نشریه

ترویج و توسعه آبخیزداری
Extension and Development of Watershed Management

سال چهاردهم- شماره ۵۲- بهار ۱۴۰۵ Vol. 14, No. 52, Spring 2026

تأثیر احیاء مکانیکی مراتع بر ذخایر کربن و تنوع گیاهی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ارنگه)

حامد فرضی[۱]، زینب جعفریان*[۲]، رضا تمرتاش[۳]، محمدرضا طاطیان[۴]، منصوره کارگر[۵] و خسوس رودریگو کومینو[۶]

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۲/۰۳
DOI:/ 10.22034/WMJI.2026.2080495.1135

چکیده

گیاهان با عمل فتوسنتز خود مسئول اولیه ورود کربن و تکمیل‌کننده چرخه ذخیره‌ای آن در اکوسیستم هستند. به نظر می‌رسد تفاوت‌ها در توانایی کمی و کیفی گیاهان در سطح پایه گیاهی و به‌تبع آن تنوع گیاهان در سطح جامعه گیاهی مهم‌ترین عامل تفاوت در توانایی جوامع گوناگون در ذخیره کربن باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات اقدامات آبخیزداری بر ارتباط بین ذخایر کربن و شاخص‌های تنوع گونه‌ای و کارکردی در حوزه آبخیز ارنگه استان البرز بود. اقدامات مکانیکی شامل سد گابیونی، سنگی ملاتی و کف بند ملاتی و یک سایت شاهد بودند. نمونه‌برداری از پوشش گیاهی در فصل رویش به روش سیستماتیک- تصادفی در ۴۰۰ پلات یک مترمربعی انجام گردید. در هر پلات ویژگی‌های کارکردی گیاهان، زیست‌توده اندام‌های هوایی و زیرزمینی اندازه‌گیری و میزان ترسیب کربن آن‌ها و لاشبرگ محاسبه شد. در هر ترانسکت تعداد دو نمونه خاک از دو عمق، در مجموع ۸۰ نمونه خاک برداشت گردید. شاخص‌های تنوع گونه‌ای و کارکردی با استفاده از نرم‌افزار Fdiversity محاسبه شد. برای بررسی ارتباط بین ذخایر کربن، شاخص‌های تنوع گونه‌ای و کارکردی از رگرسیون خطی چند متغیره در نرم‌افزار R نسخه ۳،۱،۱ استفاده شد. بیش‌ترین مقدار ذخیره کربن گیاهی و کل ترسیب کربن خاک در تیمار گابیون مشاهده گردید. شاخص‌های رائو، یکنواختی، شانون و تنوع کارکردی در کربن کل اکوسیستم تأثیرگذار بودند (p=۰/۰۰۳، R^2=۰/۶۸). بیش‌ترین ضریب تعیین (R^2) آنالیز رگرسیون در تیمار سنگی ملاتی و کف‌بند ملاتی مربوط به ترسیب کربن خاک به ترتیب به میزان ۰/۸۲ و ۰/۵۷ و در تیمار گابیون مربوط به کربن زیست‌توده به میزان ۰/۷۲ بود. در کل اثر فعالیت‌های آبخیزداری بر ترسیب کربن تابعی از عوامل مدیریتی، شرایط اقلیمی، نوع عملیات احیایی و شرایط فیزیکی و بیولوژیکی خاک است و برای تعیین مؤثرترین عوامل، توصیه می‌شود داده‌های دقیق با تکرار کافی، هم‌زمان با پروژه‌های احیایی و اصلاحی تهیه گردد.

کلید واژه: ***ترسیب کربن، سد گابیونی، سد سنگی ملاتی، کف بند ملاتی، کارکرد اکوسیستم.***

مقدمه

گیاهان اساس بسیاری از فرایندهای پایه‌ای و اصلی اکوسیستم‌ها و خدمات آن محسوب می‌شوند [۲]. فرایند تنظیم دی‌اکسید کربن اتمسفری نیز از این امر مستثنا نبوده و گیاهان با عمل فتوسنتز خود مسئول اولیه ورود کربن و تکمیل‌کننده چرخه ذخیره‌ای آن در اکوسیستم هستند [۹]. گیاهان طی فرایند فتوسنتز کربن را از اتمسفر گرفته و آن را صرف سوخت‌وساز و رشد می‌نمایند و باقی‌مانده کربن را در اندام‌های خود ذخیره می‌کنند. زیست‌توده هوایی گیاه نیز کربن ناپایدار موجود در اندام‌ها را از طریق اندام‌های خود به‌صورت ترشحات ریشه‌ای و یا لاشبرگ به خاک وارد می‌کنند. کربن ناپایدار که به خاک واردشده، توسط ماکرو و میکروارگانیسم‌ها تجزیه و سپس مصرف‌شده و یا به‌صورت پایدارتر تبدیل و تجزیه می‌شود. در این میان مشخصه‌ها و صفات مختلفی از گیاه در میزان و نحوه عمل ذخیره کربن نقش دارند که درنهایت سبب ایجاد یک برآیند و قابلیت منحصربه‌فرد در گیاهان مختلف می‌شود که تفاوت در توانایی ذخیره کربن گونه‌ها را به دنبال دارد. تفاوت‌ها در کمیت و کیفیت ذخیره کربن هر گیاه سهم نابرابر فراوانی گیاهان در مقیاس جامعه گیاهی نحوه ترکیب گیاهان و علی‌الخصوص تنوع گونه‌های گیاهی پتانسیل جامعه گیاهی را برای ذخیره کربن تعیین می‌کند [۱، ۳، ۱۴ و ۲۷]. به نظر می‌رسد تفاوت‌ها در توانایی کمی و کیفی گیاهان در سطح پایه گیاهی و به‌تبع آن تنوع گیاهان در سطح جامعه گیاهی مهم‌ترین عامل

۱- دکتری علوم مرتع، اداره کل منابع طبیعی استان البرز
۲- استاد گروه علوم و مهندسی مرتع، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و نویسنده مسئول Email: z.jafarian@sanru.ac.ir
۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی مرتع، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی مرتع، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۵- دکتری علوم مرتع، سازمان جهاد کشاورزی استان مازندران
۶- دانشیار گروه جغرافیای فیزیکی و منطقه‌ای دانشگاه گرانادا، اسپانیا

تفاوت در توانایی جوامع گوناگون در ذخیره کربن باشد. به‌طوری‌که انتظار می‌رود در کنار سایر عوامل تأثیرگذار پوشش گیاهی و محیطی، تنوع گروه‌های گیاهی و ترکیب گیاهی نقش عمده‌ای در ورود کربن به خاک دارند [۳۰]. در این راستا تنوع موجودات زنده اکوسیستم‌های طبیعی نیز درنتیجه مداخله انسان، تغییرات اقلیمی، تأثیرات عوامل مداخله‌گر زنده و غیرزنده به‌طور افزون کاهش می‌یابد. این موضوع تأثیرات سوئی بر کارکرد و خدمات اکوسیستم خواهد داشت [٤ و ٥]. تنوع گونه‌ای به‌طور بالقوه توانایی کمی در ذخیره کربن به‌صورت بلندمدت داراست و از طرفی دیگر ازآنجایی‌که ترکیب گونه‌ای مراتع شامل تعداد گونه‌های متفاوتی می‌باشد، امکان بررسی توانایی ترسیب هرگونه به‌صورت جداگانه امری زمان‌گیر و پرهزینه می‌باشد [۲۳]. ازاین‌رو باید از شاخص‌هایی استفاده کرد که میزان ترسیب کربن مراتع راحت‌تر تخمین زده شود. یکی از شاخص‌هایی که در دهه‌های اخیر موردتوجه بسیاری از دانشمندان قرارگرفته است شاخص تنوع کارکردی می‌باشد. درگذشته برای بررسی ارتباط بین کارکرد سیستم‌های اکولوژیکی و تنوع از شاخص‌های کلاسیک تنوع استفاده می‌کردند که این موضوع موردانتقاد قرار گرفت چون قادر نبود به‌خوبی ارتباط بین تنوع و کارکرد و تنوع و پایداری را نشان دهد. به همین دلیل محققان به دنبال استفاده از شاخص‌هایی بودند که بتواند مشکل فوق را حل کند [۱۹]. آن‌ها بهترین راه را استفاده از ویژگی‌های گیاهی و دخیل کردن آن‌ها در شاخص‌های تنوع برای حل مشکل فوق بیان کردند. بر این اساس مفاهیمی مانند گروه‌ها و ویژگی‌های کارکردی را تعریف نمودند. بسیاری از اکولوژیست‌ها بر این باورند که برای ارزیابی تنوع و غنای گونه‌ای و تعیین عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها بهتر است که گونه‌های موجود در یک جامعه گیاهی را بر اساس ویژگی‌هایی که دارند به گروه‌های متفاوتی تقسیم کرد. اکولوژیست‌ها معتقدند که در هر اکوسیستم گروه گونه‌های گیاهی خاصی وجود دارند که بر یک کارکرد خاص در اکوسیستم بیش‌ترین تأثیر را می‌گذارند؛ بنابراین حذف یک گروه کارکردی تأثیرات زیادی بر روی کارکرد اکوسیستم داشته تا این‌که همان تعداد گونه از گروه‌های کارکردی دیگر برداشت شود [١٤ و ٢٩]. تنها راه‌کار شناخته‌شده بهبود ترسیب کربن توسط اکوسیستم‌های خاکی استفاده از ابزارهای مدیریتی کارآمد نظیر عملیات مکانیکی و احیایی آبخیزداری است [۹]. از نقطه‌نظر عوامل مدیریتی و احیایی می‌توان گفت که میزان ترسیب کربن در واحد زمان به خصوصیات رشدی گونه‌های گیاهی، شیوه مدیریت در هر کاربری نوع عملیات احیایی شرایط فیزیکی و بیولوژیکی خاک و ذخیره قبلی کربن در خاک بستگی دارد. در داخل کشور به برخی مطالعات که اثرات اقدامات آبخیزداری بر ترسیب کربن را بررسی نمودند؛ می‌توان اشاره کرد [۸، ۱۲، ۲۱، ۲۲ و ٢٤]. فرضی و همکاران [۷] در بررسی اقدامات بیولوژیکی بر شاخص‌های تنوع گونه‌ای و تنوع کارکردی بیان نمودند که شاخص رائو در سایت قرق دارای بالاترین مقدار بوده و با سایت مدیریت چرا اخلاف معنی‌داری داشته، اما تفاوت آن با بذرپاشی و کپه‌کاری زیاد بوده است.

در خارج از کشور نیز چندین مطالعه بر روی جهات مختلف تنوع کارکردی نشان از تغییرپذیری در ذخایر کربن خاک و زیست‌توده و تنوع کارکردی داشتند [۲۰، ۲۳، ۲۷، ۲۸]. با توجه به بلایای طبیعی سال‌های گذشته ازجمله خشک‌سالی‌ها و سیل که مراتع منطقه موردمطالعه را مورد تهدید قرارداده محاسبه تنوع کارکردی می‌تواند در جهت پویایی و پایداری این مراتع کمک زیادی بنماید و از طرفی پایداری این مراتع می‌تواند کمک زیادی به کاهش آلودگی هوا و ترسیب کربن کند. در زمینه تأثیر عوامل محیطی بر ترسیب کربن گیاهان و خاک مطالعاتی صورت گرفته [٦، ۱۱ و ۱۳] اما در مورد اقدامات سازه‌های مکانیکی بر تنوع کارکرد و ارتباط شاخص‌های تنوع کارکرد با ترسیب کربن مطالعه و پژوهشی صورت نگرفته است، لذا هدف از تحقیق حاضر بررسی ارتباط بین ذخایر کربن (به‌عنوان کارکرد اکوسیستم) و شاخص‌های مختلف تنوع گونه‌ای و کارکردی در راستای اقدامات آبخیزداری است.

مواد و روش

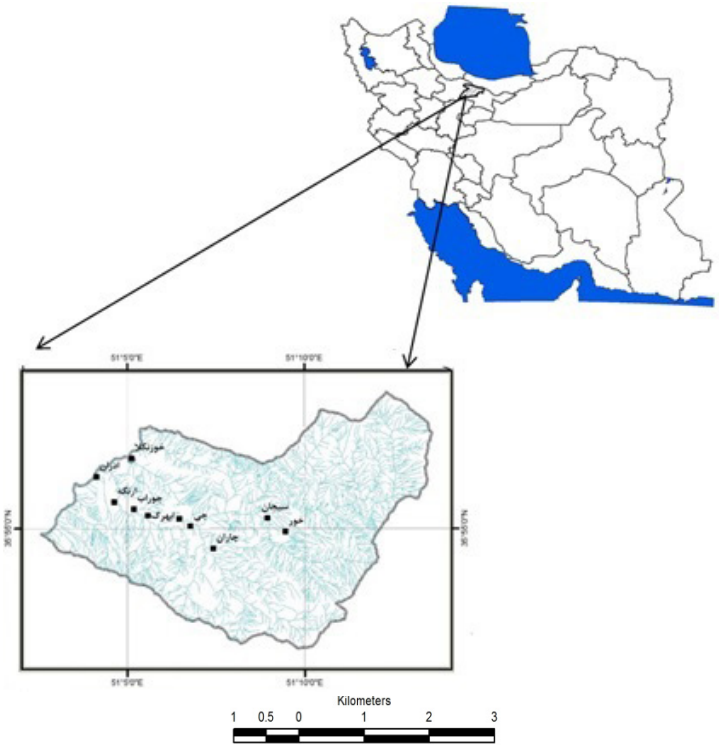
منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز ارنگه با مساحت ۱۰۰۹۸/۵۳ هکتار در استان البرز و بخش مرکزی شهرستان کرج واقع‌شده است. این حوضه ازنظر موقعیت جغرافیایی بین '۰۲ °۵۱ تا '۱۳ °۵۱ طول شرقی و '٥٤ °۳۵ تا '۵۷ °۳۵ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). حداکثر ارتفاع ۳٦٦٥ متر و حداقل ۱٦۸۵ متر از سطح دریا می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه ٦٤۲/۹ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۹/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تیپ‌های گیاهی مرتعی شامل

Melica، *Astragalus verus-Bromus tomentellus* *-Agropyron intermedium*،*Bromus tectorum-jacquemontii* *Malva neglecta* است [۱٦]. گونه‌های غالب در منطقه در تیمار گابیونی *Salvia limbata - Bromus tomentellus* تیمار کف بند ملاتی *Eryngium bungei– Polygonum rottboellioides* و در تیمار سنگی ملاتی *Agropyron intermedium - Malva neglecta* بودند.

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری کربن پوشش گیاهی و لاشبرگ

برای نمونه‌گیری ابتدا سایت تیمارهای موردمطالعه در حوزه آبخیز شامل اقدامات مکانیکی به ترتیب شامل سد گابیونی، کف بند ملاتی، سد سنگی ملاتی و هم‌چنین یک سایت شاهد انتخاب شدید. نمونه‌برداری از پوشش گیاهی در فصل رویش منطقه اردیبهشت و خرداد به روش سیستماتیک- تصادفی در ٤۰۰ پلات یک مترمربعی در امتداد ٤۰ ترانسکت ۱۰۰ متری انجام شد. شایان‌ذکر است که ابعاد پلات در تمامی تیمارهای موردبررسی با توجه به گونه‌های موجود در منطقه انتخاب شد [۱۷]. در طول هر ترانسکت تعداد دو نمونه خاک در تیمارهای مختلف مناطق احیاء و شاهد در مجموع ۸۰ نمونه خاک از دو عمق ۱۵۰-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری برداشت



شکل ۱: موقعیت منطقه موردمطالعه در ایران و استان

گردید [۷]. نحوه استقرار ترانسکت‌ها در امتداد آبراهه‌ها انتخاب شد. در هر پلات درصد تاج پوشش، لاشبرگ، سنگ و سنگریزه، تراکم و ترکیب گونه‌ای ثبت گردید. هم‌چنین در هر پلات ویژگی‌های کارکردی گیاهان شامل طول عمر، فرم رویشی، روش تکثیر و نوع گرده‌افشانی تعیین یا اندازه‌گیری شدند. گونه‌های گیاهی موجود با استفاده از منابع معتبر گیاه‌شناسی مانند فلور رنگی ایران، فلور ایران فلور ایرانیکا و رده‌بندی گیاهان مظفریان مورد شناسایی قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری زیست‌توده هوایی از روش نمونه‌گیری مضاعف استفاده شد [۲۶]. به‌منظور برآورد کربن ترسیب شده در زیست‌توده هوایی در تیمارهای مختلف از سهم گونه‌ها در ترکیب گیاهی استفاده شد [۲٤].

در هر سایت به‌منظور برآورد وزن و درنهایت مقدار کربن ترسیب شده به‌وسیله لاشبرگ، لاشبرگ سطح خاک در هر پلات جمع‌آوری و توزین شد و وزن حاصله به هکتار تعمیم داده شد. برای تعیین درصد کربن آلی در هر گرم از نمونه‌های گیاهی و لاشبرگ از روش احتراق خشک در کوره الکتریکی استفاده گردید [۳]. در این تحقیق دمای کوره ٤٥٠ درجه سلسیوس و به مدت سه ساعت بوده است. در این روش میزان کاهش وزن ماده به‌جامانده در کوره معادل ماده آلی است و بررسی‌ها نشان می‌دهد که ۵۰ درصد ماده آلی برابر کربن آلی موجود در گیاه است (رابطه ۱ و ۲).

$OC = OM \times 100$ ۰ (رابطه ۱)

$M = \frac{DW-AW}{DW} \times 100$ (رابطه ۲)

که در آن‌ها OM= ماده آلی، OC= کربن آلی، AW= وزن خاکستر نمونه و DW= وزن خشک نمونه است.

(رابطه ۳) مقدار کربن آلی × زیست‌توده = مقدار کربن در زیست‌تود

هم‌چنین با داشتن عمق خاک (d) برحسب متر و وزن مخصوص ظاهری (BD) (گرم بر سانتیمتر مکعب) ذخیره کربن (CS) برحسب تن در هکتار با فرمول زیر محاسبه شد (رابطه ٤).

$CS=100\times OC\ (\%) \times BD \times d$ (رابطه ٤)

محاسبه شاخص‌های تنوع و تحلیل‌های آماری

از شاخص‌های تنوع کارکردی موردمطالعه در منطقه نمونه‌برداری شامل شاخص رائو، چندوجهی محدب، یکنواختی کارکرد، واگرایی کارکرد، غنای کارکرد با استفاده از نرم‌افزار Fdiversity محاسبه شدند [۱۰]. این شاخص‌ها مبتنی بر چند صفت کارکردی هستند و طبق فرمول‌هایی قابل‌محاسبه هستند. برای محاسبه این شاخص‌ها از داده‌های صفات کارکردی اندازه‌گیری شده استفاده شد. شاخص‌های غنا، یکنواختی و تنوع سیمپسون با استفاده از داده‌های حضور و تعداد گونه‌ها در واحد سطح محاسبه شدند [۷]. برای بررسی ارتباط بین ذخایر کربن، شاخص‌های غنا و تنوع گونه‌ای و کارکردی در هر سایت اقدامات مکانیکی از رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شد [۲۸]. بدین‌صورت که ذخایر کربن به‌عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های غنا و تنوع گونه‌ای و کارکردی به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است این تجزیه‌وتحلیل‌ها در نرم‌افزار R نسخه ۳,۱,۱ انجام گرفتند [۱۸].

جدول ۱: آنالیز رگرسیون چندمتغیره بین شاخص‌های تنوع کارکردی و گونه‌ای در تیمار گابیون

متغیر پاسخ	شکل مدل	متغیرهای پیش‌گو	R^2	Sig
کربن زیست‌توده (AGB)	۱۱/۹۰-۳۰/۷۷ FEve + ۱۲۸/۱۲ S	مدل Model	۰/۷۲	۰/۰۰۱
		(شاخص یکنواختی کارکرد) FEve		۰/۰۰۱
		(غنای گونه‌ای) S		۰/۰۰۵
کربن آلی خاک (SOC)	۱۹/۵۱+ ۳۳/۱۰ E - ۹۰/٦۷ FRic + ۱۲۲/۱٦D	مدل Model	۰/٦۱	۰/۰۰۱
		(غنای کارکرد) FRic		۰/۰۲۵
		(شاخص یکنواختی) E		۰/۰۰۱
		(شاخص سیمپسون) D		۰/۰۳۲
کربن لاشبرگ (AL)	۸۷۱/۳۲+۱۲/٦۰ CHull + ٤۷/۱۰Rao	مدل Model	۰/٦۳	۰/۰۰۱
		(شاخص چندوجهی) محدب CHull		۰/۰۰۱
		شاخص رائو (Rao)		۰/۰۰۱
ترسیب کربن خاک (SCS)	۱۲۱/۷۷ + ۷٦/٤۱ S – ۷۸/۵٦ CHull	مدل Model	۰/۵۲	۰/۰۰۵
		(غنای گونه‌ای) S		۰/۰۰۱
		(شاخص چندوجهی محدب) CHull		۰/۰۰۵
کربن کل اکوسیستم (TEC)	۳۳۷/۱۲ + ۱۹/٤٤ Rao - ٤۰/۵٦ E + ۹۰/۱۱ H +۱۹۰/٦۱ FDiv	مدل Model	۰/٦۸	۰/۰۰۳
		(شاخص رائو) Rao		۰/۰۰۱
		(شاخص یکنواختی) E		۰/۰۰۱
		(شاخص هیل) H		۰/۰۰۰
		(شاخص واگرایی کارکرد) FDiv		۰/۰۰۱

جدول ۲: آنالیز رگرسیون چندمتغیره بین شاخص‌های تنوع کارکردی و گونه‌ای در تیمار کف‌بند ملاتی

متغیر پاسخ	شکل مدل	متغیرهای پیش‌گو	R^2	Sig
کربن زیست‌توده (AGB)	۳۰/٤۹-۲۵/۱۲ FEve + ۱٤/٦٦ S	مدل Model	۰/۵۲	۰/۰۰۱
		(یکنواختی کارکرد) FEve		۰/۰۰۱
		(غنای گونه‌ای) S		۰/۰۰۱
ترسیب کربن خاک (SCS)	۵۹/۱۲ + ۷/۲٤ S – ۳۳/۱۱ FRic	مدل Model	۰/۵۷	۰/۰۰۳
		(غنای گونه‌ای) S		۰/۰۰۳
		(غنای کارکرد) FRic		۰/۰۰۱

نتایج

اثر تیمارهای مختلف مکانیکی بر پاسخ ذخیره کربن به شاخص‌های مختلف تنوع کارکردی و گونه‌ای

نتایج آنالیز رگرسیون چندمتغیره در تیمار گابیون بیانگر این مطلب بود که بیش‌ترین ضریب تعیین (R^2) مربوط به کربن زیست‌توده به میزان ۰/۷۲ می‌باشد که اثرگذاری متغیرهای یکنواختی کارکرد و غنای گونه‌ای بر کربن زیست‌توده را نشان داد. هم‌چنین شاخص‌های رائو، یکنواختی، شانون و تنوع کارکردی با کربن کل اکوسیستم رابطه داشتند (R^2=۰/٦۸ ،p=۰/۰۰۳) (جدول ۱).

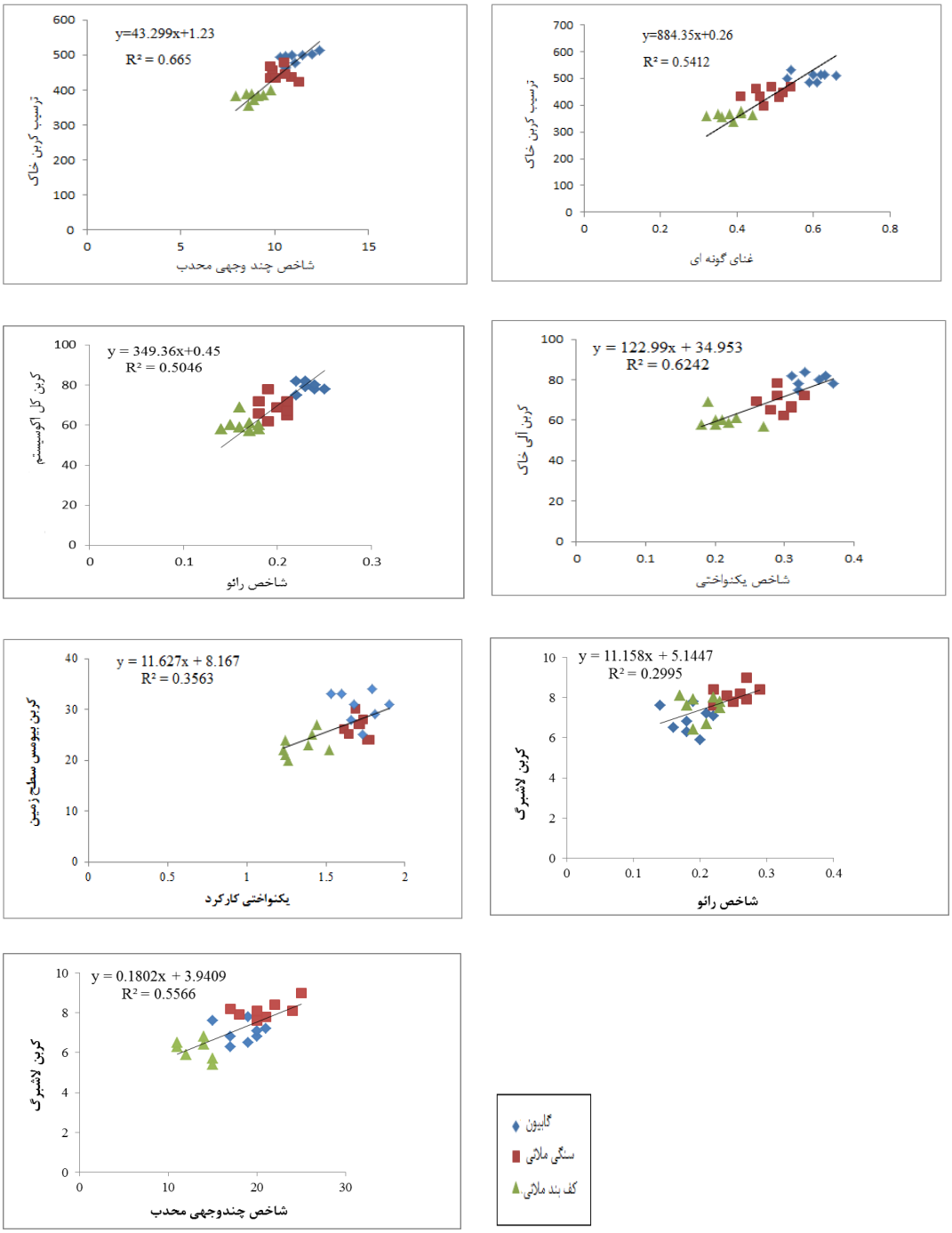
نتایج آنالیز رگرسیون چندمتغیره در تیمار کف‌بند ملاتی بیانگر این مطلب بود که بیش‌ترین R^2 مربوط به ترسیب کربن خاک به میزان ۰/۵۷ می‌باشد که مربوط به متغیرهای غنای کارکرد و غنای گونه‌ای بودند که نشان‌دهنده اثرگذاری این متغیرها بر میزان ترسیب کربن است (جدول ۲).

نتایج آنالیز رگرسیون چندمتغیره در تیمار سنگی ملاتی بیانگر این مطلب بود که بیش‌ترین R^2 مربوط به ترسیب کربن خاک به میزان ۰/۸۲ بود که نشان‌دهنده اثرگذاری متغیرهای غنای گونه‌ای و شاخص چندوجهی محدب بر آن بودند. هم‌چنین شاخص‌های یکنواختی گونه‌ای، شاخص واگرایی کارکرد و غنای کارکرد با کربن آلی خاک مرتبط بودند (R^2=۰/۷۸ ،p=۰/۰۰۱) (جدول ۱).

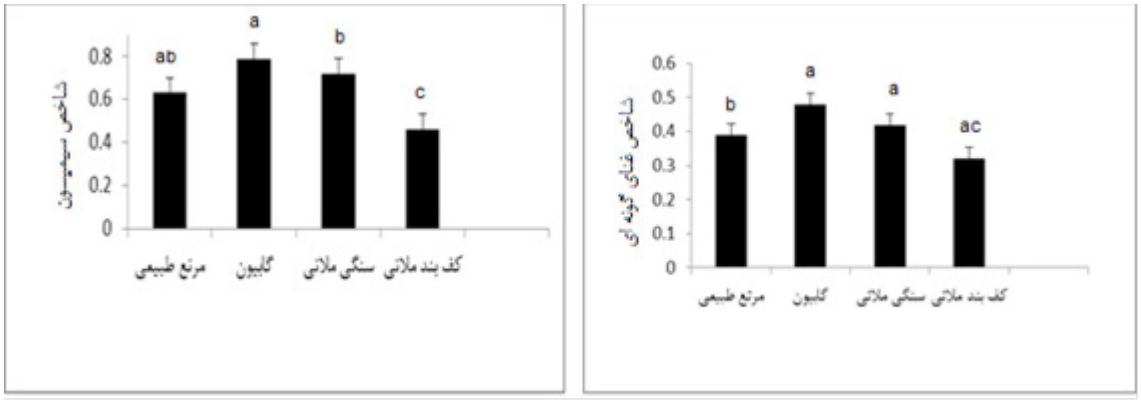
نتایج حاصل از رگرسیون خطی بین ترسیب کربن خاک و شاخص غنای گونه‌ای در تیمارهای مختلف مکانیکی نشان داد که ترسیب کربن خاک ارتباط مثبتی با شاخص غنای گونه‌ای داشت (R^2= ۰/٦۲). بین شاخص رائو با کربن لاشبرگ ارتباط کم‌تری به میزان (R^2= ۰/۲۹) وجود داشت که معنی‌دار نبود (شکل ۲)

جدول ۳: آنالیز رگرسیون چندمتغیره بین شاخص‌های تنوع کارکردی و گونه‌ای در تیمار سنگی ملاتی

متغیر پاسخ	شکل مدل	متغیرهای پیش‌گو	R^2	Sig.
کربن آلی خاک (SOC)	۱۹/۵۱+ ۳۳/۱۰FRic – ۹۰/٦۷ FDiv+ ۱۲۲/٦E	مدل Model	۰/۷۸	۰/۰۰۱
		(غنای کارکرد) FRic		۰/۰۰۱
		(تنوع کارکرد) FDiv		۰/۰۰۱
		(یکنواختی)E		۰/۰۰۲
ترسیب کربن خاک (SCS)	۱۲۱/۷۷ + ۷٦/٤۱ S – ۷۸/٥٦ CHull	مدل Model	۰/۸۲	۰/۰۰۱
		(غنای گونه‌ای) S		۰/۰۰۱
		(شاخص چندوجهی محدب) CHull		۰/۰۰۳



شکل ۲: رگرسیون خطی بین ذخیره کربن (گرم در هکتار) و شاخص‌های غنا و تنوع گونه‌ای و کارکردی در تیمارهای مختلف مکانیکی



شکل ۳: مقایسه میانگین شاخص‌های تنوع گونه‌ای و کارکردی در بین تیمارهای مختلف مکانیکی

جدول ۵: مقایسه تیمارهای مختلف مکانیکی ازنظر ذخیره کربن در پوشش گیاهی، لاشبرگ و خاک

تیمار	ذخیره کربن گیاهی (کیلوگرم بر هکتار)	ذخیره کربن لاشبرگ (کیلوگرم بر هکتار)	ذخیره کربن خاک سطحی (کیلوگرم بر هکتار)	ذخیره کربن خاک زیرین (کیلوگرم بر هکتار)	کل ترسیب کربن (تن بر هکتار)
مرتع طبیعی	٤/١٠ ±٣٢٢	٤١±٠ /٤٣	١٥٦٦٢±٠ /٩١	٣١١٧٨±١ /٠٩	٢٣٩/٦٦±١ /٢٢
گابیون	٤٩١±١ /٦٦	٤٧±٠ /٤٨	١٥٧٧٤±٠ /٤٧	١٦٠٩١±١ /٥٦	٤٦٦/٠٤±١ /٥٨
سنگی ملاتی	٢٤٨±٢ /٥٠	٧٩±٠ /٧٤	٢١٤٢٩±٣ /٢١	٤٢١٩٠±١ /٧٣	٢١٠/٤٧±١ /٠٤
کف بند ملاتی	٢٣٦±١ /٤٩	٨١±٠ /٦٩	١٥٢٩٠±١ /٠٤	٣٢٠٢٢±١ /١٨	٢٥٨/١٤±١ /٠١
آماره F	٢/٥٥ ns	٢/٢٩ *	٥/١٧ ns	٧/٢١ *	٠/٦٦ ns

جدول ٤: مقایسه تیمارهای مکانیکی از نظر درصد کربن آلی و کربن ترسیب شده در دو عمق خاک

فاکتور تیمار	درصد کربن آلی خاک OC		ترسیب کربن آلی در خاک SCS	
	عمق ١٥-٠ (سانتی‌متر)	عمق ٣٠-١٥ (سانتی‌متر)	عمق ١٥-٠ (سانتی‌متر)	عمق ٣٠-١٥ (سانتی‌متر)
گابیون	٠/٣٩± a٢٧	٠/٤٦±٥٤ a	١٧٨/١±١/٢٢ a	١٥٥/٦±١٥٥/٦ a
سنگی ملاتی	٠/٥٢± b٥٦	٠/٤١±٢١ a	١٤٢/٩±١/٠٥ b	١٦١/٣±١٦١/٣ a
کف بند ملاتی	٠/٥٨±٠/٦٢ b	٠/٥٢ ±٠/٣٩ a	١٦٦/٥±١/a١	١٧٩/١±١/١٨ b
آماره F	٠/١٩±٠/٠٦ *	٠/٢٦±٠/١٠ ns	٠/٤٣±٠/٣٥ *	٠/٢٢±٠/٠٩ *

مقایسه میانگین شاخص‌های تنوع گونه‌ای و کارکردی در بین تیمارهای مختلف مکانیکی

نتایج شکل (۳) نشان داد که شاخص غنای گونه‌ای و شاخص سیمپسون در بین شاخص‌های تنوع، اختلاف معنی‌داری در اقدامات مکانیکی داشتند. بیش‌ترین میزان شاخص سیمپسون در تیمار گابیون مشاهده شد که این تیمار با مرتع طبیعی و کف‌بند ملاتی اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد ازنظر تنوع گونه‌ای داشت. هم‌چنین بین تیمار گابیونی و سنگی ملاتی ازنظر شاخص غنای گونه‌ای اختلاف معنی‌داری وجود داشت.

مقایسه تیمارهای مکانیکی ازنظر درصد کربن آلی و کربن ترسیب شده در دو عمق خاک

نتایج جدول (٤) بیانگر این مطلب است که بین تیمارهای مکانیکی ازنظر درصد کربن آلی در عمق اول خاک اختلاف معنی‌داری وجود دارد؛ اما در عمق دوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. هم‌چنین ازنظر مقدار ترسیب کربن آلی خاک نیز در عمق اول خاک اختلاف معنی‌داری وجود داشت به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار ترسیب کربن آلی در تیمار گابیون مشاهده شد. هم‌چنین در عمق دوم ازنظر ترسیب کربن آلی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت.

نتایج جدول (۵) نشان داد که ازنظر انواع ذخایر کربن، به ترتیب

بیش‌ترین مقدار ذخیره کربن گیاهی مربوط به تیمار گابیون، ذخیره کربن لاشبرگ گیاهی در کف‌بند ملاتی، ذخیره کربن سطحی در سایت سد سنگی ملاتی و ذخیره کربن خاک زیرین مربوط به تیمار سنگی ملاتی و کل ترسیب کربن خاک در تیمار گابیون مشاهده گردید.

بحث و نتیجه‌گیری

اثر فعالیت‌های آبخیزداری بر ترسیب و ذخیره کربن تابعی از عوامل مدیریتی، شرایط اقلیمی، نوع عملیات احیایی، شرایط فیزیکی و بیولوژیکی خاک و ذخیره قبلی کربن در خاک است. نتایج نشان داد که در سازه‌های مکانیکی میزان لاشبرگ بیش‌تری نسبت به مرتع طبیعی تجمع پیداکرده که حاصل آن از بالادست توسط جریان‌های روانابی و سیلابی است. حجم بیش‌تر رواناب در سدهای گابیونی مقدار بیش‌تری لاشبرگ و درنتیجه ترسیب کربن بیش‌تری توسط لاشبرگ را به همراه خود خواهد داشت که با نتایج برخی محققین مطابقت دارد [۲۰ و ۲٤]. برخی محققین نشان دادند که بین مراحل مختلف تخریب ازنظر ترسیب کربن در خاک تفاوت وجود دارد. در مناطق بسیار تخریب‌شده که در آن توابع اکوسیستمی به‌شدت ناکارآمد هستند مقدار ترسیب کربن پایین‌تر از سایت‌هایی در شرایط بهتر است [۱۲ و ۲۸]. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار ترسیب شده مربوط به تیمار گابیون بود که با سایر اقدامات اختلاف معنی‌داری داشت که با نتایج برخی تحقیقات همخوانی دارد [8 و ۲۲]. تغییرات مثبتی که در پارامترهای گیاهی تحت تأثیر اقدامات مکانیکی رخ‌داده است، بدین علت است که پروژه‌هایی که عمدتاً باهدف کنترل رسوب حمل شده توسط جریان‌های آبی، مرتع‌داری و جنگلداری اجرا می‌شوند موجب تعدیل اثر شیب می‌شوند. درنتیجه با تعدیل این اثر، موجب کاهش سرعت جریان و درنهایت کاهش دبی حداکثر حوزه آبخیز خواهند شد. لذا آب بیش‌تری در خاک نفوذ کرده، رطوبت خاک افزایش‌یافته و با افزایش رطوبت خاک جذب عناصر غذایی توسط گیاه افزایش‌یافته که سبب بهبود استقرار گیاه و افزایش درصد پوشش گیاهی می‌شوند [١٤ و ۲۵]. این تحقیق نشان داد که مقدار یکنواختی کارکرد در سایت دارای کف‌بند ملاتی بالاست. این بدین دلیل است این عملیات باعث ناهمگنی بیش‌تر توزیع منابع شده و همزیستی گونه‌هایی با استراتژی متفاوت استفاده از منابع را در این منطقه بالا می‌برد [۱۹]. هرچه غنای کارکرد بیش‌تر باشد نشان از تفاوت بیش‌تر گونه‌ها ازنظر کارکرد یعنی محدوده‌ای از منبع غذایی که به‌وسیله آشیان اکولوژیک گونه‌های اشغال‌شده است، دارد که با نتایج برخی محققین همخوانی دارد [۵ و ۱۰]. شاخص واگرایی کارکرد در دامنه صفر تا یک تغییر می‌کند. نتایج نشان داد که بالاترین میزان این شاخص مربوط به سایت دارای سد گابیونی بود. هم‌چنین تغییرپذیری این شاخص کم بوده است و تحمل کم‌تری در برابر اقدامات فیزیکی دارد. این شاخص در حقیقت تفاوت ویژگی‌های گونه‌ها است که در آن باید درصد فراوانی گونه‌ها (درصد پوشش) بیش‌تر لحاظ شود. شاخص واگرایی کارکرد بیانگر اختلافات آشیانه‌ای گونه‌ها بر روی بردار منابع غذایی است. واگرایی زیاد در کارکرد نشان می‌دهد که گونه‌ها دارای اختلافات آشیانه‌ای زیادی بر روی منابع غذایی هستند و درنتیجه رقابت کم‌تری شکل می‌گیرد که با یافته‌های برخی محققین مطابقت دارد [۲۰]. دلیل افزایش ذخیره کربن با افزایش عمق در برخی از تیمارها را می‌توان این‌طور بیان نمود که کربن تجزیه‌شده از مواد آلی و بخش‌های سخت و چوبی گونه‌های گیاهی در خاک منطقه پس از ورود به لایه‌های سطحی خاک توسط پدیده جابجای از طریق بارندگی و آبشویی وارد لایه‌های معدنی در عمق‌های پایین‌تر خاک شده که متعاقباً باعث افزایش میزان ذخیره کربن خاک در عمق‌های پایین‌تر می‌شوند. دلیل دیگر این است که گونه‌های بوته‌ای و خشبی علاوه بر افزایش قابل‌توجه از حجم مواد آلی و افزودن کربن به خاک دارای ریشه دوانی عمیق با سطوحی وسیع می‌باشند که بدین ترتیب به‌طور فزاینده باعث ایجاد تغییر در میزان ذخیره کربن آلی خاک به‌خصوص در عمق‌های پایین‌تر خاک می‌شوند [۱۵ و ۲۵]. این بدان خاطر می‌باشد که چنین پروژه‌هایی که عمدتاً باهدف کنترل رسوب حمل شده توسط جریان‌های آبی و تأمین آب کشاورزی، دامداری، مرتع‌داری و جنگلداری اجرا می‌شوند و به‌صورت عرضی در طول رودخانه‌ها و آبراهه‌ها احداث می‌شوند، علاوه بر جلوگیری از حمل رسوب موجب تعدیل شیب کف بستر می‌شوند. درنتیجه با تعدیل شیب منجر به کاهش سرعت جریان و درنهایت باعث افزایش زمان تمرکز و کاهش دبی پیک حوزه آبخیز خواهند شد که با نتایج برخی محققین همخوانی دارد [۱۲ و ۲۱]. تغییر در غنا و تنوع گونه‌ای از ویژگی‌های اکوسیستم‌های دست‌کاری شده می‌باشد. هر چه تنوع گونه‌ای یک اکوسیستم بالاتر باشد مقاومت آن اکوسیستم در برابر تخریب بیش‌تر است؛ زیرا اغلب آشیان‌های اکولوژیک آن اشغال‌شده و از منابع موجود به بهترین نحو ممکن استفاده می‌شود. شاخص‌های غنا و تنوع گونه‌ای در مناطق احیایی بیش‌تر از شاهد است که نشان‌دهنده تأثیر عملیات مکانیکی در افزایش این شاخص‌هاست. ممکن است نوع عملیات‌های آبخیزداری به‌صورت مستقیم پوشش گیاهی را تغییر ندهد، بلکه تغییر شرایط خرد اقلیمی ازجمله خاک و ویژگی‌های اکولوژیکی منطقه نیز می‌تواند در آن تأثیر داشته باشد [۱۵]. اجرای طرح‌های آبخیزداری ضمن حفاظت آب‌وخاک با افزایش زمان تمرکز باعث افزایش رطوبت خاک و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی می‌شوند و شرایط را برای جوانه‌زنی و افزایش پوشش گیاهی فراهم می‌کند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که شاخص‌های تنوع گونه‌ای شامل غنا و یکنواختی گونه‌ای با میزان کربن ذخیره‌شده در کل اکوسیستم، خاک، لاشبرگ و بیوماس ارتباط معنی‌داری دارند. به دلیل اینکه افزایش غنای گونه‌ای ممکن است به‌صورت مثبت باعث افزایش بیوماس هوایی و زیرزمینی شده که خود باعث افزایش میزان لاشبرگ ورودی و افزایش سرعت تجزیه مواد و ورود مواد آلی و کربن به خاک می‌شود که با یافته‌های برخی محققین همخوانی

دارد [۱۶ و ۲۰]. نتایج نشان داد که بین یکنواختی و میزان کربن ذخیره‌شده در بیوماس رابطه منفی و معنی‌داری وجود دارد به‌گونه‌ای که با افزایش یکنواختی، میزان کربن ذخیره‌شده توسط بیوماس کاهش‌یافته است.

البته باید خاطرنشان کرد که جهت بررسی دقیق توان ترسیب کربن پوشش گیاهی و خاک‌های کشور نیاز به استفاده از مدل‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی ترسیب کربن می‌باشد و بدین منظور داده‌های دقیق با تکرار زیاد نیز لازم است که می‌توان هم‌زمان با پروژه‌های احیایی و اصلاحی، آن‌ها را تهیه نمود، درحالی‌که این پروژه‌ها باید به شکلی ایجاد شوند که از تخریب پوشش گیاهی و خاک جلوگیری شود. درکل می‌توان گفت که اثر فعالیت‌های آبخیزداری بر ترسیب کربن تابعی از عوامل مدیریتی، شرایط اقلیمی، نوع عملیات احیایی و شرایط فیزیکی و بیولوژیکی خاک است.

منابع

1. Catovsky, S., Bradford, M.A., and Hector, A. 2002. Biodiversity and ecosystem productivity: implications for carbon storage. Oikos, 97: 443–448.

2. Conti, G., and Díaz, S. 2013. Plant functional diversity and carbon storage – an empirical test in semi-arid forest ecosystems. Journal of Ecology, 101: 18–28.

3. De Deyn, G.B., Cornelissen, J.H.C., and Bardgett, R.D. 2008. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. Ecology Letter, 11: 516–531.

4. Díaz, S., Lavorel, S., de Bello, F., Grigulis, K., and Robson, T.M. 2007. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(52): 20684-20689.

5. Dubuis, A. 2013. Predicting spatial patterns of plant biodiversity: from species to communities. Thesis Ph.D. University of Lausanne, 295 p.

6. Farokhzadeh, B., Ghasemi, B., Ataeian, B., and Akhzari, D. 2023. Effective Physiological parameters and some physicochemical parameters on soil organic carbon storage in Gonbad rangelands. Journal of Rangeland, 16(4): 846-859. (In Persian)

7. Farzi, H., Tamartash, R., Jafarian, Z., and Tatian, M.R. 2020. Effects of Biological treatments on plants' functional and Species Diversity Indices (Case study: Arange Watershed, Alborz). Journal of Rangeland, 14(1): 37-46. (In Persian)

8. Farzi, H., Tamartash, R., Jafarian, Z., and Tatian, M.R. 2019. Effects of Mechanical treatments on plants' functional and soil carbon sequestration (Case study: Arange Watershed, Alborz), The 14th National Watershed Science and Engineering Conference, July 25-26, 2018. Urmia University. (In Persian)

9. Fynn, A.J., Alvarez, P., Brown, J.R., George, M.R., Kustin, C., Laca, E.A., Oldfield, J.T., Schohr, T., Neely C.L., and Wong, C.P. 2010. Grassland Carbon Sequestration: Management, Policy and economics. Chapter IV. Soil carbon sequestration in United States rangelands. Integrated Crop Management, (11): 54-104.

10. Jafarian, Z., Kargar, M., Tamartsh, R., and Alavi, S.A. 2019. Spatial distribution modelling of plant functional diversity in the mountain rangeland, north of Iran. Ecological indicator, 97: 231-238.

11. Jafarian, Z., and Ghorbani, Zh. 2023. Prediction of Soil Carbon Sequestration in Rangelands Based on Soil Sampling Depth and Elevation Using Response Surface Methodology. Journal of Rangeland, 17(2): 179- 194. (In Persian)

12. Joneidi Jafari, H., Azarnivand, H., Zare Chahouki, M., Jafari M., and Kargari, E. 2013. Effects of contour furrow on carbon sequestration and nitrogen fixation in *Artemisia sieberi* rangelands of Semnan province. Iranian Journal of Range and Desert Research, 20 (2): 298-308. (In Persian)

13. Kohestani, N., Rastgar, Sh., Heydari, Gh., Shetaee Jouibary, Sh., and Amirnejad, H. 2021. Monitoring the spatial distribution of soil carbon sequestration for four decades based on changes in rangeland vegetation conditions (Case study: Noorrud watershed in Mazandaran province). Journal of Rangeland, 5(2): 344-356. (In Persian).

14. Liu, J., Wang, S.J., Morreale, R.L., Schneider, Z.G., and Li, G.L. 2023. Contributions of plant litter to soil microbial activity improvement and soil nutrient enhancement along with herb and shrub colonization expansions in an arid sandy land. Catena, 227: Article 107098, 10.1016/j.catena.2023.107098.

15. McCarty, G.W., and Ritche, J.C. 2002. Impact of soil movement on carbon sequestration in agricultural

ecosystems. Advances in Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory, Measurements, and Monitoring Conference in Raleigh, North Carolina. Environment Pollution, 116(3): 423-30.

16. Mensah, S., Veldtman, R., Achille, E., Assogbadjo, R., Kakaï, G., and Seifert, T. 2016. Tree species diversity promotes aboveground carbon storage through functional diversity and functional dominance. Ecology Evolution, 6: 7546–7557.

17. Moghaddam, M.R. 2007 Rangeland and Rangeland. University of Tehran Press. 470 p. (In Persian)

18. Core Team, R. 2014. R: A Language and Environment for Statistical Computing (R Foundation for Statistical Computing, Vienna). Available at www.R-project.org/.

19. Rossier, L. 2011. Predicting spatial patterns of functional traits. MSC Thesis. University of Lausanne, 44 p.

20. Rawat, M., and Arunachalam, K. 2019. Associations of plant functional diversity with carbon accumulation in a temperate forest ecosystem in the Indian Himalayas. Ecological Indicator, 98: 861–868.

21. Shahrokh, S., Suri, M., Motamedi, J., and Eftekhari, A. 2017. Effectiveness of Contour Faro operation on soil carbon sequestration and biomass of Mahabad Caliphs rangelands. Iranian Journal of Range and Desert Research, 24 (1): 98-109 (In Persian).

22. Souri, M., Mahdavi, K., and Tarverdizadeh Sancari, S. 2017. Effects of mechanical improvement treatments on vegetation performance: Case study: Silvana rangelands in West Azerbaijan province. Iranian Journal of Range and Desert Research, 24 (2): 360-369. (In Persian)

23. Tahmasebi, P., Moradi, M., and Omidipour, R. 2017. Plant functional identity as the predictor of carbon storage in semi-arid ecosystems. Plant Ecology & Diversity, 10: 139–151.

24. Tahmourth, M., Jafari, M., Ahmadi, H., Azarnivand, H., and Nazari Samani, A. 2018. Quantitative evaluation of the effect of watershed management activities on carbon sequestration and storage in order to reduce climate change in Parrud watershed in Shahroud watershed, Eco Hydrology, 5 (1): 161-172. (In Persian)

25. Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., and Mosseler, A. 2009. Forest resilience, biodiversity, and climate change. A synthesis of the biodiversity/resilience/ stability relationship in forest ecosystems. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series no. 43, 67 p.

26. Thorsson, J., and Svavarsdottir., K. 2013. Soil carbon sequestration: A component of ecological restoration. Soil Carbon Sequestration, for climate, food security, and ecosystem services. International conference. Reykjavík, Iceland, 2729- May 2013. Book of Abstracts. Unpublished manuscript. 186 pp.

27. Yu, G., Lv, Z., and Liu, B. 2024. Functional diversity and carbon storage of plant community elevation patterns and carbon accumulation mechanisms in desert shrubland of Yanqi Hola Mountain, China. Ecological Indicator, 158: 11379.

28. Zuo, X., Zhou, X., and Lv, P. 2016. Testing Associations of Plant Functional Diversity with Carbon and Nitrogen Storage along a Restoration Gradient of Sandy Grassland. Frontiers in Plant Science, 7:189. doi: 10.3389/fpls.2016.00189.

29. Violle, C. 2007. Let the concept of trait be functional. Oikos, 116: 882-892.

30. Wardle, D.A., and Zackrisson, O. 2005. Effects of species and functional group loss on island ecosystem properties. Nature, 435:806–810.

نشریه

ترویج و توسعه آبخیزداری

Extension and Development of Watershed Management

Vol. 14, No. 52, Spring 2026

سال چهاردهم- شماره ۵۲- بهار ۱۴۰۵

Abstract

Effect of Mechanical Restoration Methods in Rangelands on Plant Diversity and Carbon Storage (Case study: Arangeh Watershed)

H. Farzi[1], Z. Jafarian[2]*, R. Tamartash[3], M.R. Tatian[4], M. Kargar[5] and J. Rodrigo Comino[6]

Received: 2025/12/10 Accepted: 2026/02/22

Plants, through their photosynthesis, are primarily responsible for the entry of carbon and complete its storage cycle in the ecosystem. It seems that differences in the quantitative and qualitative ability of plants at the individual level and, consequently, plant diversity at the community level are the most important factors in the differences in the ability of different communities to store carbon. The purpose of the present study was to investigate the effects of mechanical restoration methods on the relationship between carbon stocks and species and functional diversity indices in the Arangeh watershed of Alborz province. Mechanical methods included gabion chekdam, mortar rock dam, mortar embankment, and a control site. Vegetation sampling was carried out in 400 one-square-meter plots during the growing season using a systematic-random method. In each plot, were measured functional characteristics of plants, biomass of aerial and underground organs, and were calculated litter and their carbon sequestration. In each transect, two soil samples were collected from two depths, 80 soil samples totally. Species and functional diversity indices were calculated using Fdiversity software. To investigate the relationship between carbon stocks, species, and functional diversity indices, was used multivariate linear regression using R software version 3.1.1. The highest amount of plant carbon stock and total soil carbon sequestration was observed in the gabion treatment. Rao, evenness, Shannon, and functional diversity indices were influential in total ecosystem carbon (p=0.003, R2=0.68). The highest coefficient of determination (R2) of regression analysis in the mortar stone and mortar bed treatments related to soil carbon sequestration were 0.82 and 0.57, respectively, and in the gabion treatment related to biomass carbon was 0.72. Totally, the effect of watershed management activities on carbon sequestration is a function of management factors, climatic conditions, type of restoration operations, and physical and biological conditions of the soil. To determine the most effective factors, it is recommended to prepare accurate data with sufficient repetition, simultaneously with restoration and improvement projects.

Keywords: Carbon sequestration, Gabion chekdam, Mortar rock dam, Mortar embankment, Ecosystem function.

1 Ph.D. in Rangeland Science, Natural Resources Administration of Alborz Province

2. Professor in Rangeland engineering and science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, and corresponding Author: Email: Z.jafarian@sanru.ac.ir

3. Associate Professor in Rangeland engineering and science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

4. Associate Professor in Rangeland engineering and science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

5. PhD in Rangeland Science, Keshavarzi Jihad of Mazandaran province

6. Associate Professor in Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Facultad de Filosofía y Letras, Campus Universitario de Cartuja, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain