19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

نقش خاک جنگل‌های زاگرس در چرخه کربن و تأثیر آن بر پایداری اکوسیستم های جنگلی

مجید پاتو[1*]، عزیز مجیدی[2] ، جلال هناره[1]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. (m.pato@areeo.ac.ir)

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

۲- دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات آب و خاک . مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی. ، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.

چکیده

جنگل‌های زاگرس در یازده استان غربی و جنوب‌غربی ایران، شامل آذربایجان غربی، کردستان، کرمانشاه، ایلام، لرستان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، خوزستان، همدان، مرکزی و فارس، قرار دارند و نقش مهمی در چرخه کربن و پایداری زیست‌بوم‌های جنگلی ایفا می‌کنند. خاک این جنگل‌ها، به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص خود، ظرفیت بالایی برای ذخیره‌سازی کربن آلی دارد.این پژوهش با هدف بررسی نقش خاک جنگل‌های زاگرس در ترسیب کربن و تأثیر آن بر پایداری اکوسیستم انجام شد. نمونه‌برداری خاک از ۱۰۰ نقطه و در دو عمق ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری صورت گرفت. نتایج نشان داد که میانگین کربن آلی خاک در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری بین ۲,۵ تا ۳,۵ درصد است. همچنین، آزمون تی جفتی مشخص کرد که میانگین کربن آلی خاک در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری (۳,۰۱ درصد) به‌طور معناداری بالاتر از عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری (۱,۶۶ درصد) است.

بر اساس یافته‌ها، استان‌های آذربایجان غربی، ایلام و لرستان بیشترین میزان کربن آلی را دارا هستند. در این میان، تغییر کاربری اراضی و وقوع آتش‌سوزی‌ها از مهم‌ترین تهدیدات برای این کارکرد زیست‌محیطی به شمار می‌روند .مدیریت پایدار خاک می‌تواند نقش مؤثری در حفظ تنوع زیستی و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی داشته باشد. همچنین، خاک‌های دارای بافت رسی-سیلتی و پوشش گیاهی متراکم، توانایی بیشتری در ذخیره‌سازی کربن دارند.

واژگان کلیدی: چرخه کربن، خاک جنگلی، زاگرس، پایداری زیست‌بوم، ترسیب کربن

مقدمه

جنگل‌های زاگرس با وسعتی حدود شش میلیون هکتار، یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران به شمار می‌آیند که در یازده استان غربی و جنوب‌غربی کشور از جمله آذربایجان غربی، کردستان، کرمانشاه، ایلام، لرستان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، خوزستان، همدان، مرکزی و بخشی از فارس پراکنده‌اند .این جنگل‌ها به دلیل تنوع زیستی بالا و نقش مؤثرشان در ذخیره‌سازی کربن، کاهش گازهای گلخانه‌ای و پایداری زیست‌محیطی، اهمیت ویژه‌ای دارند.

خاک جنگل‌های زاگرس، به واسطه بافت رسی-سیلتی و غنای مواد آلی، به عنوان مخزن اصلی کربن آلی عمل می‌کند و بخش قابل توجهی از کربن ذخیره‌شده در اکوسیستم‌های خشکی را در خود جای داده است .(Jobbágy & Jackson, 2000) چرخه کربن در این جنگل‌ها تحت تأثیر عواملی همچون نوع و تراکم پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک، اقلیم و کاربری اراضی قرار دارد .(Pan et al., 2011)ورود بقایای گیاهی به خاک و تجزیه آن توسط میکروارگانیسم‌ها، موجب افزایش کربن آلی خاک و بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود؛ فرآیندی که نه‌تنها به پایداری زیست‌بوم کمک می‌کند، بلکه نقش مهمی در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم ایفا می‌نماید.(IPCC, 2022)

با این حال، فشارهای انسانی مانند جنگل‌زدایی، تغییر کاربری اراضی، آتش‌سوزی‌ها و چرای بی‌رویه، ظرفیت ذخیره‌سازی کربن این جنگل‌ها را به شدت تهدید می‌کند و موجب کاهش چشمگیر کربن آلی خاک و تضعیف عملکرد اکولوژیک این مناطق شده است .(Pan et al., 2011; FAO, 2018) پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که مناطق بکر با پوشش گیاهی متراکم، بالاترین میزان ترسیب کربن را دارند و هرگونه تخریب پوشش گیاهی، کاهش محسوس ذخیره کربن را در پی دارد (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۹). بر اساس مطالعات جهانی، خاک جنگل‌ها به طور متوسط دو تا سه برابر پوشش گیاهی، کربن ذخیره می‌کند و این ظرفیت در مناطق نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای مانند زاگرس، از اهمیت بیشتری برخوردار است .(Lal, 2004; Pan et al., 2011) بنابراین، شناخت دقیق نقش و کارکرد خاک جنگل‌های زاگرس در چرخه کربن، برای تدوین راهبردهای مدیریت پایدار و مقابله با تغییرات اقلیمی، ضروری است.

این پژوهش با هدف بررسی علمی نقش خاک جنگل‌های زاگرس در ترسیب کربن و تأثیر آن بر پایداری اکوسیستم‌های جنگلی انجام شده و تلاش دارد با استناد به داده‌های میدانی و مطالعات بین‌المللی، راهکارهای مؤثری برای حفاظت و احیای این اکوسیستم ارزشمند ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مناطق مختلف جنگل‌های زاگرس در یازده استان انجام شد. نمونه‌برداری از خاک به‌صورت تصادفی-سیستماتیک از ۱۰۰ نقطه و در دو عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری انجام شد. ویژگی های خاک شامل درصد کربنی (با روش احتراق)، بافت خاک (روش هیدروتریم)، pH(روش پتانسیومتری)، محل نگهداری آب و جرم مخصوص ظاهری اندازه گیری شدند. همچنین داده‌های زیست‌محیطی مانند تراکم پوشش گیاهی، میزان بارندگی و عوامل فیزیوگرافی ارتفاع و شیب نیز ثبت شد. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و آزمون‌های آماری ANOVA و آزمون T انجام شد. برای ارزیابی و مقایسه نتایج، از مطالعات پیشین در مناطق زاگرس استفاده شده است.

نتایج و بحث

۱. نتایج

نتایج نشان داد که میانگین کربن آلی خاک در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری در استان‌های مختلف زاگرس بین ۲,۵ تا ۳,۵ درصد متغیر است. خاک‌های مناطق بکر با پوشش گیاهی متراکم (مانند جنگل‌های بلوط در ایلام و آذربایجان غربی) بالاترین میزان کربن آلی را نشان دادند. جدول ۱ میانگین کربن آلی خاک در برخی استان‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱-میانگین کربن آلی خاک در استان‌های زاگرس

استان	تراکم پوشش گیاهی (تقریبی)	کربن آلی (٪، ۰-۳۰ سانتی‌متر)	کربن آلی (٪، ۳۰-۶۰ سانتی‌متر)
آذربایجان غربی	۸۰٪	۳,۵	2.0
ایسلام	۷۵٪	۳,۴	1.8
کردستان	۷۰٪	۳,۲	1.9
لرستان	۶۵٪	۳,۳	1.8
کهگیلویه و بویراحمد	۶۰٪	۳,۱	1.6
چهارمحال و بختیاری	۵۵٪	۳,۰	1.7
کرم	۵۰٪	۳,۰	1.5
خوزستان	۴۰٪	۲,۸	1.6
همدان	۳۵٪	۲,۷	1.5
مرکزی	۳۰٪	۲,۶	1.4
فارس	۲۵٪	۲,۵	1.4

جدول ۲-برابط بین پوشش گیاهی ومیزان کربن آلی خاک هر استان

استان	میانگین کربن آلی خاک (٪) در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر	تراکم پوشش گیاهی (تقریبی)	سطح معنی‌داری رابطه (p-value)	شاخص پوشش گیاهی مرتبط (مثلاً TVI, SAVI, OSAVI)
آذربایجان غربی	3.5	بالا(>75%)	$p < 0.01$	TVI(بالاترین همبستگی)
ایلام	3.4	بالا(>70%)	$p < 0.01$	TVI
کردستان	3.2	متوسط-بالا(65-70%)	$p < 0.05$	SAVI, OSAVI
لرستان	3.3	متوسط-بالا(65-70%)	$p < 0.05$	SAVI, OSAVI
کهگیلویه و بویراحمد	3.1	متوسط(60%)	$p < 0.05$	SAVI
چهارمحال و بختیاری	3.0	متوسط(55%)	$p < 0.05$	OSAVI
خوزستان	2.8	پایین(40-50%)	$p < 0.05$	SAVI
همدان	2.7	پایین(35-40%)	$p < 0.05$	OSAVI
مرکزی	2.6	پایین(30-35%)	$p < 0.05$	OSAVI

OSAVI	$p < 0.05$	پایین(<30%)	2.5	فارس

- شاخص‌های پوشش گیاهی مانند(Soil Adjusted Vegetation ، TVI (Triangular Vegetation Index SAVI (Index و OSAVI (Optimized SAVI) با کربن آلی خاک همبستگی معنی‌داری دارند که در مطالعات ماهواره‌ای و میدانی منطقه زاگرس تأیید شده است
- رابطه بین تراکم پوشش گیاهی و کربن آلی خاک در سطح اطمینان ۹۵ تا 99 درصد معنی‌دار است ($p<0.05$) و ($p<0.01$)

کاهش تراکم پوشش گیاهی به دلیل تغییر کاربری و آتش‌سوزی‌ها، باعث کاهش معنی‌دار کربن آلی خاک شده است.جدول(۳) براساس داده‌های پژوهشی و نتایج مشابه در مطالعات خاک در منطقه زاگرس تنظیم شده است.

جدول۳ – مقایسه میزان میانگین کربن آلی در مناطق جنگلی وغیر جنگل هر استان زاگرس

استان	میانگین کربن آلی با پوشش جنگلی (%)	میانگین کربن آلی بدون پوشش جنگلی (%)	اختلاف میانگین (%)	مقدار t	درجه آزادی (df)	سطح معنی‌داری (p-value)	نتیجه آزمون (معنی‌دار/نامعنی)
آذربایجان غربی	3.5	2.4	1.1	4.85	15	0.0002	معنی‌دار
ایلام	3.4	2.3	1.1	4.60	14	0.0003	معنی‌دار
کردستان	3.2	2.1	1.1	4.20	13	0.0008	معنی‌دار
لرستان	3.3	2.2	1.1	4.35	14	0.0005	معنی‌دار
کهگیلویه و بویراحمد	3.1	2.0	1.1	4.10	12	0.0010	معنی‌دار
خوزستان	2.8	1.6	1.2	4.75	13	0.0004	معنی‌دار
همدان	2.7	1.5	1.2	4.50	12	0.0006	معنی‌دار

- آزمون T جفت برای مقایسه میانگین کربن آلی خاک در نمونه‌های جفت شده (مثلاً خاک با پوشش گیاهی و خاک بدون پوشش گیاهی در همان منطقه) استفاده شده است.
- در همه استان‌های ، تفاوت میانگین کربن آلی خاک در مناطق دارای پوشش گیاهی نسبت به مناطق بدون پوشش، از نظر آماری معنی‌دار است.($p < 0.05$)

این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت پوشش گیاهی بر افزایش کربن آلی خاک است که با مطالعات مشابه در زاگرس و دیگر مناطق همخوانی دارد.

رابطه معنی‌داری بین تراکم پوشش گیاهی و کربن آلی خاک مشاهده شد ($p<۰,۵$). تغییر کاربری اراضی به کشاورزی در برخی مناطق (مانند خوزستان و همدان) باعث کاهش ۳۰-۵۰٪ کربن آلی خاک شد. آتش‌سوزی‌ها نیز در مناطقی مانند خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد به کاهش ماده آلی و اختلال در چرخه کربن منجر شدند.

۲. بحث

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد خاک جنگل‌های زاگرس، به‌ویژه در مناطق بکر با پوشش گیاهی متراکم، ظرفیت بالایی برای ترسیب و ذخیره‌سازی کربن آلی دارد. این یافته با مطالعات ملی و بین‌المللی همخوانی دارد که تأکید می‌کنند خاک جنگل‌ها به‌طور میانگین دو تا سه برابر پوشش گیاهی کربن ذخیره می‌کند .(Lal, 2004; Pan et al., 2011) در این پژوهش، میانگین کربن آلی خاک در عمق ۰–۳۰ سانتی‌متر بین ۲,۵ تا ۳,۵ درصد گزارش شده که مشابه نتایج رحیمی و همکاران (۱۳۹۹) و (پاتو و همکاران ۱۳۹۵) در مناطق مشابه زاگرس است.

مطالعات جهانی نشان داده‌اند که تراکم و سلامت پوشش گیاهی نقش اساسی در افزایش ترسیب کربن خاک دارند؛ به‌طوری که ورود بقایای گیاهی از طریق ریزش برگ‌ها و ریشه‌ها، موجب افزایش مواد آلی و بهبود کیفیت خاک می‌شود (Jobbágy & Jackson, 2000; Lal, 2005). در این مطالعه نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین شاخص‌های پوشش گیاهی(مانند SAVI وOSAVI) و میزان کربن آلی خاک مشاهده شد که با یافته‌های Pan و همکاران (۲۰۱۱) در جنگل‌های جهان مطابقت دارد.

با این حال، تغییر کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل جنگل به کشاورزی و مرتع، و همچنین وقوع آتش‌سوزی‌ها، کاهش چشمگیر کربن آلی خاک را به دنبال داشته است. این یافته با نتایج پژوهش‌های FAO (2018) و IPCC (2022) سازگار است که تأکید دارند تخریب جنگل‌ها و تغییر کاربری، ذخیره کربن خاک را به شدت کاهش داده و موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. همچنین، خاک‌های با بافت رسی-سیلتی و درصد نیتروژن بالاتر، توانایی بیشتری در نگهداری کربن دارند (Lal, 2004).مطالعات منطقه‌ای مانند یوسف عسکری و همکاران (۱۳۹۸)نشان داده‌اند که جنگل‌های طبیعی بلوط در ایلام و آذربایجان غربی به ترتیب ۵۶,۷۲ و ۹۰,۹۶ تن کربن در هکتار ذخیره می‌کنند، در حالی که توده‌های تخریب‌شده تا ۰,۹۷ درصد کربن آلی کمتری دارند. عوامل تهدیدکننده مانند چرای بی‌رویه، آتش‌سوزی و برداشت بی‌رویه پوشش گیاهی، ورود مواد آلی به خاک را محدود و فعالیت میکروبی را کاهش می‌دهند که در نهایت منجر به افت کیفیت خاک و کاهش ترسیب کربن می‌شود (Pan et al., 2011; FAO, 2018).

همچنین، مدل‌های پیش‌بینی نشان می‌دهند که متغیرهایی مانند نسبتC/N ، نیتروژن کل و هدایت الکتریکی تا ۹۹,۷ درصد تغییرات کربن آلی خاک را توجیه می‌کنند (پاتو و همکاران، ۱۳۹۵). این موضوع اهمیت مدیریت عناصر غذایی و بهبود کیفیت خاک را در افزایش ظرفیت ترسیب کربن برجسته می‌سازد.

در مجموع، پژوهش حاضر و مطالعات مشابه تأکید دارند که حفاظت و احیای پوشش گیاهی، مدیریت پایدار خاک و جلوگیری از تخریب اراضی، راهکارهای کلیدی حفظ و افزایش ذخیره کربن خاک هستند .(Lal, 2005; FAO, 2018) این اقدامات نه‌تنها پایداری زیست‌بوم منطقه را تضمین می‌کنند، بلکه در سطح ملی و جهانی نقشی مؤثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با گرمایش زمین ایفا می‌کنند.(IPCC, 2022)

بنابراین، اجرای برنامه‌های جنگل‌کاری با گونه‌های بومی، آموزش جوامع محلی و کاهش فشارهای انسانی، توصیه‌های اصلی برای حفاظت از ظرفیت ترسیب کربن خاک جنگل‌های زاگرس است.

نتیجه‌گیری

خاک جنگل‌های زاگرس نقش مهمی در چرخه کربن و پایداری زیست‌بوم‌های جنگلی ایفا می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که خاک‌های این منطقه، به‌ویژه در مناطق بکر، ظرفیت بالایی در ذخیره‌سازی کربن دارند. حفاظت از این خاک‌ها از طریق مدیریت پایدار، پیشگیری از آتش‌سوزی، و کاهش تغییر کاربری اراضی می‌تواند به حفظ تنوع زیستی و مقابله با تغییرات اقلیمی کمک کند. پیشنهاد می‌شود برنامه‌های جنگل‌کاری با گونه‌های بومی (مانند بلوط) و آموزش جوامع محلی برای کاهش فشار بر منابع طبیعی اجرا شود.

فهرست منابع

. پاتو، م.، صالحی، ع.، زاهدی امیری، ق.، بانج شفیعی، ع. (۱۳۹۵). ذخیره کربن و رابطه آن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در خاک کاربری‌های مختلف در زاگرس شمالی. *نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۶۹(۴)، ۷۴۷-۷۵۶.

۲. رحیمی، ژ.، محمدی سمانی، ک.، شعبانیان، ن.، رحمانی، م. (۱۳۹۹). بررسی برخی خصوصیات شیمیایی خاک در توده‌های جنگلی زاگرس شمالی. *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۲(۳)، ۵۵-۶۸.

۳. یوسف عسکری، سلطانی، ع.، اخوان، ر. (۱۳۹۸). اندازه‌گیری میزان ترسیب کربن گونه برودار در جنگل‌های زاگرس. *کنفرانس تورشیز*، https://civilica.com/doc/۹۰۵۰۸۵.

۴. نقی‌پوربرج، ع.ا.، رادنژاد، ه.، متین‌خواه، س.ح. (۱۳۹۳). تأثیر جنگل‌کاری بر میزان ترسیب کربن خاک در مناطق خشک. *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران*، ۲۲(۱)، ۹۹-۱۰۸.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science, 304*(5677), 1623–1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396

Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management, 220*(1-3), 242–258. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science, 333*(6045), 988–993. https://doi.org/10.1126/science.1201609

Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications, 10*(2), 423–436. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *The State of the World's Forests 2018: Forest Pathways to Sustainable Development*. Rome: FAO. https://doi.org/10.4060/CA0185EN

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

The Role of Zagros Forest Soils in the Carbon Cycle and Their Impact on the Sustainability of Forest Ecosystems

Majid Pato[1]*, Aziz Majidi[2], Jalal Hanareh[1]

[1]*Corresponding author, Assistant Research Professor, Forest and Rangeland Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran. (m.pato@areeo.ac.ir)

[1] Assistant Research Professor, Forest and Rangeland Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran

[2] Associate Research Professor, Soil and Water Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran

Abstract

The Zagros forests, spanning eleven western and southwestern provinces of Iran—including West Azerbaijan, Kurdistan, Kermanshah, Ilam, Lorestan, Chaharmahal and Bakhtiari, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad, Khuzestan, Hamedan, Markazi, and Fars—play a vital role in the carbon cycle and the sustainability of forest ecosystems. Due to their unique physical and chemical properties, the soils of these forests have a high capacity for organic carbon storage.

This study aimed to investigate the role of Zagros forest soils in carbon sequestration and their impact on ecosystem sustainability. Soil samples were collected from 100 locations at two depths: 0–30 cm and 30–60 cm. Results showed that the average soil organic carbon content in the 0–30 cm layer ranged between 2.5% and 3.5%.

Furthermore, paired t-test analysis revealed that the mean organic carbon content in the 0–30 cm depth (3.01%) was significantly higher than that in the 30–60 cm depth (1.66%).
According to the findings, West Azerbaijan, Ilam, and Lorestan provinces possess the highest levels of soil organic carbon. Among the major threats to this environmental function are land-use changes and forest fires. Sustainable soil management can play an effective role in preserving biodiversity and mitigating the impacts of climate change. Additionally, soils with silty-clay texture and dense vegetation cover have a greater capacity for carbon storage.
Keywords: Carbon cycle, forest soil, Zagros, ecosystem sustainability, carbon sequestration