gangelands in gbsorption of greenhouse gasses. *In Abstracts* (pp. 219-220). [In Persian]

Namiranian, M. 2007. Measurement of tree and forest biometry. Tehran University Publications, 574p. [In Persian]

Nowak, D.J. 2001. Sustaining America's urban trees and forests (No. 62). United States Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.

Nowak, D.J. & Crane, D.E. 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution*, 116(3): 381-389. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7

Oliver, M.A. & Webster, R. 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International *Journal of Geographical Information System*, 4(3): 313-332. https://doi.org/10.1080/02693799008941549

Osabohien, R., Matthew, O.A., Aderounmu, B. & Olawande, T. 2019. Greenhouse gas emissions and crop production in West Africa: Examining the mitigating potential of social protection. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(1): 57-66.

Panahi, P., Pourhashemi, M. & Hassani Nejad, M. 2011. Estimation of leaf biomass and leaf carbon sequestration of *Pistacia atlantica* in National Botanical Garden of Iran. *Iranian Journal of Forest*, 3(1): 1-12. [In Persian]

Quigley, M.F. 2004. Street trees and rural conspecifics: Will long-lived trees reach full size in urban conditions? *Urban Ecosystems*, 7(1): 29-39.
https://doi.org/10.1023/B:UECO.0000020170.58404.e9

Ramachandra, T.V., Aithal, B.H. & Sanna, D.D. 2012. Insights to urban dynamics through landscape spatial pattern analysis. International *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 329-343. https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.005

Rossi, L., Menconi, M.E., Grohmann, D., Brunori, A. & Nowak, D.J. 2022. Urban planning insights from tree inventories and their regulating ecosystem services assessment. *Sustainability*, 14(3): 1684. https://doi.org/10.3390/su14031684

Shayesteh, K., Gharibi, S. & Feizi, F., 2021. Potential Evaluation of Carbon Storage by Urban Trees (Case Study: Hamadan). *Environment and Interdisciplinary Development*, 6(74): 23-34.

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

Stephenson, N.L., Das, A.J., Condit, R., Russo, S.E., Baker, P.J., Beckman, N.G. & Zavala, M.A. 2014. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, 507(7490): 90-93. https://doi.org/10.1038/nature12914

Strohbach, M.W., Arnold, E. & Haase, D. 2012. The carbon footprint of urban green space-A life cycle approach. Landscape and Urban Planning, 104(2): 220-229. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.013

Tafazoli, M., Hojjati, S.M., Jalilvand, H., Lamersdorf, N. & Tafazoli, M. 2021. Effect of nitrogen addition on soil CO 2 efflux and fine root biomass in maple monocultures of the Hyrcanian region. *Annals of Forest Science*, 78(2): 29. https://doi.org/10.1007/s13595-021-01050-7

Vahedi, A.A. & Mattagi, A. 2014. Amount of carbon sequestration distribution associated with oak tree's (*Quercus castaneifolia* CA May) bole in relation to physiographical units of Hyrcanian natural forests of Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(4):716-728.

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

Varamesh, S., Hoseini, S.M. & Abdi, N. 2011. Estimating potential of urban forests for atmospheric carbon sequestration. *Journal of Environmental Studies*, 37(57): 113-120.

Varamesh, S., Hosseini, S.M. & Sefidi, K. 2013. Evaluation of the amount of carbon sequestration in biomass, litter and soil of acacia and silver cedar stands around Tehran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4): 396-404.

Vieira, S., Trumbore, S., Camargo, P.B., Selhorst, D., Chambers, J.Q., Higuchi, N. & Martinelli, L.A. 2017. Slow growth rates of Amazonian trees: consequences for carbon cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(51): 18502-18507. https://doi.org/10.1073/pnas.0505966102

Yang, Y., Ma, J., Liu, H., Song, L., Cao, W. & Ren, Y. 2023. Spatial Heterogeneity analysis of urban forest ecosystem services in Zhengzhou City. *Plos One*, 18(6): e0286800. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286800