

ارزیابی همبستگی شاخص های تنوع با عملکردهای فردی و چندگانه اکوسیستم در مقیاس سیمای سرزمین

سمانه سادات محزونی کچی^{۱*}، پژمان طهماسبی^۲، عطاءالله ابراهیمی^۳

۱. دکتری علوم و مهندسی مرتع، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایان نامه:

sadatmahzooni@yahoo.com

۲. دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳. دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل-پژوهشی	الگوی سیمای سرزمین و تغییرات آن، بازتابی از اکولوژی محیط زیست است. عملکرد اکوسیستم به دلیل ناهمگنی های بیوفیزیکی یا مدیریتی و واکنش های حیاتی نسبت به این عوامل در سیمای سرزمین، متغیر است. مطالعه حاضر با هدف بررسی چگونگی اثر جنبه های متفاوت تنوع زیستی بر عملکردهای مختلف یک سیمای ناهمگن در زاگرس مرکزی صورت گرفت. بدین منظور از تصاویر گوگل ارث جهت طبقه بندی منطقه استفاده شد. نقشه طبقه بندی با لکه های متنوع و قرارگیری آنها در هفت کلاس متفاوت از نظر جامعه گیاهی تولید شد. از هر نوع لکه گیاهی ۴ الی ۵ لکه که توزیع مناسبی در سطح منطقه داشتند جهت آماربرداری انتخاب و بسته به اندازه هر لکه ابتدا ۵ الی ۱۰ ماکروپلات ۳۰*۳۰ مترمربعی به طور تصادفی- سیستماتیک مستقر شد. نمونه برداری از فاکتورهای پوشش و خاک با استفاده از ۳ پلات ۲*۲ مترمربعی در هر ماکروپلات مطابق با زمان اوج رشد گونه های گیاهی انجام شد. عملکرد اکوسیستم بر پایه ارزیابی مجموعه ای از شاخص های کلیدی عملکردی در بخش های گیاهی و خاکی، مورد کمی سازی قرار گرفت. به منظور برآورد چندعملکردی اکوسیستم (EMF)، مقادیر استاندارد شده عملکردهای مختلف با استفاده از روش Z-score محاسبه و میانگین آنها برای هر لکه با بهره گیری از بسته آماری "multifunc" در نرم افزار R 4.2.2 به عنوان شاخص یکپارچه چندعملکردی تعیین شد. در مرحله بعد استخراج شاخص های مختلف تنوع گونه ای، تنوع عملکرد و تنوع بتای عملکرد با استفاده از بسته های آماری "vegan"، "FD" و "betapart" در نرم افزار R انجام گرفت. در نهایت، با استفاده از بسته های آماری "ggplot2"، "ggpubr" و "ggcorrplot" در نرم افزار R اقدام به بررسی روابط رگرسیونی و همبستگی شد و ارتباطات موجود با تحلیل سطح معنی داری و مقدار ضریب تبیین (R^2) تعیین شد. نتایج نشان داد که عملکردهای اکوسیستم احتمالاً به ارزش ویژگی های عملکردی گونه های غالب آن بستگی دارد، هویت عملکردی گونه های غالب از طریق مکانیسم های مشابهی که عملکردهای فردی را افزایش می دهد، بر چندعملکردی نیز تاثیر می گذارد.
تاریخ های مقاله: دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۰ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۱۵	
واژگان کلیدی: لکه های گیاهی تنوع زیستی چندعملکردی اکوسیستم زاگرس مرکزی	

استناد دهی: محزونی کچی سمانه سادات، طهماسبی پژمان، ابراهیمی عطاء الله. ارزیابی همبستگی شاخص های تنوع با عملکردهای فردی و چندگانه اکوسیستم در مقیاس سیمای سرزمین. پژوهش های نوین در علوم منابع طبیعی، ۱۴۰۵، ۱ (۱): ۵۶-۷۰.

ناشر: انتشارات دانشگاه ملایر. DOI: <https://doi.org/10.22034/nrsj.2026.244191>

۱. مقدمه

پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بنیادی اکوسیستم‌های خشکی، حاصل برهم‌کنش پیچیده میان گرادیان‌های محیطی، محدودیت‌های بیوفیزیکی و مداخلات مدیریتی است و تغییرات آن می‌تواند بازتابی از دگرگونی‌های ساختاری و عملکردی اکوسیستم در مقیاس‌های مختلف مکانی باشد (۴۷). از این‌رو، تحلیل تغییرات ترکیب گونه‌ای و ویژگی‌های عملکردی گیاهان به‌عنوان رویکردی کارآمد برای تبیین نحوه پاسخ اکوسیستم‌ها به تغییرات محیطی و فشارهای انسانی مورد توجه گسترده قرار گرفته است (۴). در دهه‌های اخیر، تمرکز مطالعات اکولوژیک از توصیف الگوهای تنوع زیستی به درک نقش مکانیزم‌های زیربنایی آن در تنظیم فرآیندهای اکوسیستمی معطوف شده است؛ به‌گونه‌ای که شواهد تجربی نشان می‌دهد افزایش تنوع زیستی می‌تواند از طریق بهبود کارایی بهره‌برداری از منابع و تقویت نقش‌های عملکردی گونه‌ها، منجر به ارتقاء عملکرد اکوسیستم گردد (۳۶،۳۲). در این چارچوب، تنوع زیستی نه‌تنها به‌عنوان شاخصی از وضعیت اکولوژیک اکوسیستم مطرح است، بلکه به‌عنوان متغیری پیش‌بینی‌کننده برای تغییرات عملکردی اکوسیستم نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۶،۵).

با وجود اهمیت تنوع گونه‌ای در تبیین فرآیندهای اکولوژیکی، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که صرف تعداد گونه‌ها قادر به پیش‌بینی تغییرات عملکرد اکوسیستم نیست. در واقع، اختلافات عملکردی میان گونه‌ها که تعیین‌کننده توانایی هر گونه برای ایفای نقش‌های اکوسیستمی است، عامل اصلی تغییرات عملکردی محسوب می‌شود. در این راستا، تنوع عملکردی به‌عنوان شاخصی کلیدی از تنوع زیستی مطرح شده که بر اختلاف صفات عملکردی گونه‌ها و نقش آن‌ها در فرآیندهای اکوسیستم متمرکز است (۳۹،۸). برخلاف شاخص‌های کلاسیک تنوع که بر غنای گونه‌ای و فراوانی نسبی تأکید دارند، تنوع عملکردی ماهیت مشارکتی گونه‌ها در شبکه تعاملات اکولوژیکی را برجسته می‌نماید. همچنین، تنوع بتای عملکردی که بیانگر تغییرات مکانی در ترکیب صفات عملکردی است، توسط ناهمگنی زیستگاه و فرآیندهای مونتاژ جامعه شکل می‌گیرد و با بازآرایی ویژگی‌های عملکردی گونه‌ها، عملکرد اکوسیستم را تعدیل می‌کند (۴۰،۲۸). این الگوهای مکانی ناشی از تفاوت‌های محیطی و پراکنش گونه‌ها، می‌توانند ساختار و شدت تعاملات اکولوژیکی و فرآیندهای عملکردی را تحت تأثیر قرار دهند (۲۷،۱۶).

عملکرد اکوسیستم مفهومی چندبعدی است که فرآیندهایی نظیر تولید زیتوده، چرخه عناصر غذایی، پایداری و تعاملات زیستی را در بر می‌گیرد (۴۶،۲۴،۱۸). در سال‌های اخیر، رویکرد چندعملکردی اکوسیستم به‌عنوان چارچوبی برای ارزیابی همزمان چندین عملکرد اکولوژیک به‌کار گرفته شده است، زیرا عملکردهای مختلف ممکن است به‌صورت هم‌افزا (synergies) یا مبادله‌ای (trade-offs) با یکدیگر در تعامل باشند (۲). در شرایطی که هم‌افزایی میان عملکردها غالب باشد، افزایش تنوع زیستی می‌تواند به بهبود همزمان چندین فرآیند اکوسیستمی منجر شود، در حالی‌که در مواجهه با روابط مبادله‌ای، تقویت یک عملکرد ممکن است با کاهش عملکردهای دیگر همراه گردد. از این‌رو، تحلیل همزمان چندین عملکرد اکوسیستم نه‌تنها برای درک پایداری و عملکرد سیستم ضروری است، بلکه امکان شناسایی سازوکارهای پیچیده، وابستگی متقابل عملکردها و نقش کلیدی تنوع زیستی در تعدیل این روابط را فراهم می‌آورد (۲۳،۳). با وجود پیشرفت‌های اخیر، چگونگی ارتباط الگوهای تنوع زیستی به‌ویژه تنوع عملکردی با ساختار چندعملکردی اکوسیستم همچنان ناشناخته مانده و مطالعات یکپارچه برای آشکارسازی نقش ناهمگنی صفات عملکردی در پاسخ‌های چندگانه اکوسیستم کاملاً ضروری است.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تنوع عملکردی به‌طور مستقیم می‌تواند بر ساختار اکولوژیک و عملکردهای اکوسیستم تأثیر بگذارد. به‌طور خاص، مطالعه Ali (۱) نشان داد که تنوع عملکردی منجر به افزایش تنوع تاج‌پوشش درختان و بهبود زیتوده سطح زمین می‌شود که یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد اکوسیستم است. Chen و همکاران (۱۰) تأکید کردند که مخلوط گونه‌های گیاهی نه‌تنها تنفس میکروبی را افزایش می‌دهد، بلکه موجب افزایش زیتوده میکروبی و قارچی شده و نقش کلیدی تنوع گیاهی در حفظ عملکردهای اکوسیستم زیرزمینی را متمایز می‌کند. پژوهش Zirbel و همکاران (۵۲) نشان داد که تنوع عملکردی نسبت به سایر ابعاد تنوع زیستی، همبستگی مثبت و قوی‌تری با چندعملکردی اکوسیستم دارد که نشان‌دهنده اهمیت ویژگی‌های عملکردی در تقویت عملکردهای چندگانه اکوسیستم است. Wang و همکاران (۴۵) نیز عوامل مؤثر بر چندعملکردی اکوسیستم را در سطح جوامع شناسایی کرده و به‌ویژه بر نقش رطوبت خاک و تنوع عملکردی تأکید کردند. Liu و همکاران (۲۰) در مراتع آلبی نشان

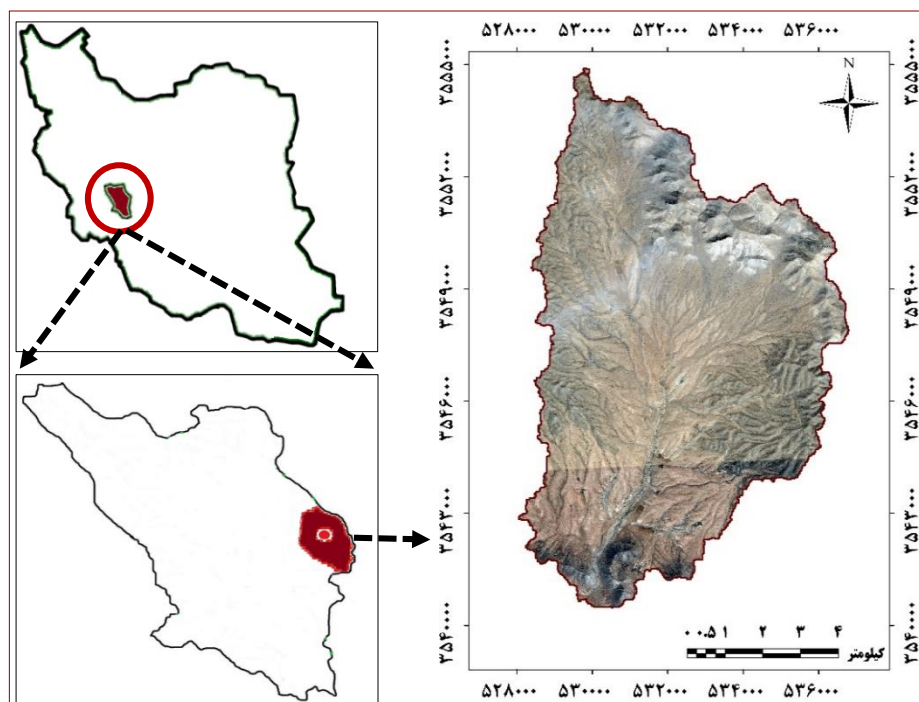
دادند که غنای گونه‌ای و شاخص‌های عملکردی دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با چندعملکردی اکوسیستم هستند که تأثیر کلیدی تنوع گونه‌ای و ویژگی‌های عملکردی در افزایش عملکردهای اکوسیستمی را برجسته می‌نماید. ناهمگنی‌های محیطی در مقیاس سیمای سرزمین به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در شکل‌دهی به تنوع زیستی و ساختار جوامع گیاهی شناخته می‌شود. تغییرات موضعی در ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و شرایط میکرواقلیمی موجب ظهور لکه‌های (Patches) گیاهی با ترکیب گونه‌ای و ویژگی‌های عملکردی متمایز می‌شوند که هرکدام نقش متفاوتی در انجام فرآیندهای اکولوژیک ایفا می‌نمایند. این ناهمگنی مکانی، منجر به ایجاد یک موزائیک اکولوژیک می‌شود که امکان شکل‌گیری تعاملات پیچیده میان گونه‌ها و فرآیندهای اکوسیستم را فراهم نموده و می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در تقویت یا تعدیل رابطه میان تنوع زیستی و عملکرد اکوسیستم ایفا کند. بر این اساس، ساختار مکانی جوامع گیاهی نه تنها بازتابی از شرایط محیطی و ناهمگنی زیستگاهی است، بلکه به‌عنوان عاملی مؤثر در شکل‌دهی و پایداری فرآیندهای اکوسیستمی نیز عمل می‌کند. از این‌رو، تحلیل ساختار مکانی جوامع گیاهی رویکردی اساسی برای تبیین ارتباط میان ابعاد مختلف تنوع زیستی و عملکردهای فردی و چندگانه اکوسیستم به‌شمار می‌آید.

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در مطالعه تنوع زیستی و عملکرد اکوسیستم، ارزیابی همزمان ابعاد مختلف تنوع شامل تنوع گونه‌ای، تنوع عملکردی و تنوع بتای عملکردی در ارتباط با عملکردهای فردی و چندگانه اکوسیستم، به‌ویژه در اکوسیستم‌های مرتعی نیمه‌خشک ایران، همچنان محدود است. افزون بر این، نقش ناهمگنی سیمای سرزمین در تعدیل این روابط، به‌طور نظام‌مند مورد توجه قرار نگرفته است، حال آنکه شواهد نظری حاکی از آن است که ساختار مکانی جوامع می‌تواند اثرات مستقیم و غیرمستقیم قابل‌توجهی بر عملکرد اکوسیستم داشته باشد. بر این اساس، انتخاب مراتع نیمه‌استپی زاگرس مرکزی به‌عنوان حوزه مطالعه، بستر مناسبی برای بررسی همزمان ابعاد مختلف تنوع زیستی در چارچوب ناهمگنی محیطی فراهم می‌کند و امکان تحلیل تعاملات پیچیده میان ساختار مکانی جوامع گیاهی و فرآیندهای عملکردی اکوسیستم را مهیا می‌سازد. لذا، پژوهش حاضر با تمرکز بر این اکوسیستم ناهمگن، در صدد ارائه شواهد تجربی برای تبیین روابط میان ابعاد مختلف تنوع زیستی، ساختار مکانی جوامع گیاهی و مکانیسم‌های تنظیم‌کننده عملکردهای اکوسیستم است.

۲. مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

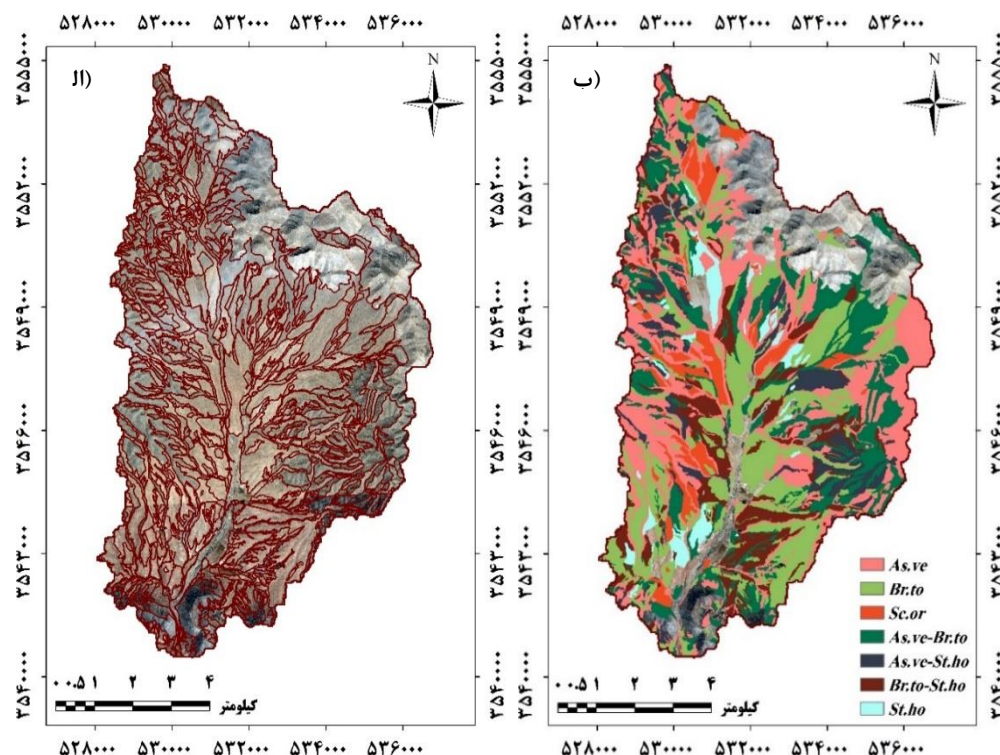
منطقه مورد مطالعه در یک سیمای طبیعی از مراتع نیمه‌استپی در رشته‌کوه زاگرس مرکزی در جنوب غربی ایران واقع شده است. این منطقه با مساحت ۷۷۱۲ هکتار در ۴/۶۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بروجن در استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد و در محدوده طول جغرافیایی ۵۱°۱۷' تا ۵۱°۲۳' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲°۰۰' تا ۳۲°۰۶' شمالی واقع شده است. از لحاظ توپوگرافی، منطقه به‌طور عمده مسطح بوده و تغییرات ارتفاعی آن بین ۲۲۴۸ تا ۲۳۷۳ متر از سطح دریا متغیر است شکل (۱). اقلیم منطقه معتدل و سرد با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد می‌باشد. میزان بارش سالانه به‌طور متوسط ۲۵۳ میلی‌متر و دمای میانگین سالانه ۱۰/۸ درجه سانتی‌گراد است. علی‌رغم بارندگی نسبتاً کم، مدیریت اصولی و مؤثر در این منطقه موجب شکل‌گیری پوشش گیاهی مناسب و متنوعی شده است که شامل گونه‌های غالب بوته‌ای و گندمیان چندساله نظیر *Astragalus verus*، *Stipa hohenackeriana* و *Bromus tomentellus* می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان چهارمحال و بختیاری و مرز منطقه

شناسایی و طبقه‌بندی لکه‌های گیاهی با بهره‌گیری از تصاویر گوگل ارث

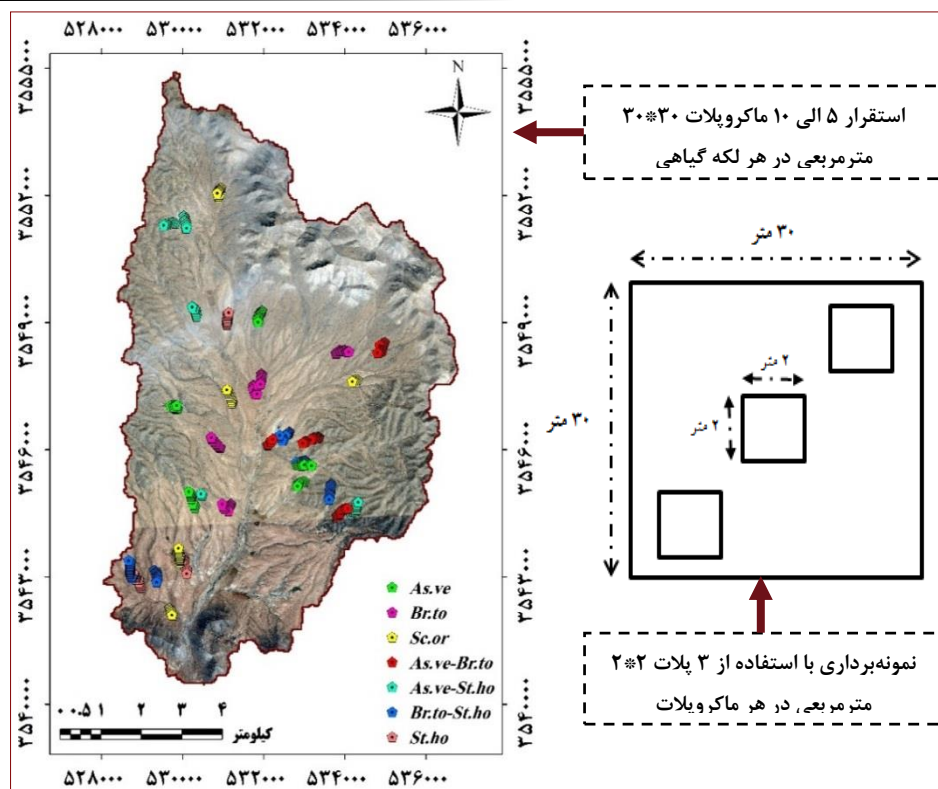
به‌منظور شناسایی و تفکیک لکه‌های گیاهی که به‌عنوان نواحی همگن از پوشش گیاهی شناخته می‌شوند، ابتدا نقشه رقومی از منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. برای این منظور از تصاویر گوگل ارث بهره‌گیری شد که به‌واسطه ویژگی‌های برجسته‌ای چون رنگ طبیعی عوارض، قابلیت نمایش سه‌بعدی و توانایی تفکیک دقیق آبراهه‌ها و جاده‌ها، امکان شناسایی و تمایز لکه‌ها از طریق تفسیر بصری را فراهم ساخت. سپس، تصویر رقومی به نرم‌افزار ArcMap 10.6.1 وارد شد تا مرز محدوده مورد مطالعه مشخص گردد. در این فرآیند، لکه‌ها بر اساس ویژگی‌های مشابه شامل رنگ، شکل، سایه، تن، بافت و الگو شناسایی شده و با ترسیم پلی-گون‌ها از یکدیگر متمایز شدند (۱۲). سپس، داده‌های میدانی و اطلاعات محلی برای حذف لکه‌هایی با کاربری انسانی یا ویژگی‌های ژئومورفولوژی متفاوت به‌کار گرفته شد تا تحلیل دقیق و سیستماتیک ساختار و الگوهای مکانی پوشش گیاهی محدود به لکه‌های کاملاً طبیعی باشد. در نهایت، لکه‌های گیاهی با اتکا بر غلبه گونه‌ها و روش فیزیونومیک که بر سیمای ظاهری گونه‌ها تمرکز دارد، طبقه‌بندی و به‌طور توصیفی نام‌گذاری شدند، رویکردی که امکان بررسی دقیق ترکیب گونه‌ها و الگوهای پراکنش در سطح منطقه را فراهم آورد (۱۷) (شکل ۲).



شکل ۲. (الف): شناسایی لکه های گیاهی و استخراج آن ها با ویژگی های ساختاری متفاوت به روش تفسیر بصری (ب): نقشه حاصل از طبقه بندی لکه های گیاهی بر روی تصویر گوگل ارث در منطقه مورد مطالعه

فرآیند نمونه برداری از پوشش گیاهی

پس از تعیین حدود تقریبی لکه های گیاهی، نمونه برداری از پوشش در زمان اوج رشد گونه ها (اواسط اردیبهشت تا اواخر خرداد) آغاز گردید. بدین منظور، از هر نوع لکه گیاهی، ۴ تا ۵ نمونه با توزیع مکانی مناسب و مبتنی بر مطالعات میدانی در سطح منطقه انتخاب شد. سپس، در هر نمونه بسته به وسعت لکه، ۵ تا ۱۰ ماکروپلات به ابعاد ۳۰*۳۰ متر به شیوه تصادفی-سیستماتیک استقرار یافت تا نمونه برداری همگن، قابل تکرار و دقیق انجام شود. نمونه برداری از فاکتورهای پوشش مانند درصد پوشش تاجی به تفکیک فرم رویشی گونه ها، لاشبرگ، خاک لخت و سنگ و سنگریزه با استفاده از ۳ پلات ۲*۲ متر در هر ماکروپلات انجام گرفت (۴۱). همچنین، تعداد کل گونه ها در هر لکه به عنوان غنای گونه ای ثبت شد. این روش، امکان گردآوری مجموعه داده ای دقیق و قابل تحلیل از ساختار و ترکیب گونه ها، الگوهای مکانی و پراکنش لکه ها را فراهم کرده و پایه ای مستحکم برای انجام تحلیل های آماری و ارزیابی های اکولوژیکی فراهم می آورد (شکل ۳).



شکل ۳. طرح نمونه‌برداری از فاکتورهای پوشش و توزیع پلات‌های نمونه‌برداری در هر یک از لکه‌های گیاهی

ارزیابی ویژگی‌های عملکردی گیاهان جهت کمی‌سازی تنوع عملکردی

به‌منظور کمی‌سازی شاخص‌های تنوع عملکردی و بازتاب توانمندی گونه‌ها در شکل‌دهی به فرآیندهای اکوسیستمی، علاوه بر اطلاعات درصد پوشش یا فراوانی گونه‌ها، ارزیابی ویژگی‌های عملکردی گیاهان نیز ضروری است (۳۵، ۱۳). در این راستا، حدود ۷۰-۸۰ درصد ترکیب گونه‌ای هر جامعه انتخاب شد تا نمایی جامع از ساختار عملکردی فراهم گردد. پس از تعیین ویژگی‌های کلیدی، برای هر ویژگی، ۲۰ نمونه از ۱۰ پایه گیاهی سالم و به‌خوبی رشدیافته واقع در محیط‌های با نور مناسب جمع‌آوری و اندازه‌گیری شدند (۲۵، ۱۵). ویژگی‌های مورد بررسی شامل ارتفاع گیاه (H)، شاخص سطح ویژه برگ (SLA)، محتوای ماده خشک برگ (LDMC)، محتوای نیتروژن برگ (LNC)، محتوای فسفر برگ (LPC) و فرم‌های رویشی رانکائز بود (۳۴).

برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای، تنوع عملکرد و تنوع بنای عملکرد

جهت کمی‌سازی ابعاد مختلف تنوع زیستی، ابتدا داده‌های درصد پوشش و فراوانی گونه‌ها در هر لکه استخراج و شاخص‌های تنوع گونه‌ای که شامل غنای گونه‌ای، یکنواختی شانون و تنوع شانون می‌باشد (۲۲) با استفاده از بسته آماری "vegan" (۳۱) در نرم‌افزار R 4.2.2 (۴۲) محاسبه شد. جهت ارزیابی شاخص‌های تنوع عملکردی، دو چارچوب مکمل مبتنی بر صفات شامل رویکرد تک‌ویژگی و چندویژگی به‌کار گرفته شد. در رویکرد تک‌ویژگی، شاخص میانگین وزنی جامعه (CWM) به‌عنوان نماینده ترکیب عملکردی جامعه، برای هر صفت گیاهی به‌صورت مستقل محاسبه گردید (۳۵). در رویکرد چندویژگی، شاخص‌های آنروپی رائو (Rao)، غنای عملکرد (FRic)، یکنواختی عملکرد (FEve)، واگرایی عملکرد (FDiv) و پراکندگی عملکرد (FDis) (۵۰) با تلفیق ماتریس‌های گونه در پلات و ویژگی در گونه و بهره‌گیری از بسته آماری "FD" در نرم‌افزار R 4.2.2 (۴۲) انجام شد. علاوه بر این، به‌منظور بررسی تغییرات مکانی ترکیب صفات عملکردی، تنوع بنای عملکرد از طریق شاخص‌های عدم تشابه عملکردی مبتنی بر Jaccard محاسبه شد (۴۳، ۶) و با استفاده از بسته آماری "betapart" برای ماکروپلات‌های متعدد درون لکه‌ها اجرا گردید تا الگوهای ناهمگنی عملکردی در مقیاس درون‌لکه‌ای به‌دقت توصیف شود (جدول ۱).

جدول ۱. شاخص های تنوع گونه ای، تنوع عملکرد و تنوع بتای عملکرد

شاخص ها	فرمول	توضیح پارامترها
شاخص های تنوع گونه ای		
غناي گونه ای (S)	$S = N$	: غناي گونه ای S : تعداد کل گونه های موجود در N
یکنواختی شانون	$J = \frac{H}{H_{max}} = \sum_{i=1}^s \frac{p_i \ln p_i}{\ln s}$	: شاخص یکنواختی شانون J : شاخص تنوع شانون H' : ماکزیمم شاخص تنوع Hmax' ام: نسبت افراد یا وفور گونه pi : تعداد گونه S
تنوع شانون	$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$	: تعداد کل افراد در نمونه n i: تعداد افراد در گونه ni ام: نسبت افراد یا وفور گونه Pi n: لگاریتم در پایه Ln
شاخص های تنوع عملکرد		
میانگین وزنی جامعه (CWM)	$CWM = \sum_{i=1}^s W_i X_i$	: تعداد کل گونه ها S i: فراوانی نسبی گونه Wi i: ارزش ویژگی گونه Xi
مربع آنتروپی رانو (Rao)	$d_{ij} = \sum_{t=1}^T (X_{tj} - X_{ti})^2$ $Rao = \sum_{i=1}^{s-1} \sum_{j>1}^s d_{ij} P_i P_j$	j و i: فاصله بین گونه های dij i: فراوانی نسبی گونه Pi j: فراوانی نسبی گونه Pj
غناي عملکرد (FRic)	نشان دهنده گسترش فضای ویژگی عملکردی توسط جامعه می باشد.	برای یک ویژگی به صورت محدوده مینیمم- ماکزیمم برای بیش از یک ویژگی به صورت حجمی در فضای ویژگی ها
یکنواختی عملکرد (FEve)	$FEve = \frac{\sum_{b=1}^{s-1} \min \left(PEW_b, \frac{1}{s-1} \right) - \frac{1}{s-1}}{1 - \frac{1}{s-1}}$	: یکنواختی وزنی جزئی PEWb
واگرایی عملکرد (FDiv)	$\Delta d = \sum_{i=1}^s W_i \times (dG_i - \overline{dG})$ $\Delta d = \sum_{i=1}^s W_i \times dG_i - \overline{dG} $ $FDiv = \frac{\Delta d + \overline{dG}}{\Delta d + \overline{dG}}$	i: فراوانی نسبی گونه Wi dG: میانگین فاصله اقلیدوسی هر یک از گونه ها
شاخص های تنوع بتای عملکرد		
روگشت مکانی تنوع گونه ای	$\beta_{TU} = \frac{2[\sum_{i<j} \min(b_{ij}, b_{ji})]}{[\sum_i S_i - S_T] + [\sum_{i<j} \min(b_{ij}, b_{ji})]}$	: روگشت مکانی تنوع گونه ای TU : تعداد گونه های موجود ST و Si T و ادر سایت

: تعداد گونه‌هایی که تنها b _{ij} و b _{ji} یافت می‌شوند. j و i در سایت‌های	(JTU)
الگوی آشیانه‌ای زیستگاه JNE :	الگوی آشیانه‌ای زیستگاه (JNE)
: تنوع بتای کل JAC	تنوع بتای (JAC کل)

ارزیابی عملکردهای فردی و چندگانه اکوسیستم

ارزیابی عملکرد اکوسیستم بر اساس تعدادی از عملکردهای گیاهی و خاکی وابسته به ساختار و جریان انرژی اکوسیستم انجام گرفت. از جمله عملکردهای گیاهی، زیتوده گیاهی (AGB) و فاکتور حفاظت خاک بودند. در ارزیابی زیتوده گیاهی، نمونه‌های گیاهی یک‌ساله و چندساله علفی از یک سانتی‌متری سطح خاک برداشت و پس از خشک کردن وزن‌کشی شدند (۷). زیتوده گیاهان بوته‌ای نیز با استفاده از تعیین شاخص اندازه‌گیری شد (۴۱،۳۳). فاکتور حفاظت خاک بر اساس درصد پوشش گیاهی برآورد شد که نشان‌دهنده تاثیر آن در کاهش فرسایش و حفظ مواد مغذی خاک است. در بخش خاک، نیتروژن کل خاک به روش کج‌لدال (۱۴)، کربن کل (TEC)، که شامل کربن زیتوده روزمینی، لاشبرگ و خاک است، به ترتیب با روش‌های استاندارد بین‌المللی (۳۰،۲۹)، احتراق و روش والکلی-بلک برآورد شد (۴۴). تنفس میکروبی خاک (SR) از طریق دی‌اکسیدکربن حاصل از فعالیت‌های میکروبی ارزیابی شد (۵۱،۴۸). در نهایت، زیتوده میکروبی به‌عنوان شاخصی از سلامت و حاصل‌خیزی خاک با استفاده از روش تخمینی تنفس ناشی از سوبسترا اندازه‌گیری شد (۴۹،۳۸،۳۷).

جهت محاسبه چندعملکردی (EMF)، از رویکرد میانگین استفاده شد که در آن مقدار متوسط عملکردهای مختلف اکوسیستم به‌عنوان شاخص چندعملکردی تعیین می‌شود (۲۳،۱۹). در این رویکرد، ابتدا عملکردهای موجود در پوشش گیاهی و خاک با استفاده از آزمون Z-score بین صفر و یک استاندارد شدند. سپس، میانگین مقادیر استاندارد شده این عملکردها برای هر لکه با استفاده از بسته آماری "multifunc" در نرم‌افزار R 4.2.2 محاسبه گردید (۲۱).

۳. نتایج

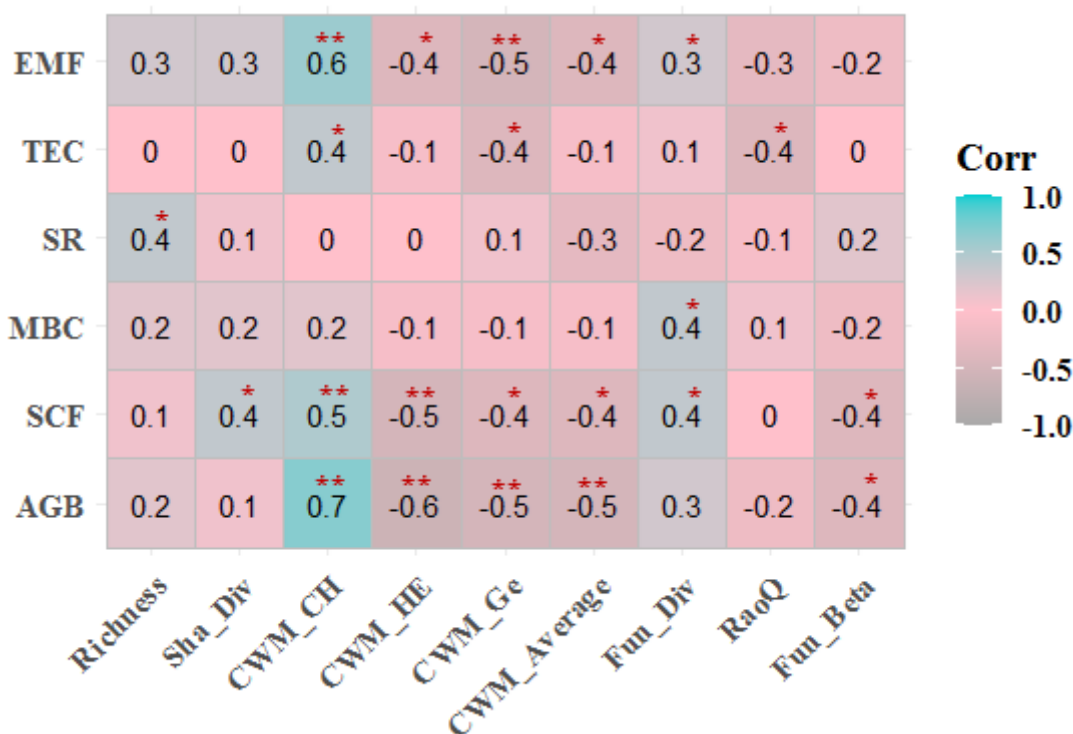
تحلیل داده‌ها نشان داد که شاخص‌های تنوع عملکردی و فرم‌های رویشی گیاهی تأثیر قابل‌توجهی بر عملکردهای فردی اکوسیستم دارند. زیتوده گیاهی به‌طور معنی‌داری با میانگین وزنی فرم رویشی همی‌کریپتوفیت‌ها کاهش یافت ($R^2=0.34$, $P<0.001$ value)، درحالی‌که میانگین وزنی فرم رویشی ژئوفیت‌ها ($R^2=0.23$, $P\text{-value}=0.005$)، میانگین تک‌ویژگی‌ها (CWM-) ($R^2=0.23$, $P\text{-value}=0.005$) و تنوع بتای عملکرد ($R^2=0.15$, $P\text{-value}=0.03$) نیز اثر کاهنده مشابهی ایجاد کردند. در مقابل، میانگین وزنی فرم رویشی کامافیت‌ها با افزایش معنی‌دار زیتوده رابطه مثبت و چشم‌گیری نشان داد ($R^2=0.55$, $P<0.001$ value)، که اهمیت گونه‌های چندساله و نقش کلیدی آن‌ها را در تقویت تولید زیتوده و حفظ ساختار تاج‌پوشش گیاهان برجسته می‌کند.

از سوی دیگر، فاکتور حفاظت خاک نیز روابط متفاوتی با شاخص‌های تنوع نشان داد. تنوع شانون ($R^2=0.13$, $P\text{-value}=0.04$)، میانگین وزنی فرم رویشی کامافیت‌ها ($R^2=0.26$, $P\text{-value}=0.002$) و واگرایی عملکرد ($R^2=0.12$, $P\text{-value}=0.05$) موجب افزایش معنی‌دار حفاظت خاک شدند. این در حالی است که میانگین وزنی فرم رویشی همی‌کریپتوفیت‌ها ($R^2=0.23$, $P\text{-value}=0.005$)، میانگین وزنی فرم رویشی ژئوفیت‌ها ($R^2=0.15$, $P\text{-value}=0.03$)، میانگین تک‌ویژگی‌ها (CWM-Average) ($R^2=0.16$, $P<0.001$ value).

value=0.02) و تنوع بتای عملکرد ($R^2=0.12$, P-value=0.04) اثر کاهنده بر این شاخص داشتند. این نتایج بیانگر نقش تعیین کننده و حیاتی ترکیب ویژگی های عملکردی گونه ها و ساختار تنوع در حفظ ثبات خاک و تقویت پایداری فرآیندهای اکوسیستمی است.

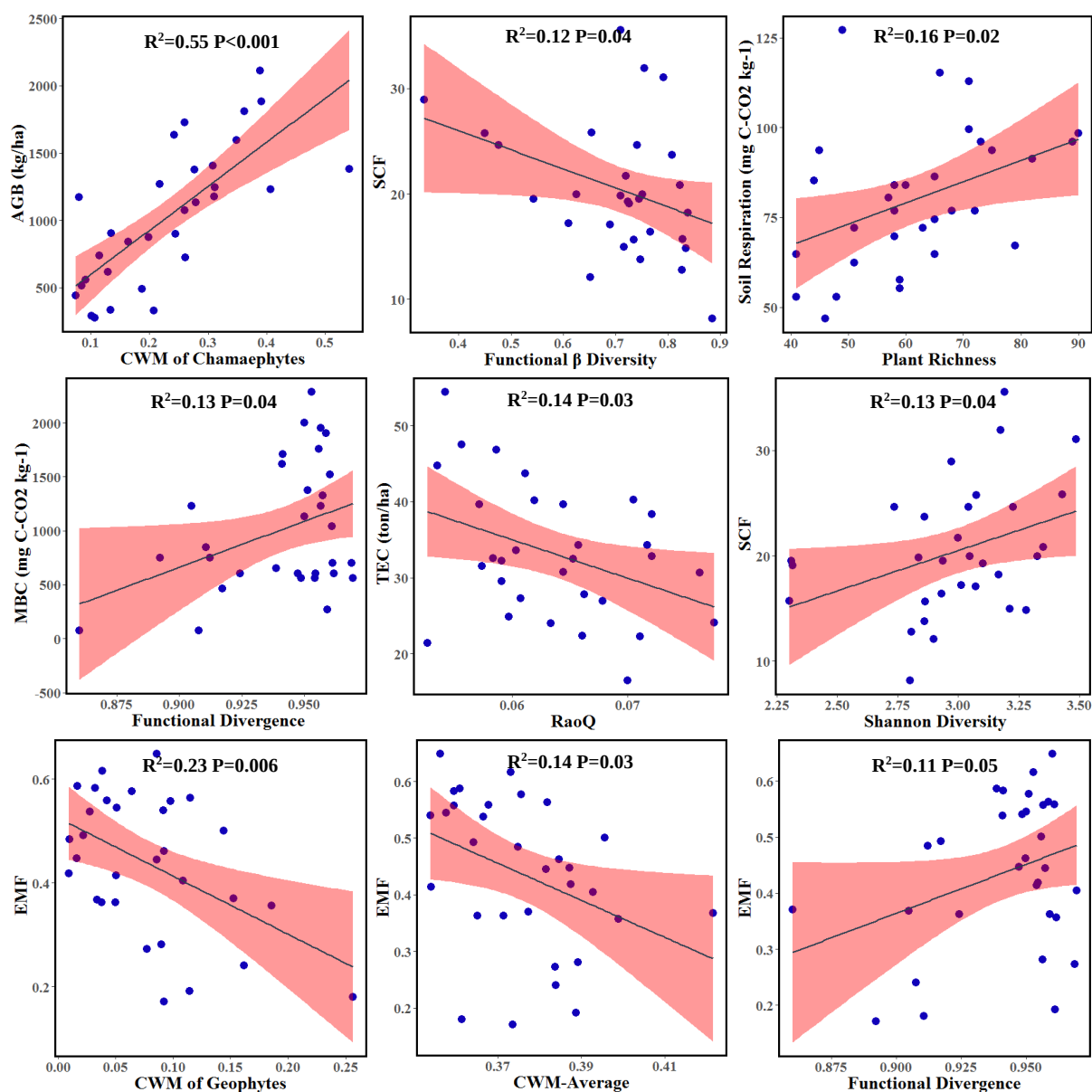
بررسی های مربوط به کربن کل اکوسیستم نشان داد که میانگین وزنی فرم رویشی کامفیت ها ($R^2=0.17$, P-value=0.02) به طور مثبت و معنی داری میزان کربن کل را تعیین کرد. در حالی که میانگین وزنی فرم رویشی ژئوفیت ها ($R^2=0.15$, P-value=0.02) و شاخص آنترپپی رانو ($R^2=0.14$, P-value=0.03) اثر منفی و قابل توجهی بر این شاخص به جا گذاشتند. این نتایج بیانگر نقش متفاوت گونه ها و تنوع عملکردی در ذخیره کربن زیستی و تجمع ماده آلی اکوسیستم است. افزون بر این، زیتوده میکروبی به طور مثبت و معنی داری با واگرایی عملکرد افزایش یافت ($R^2=0.13$, P-value=0.04) و غنای گونه ای ($R^2=0.16$, P-value=0.02) نیز رابطه مثبت و قابل ملاحظه ای با تنفس میکروبی نشان داد. این یافته ها اهمیت تنوع گونه ای و ویژگی های عملکردی در پشتیبانی از فرآیندهای زیرسطحی اکوسیستم را برجسته می کند.

در نهایت، نتایج تحلیل چندعملکردی اکوسیستم حاکی از اثر منفی میانگین وزنی فرم رویشی همی کریپتوفیت ها ($R^2=0.14$, P-value=0.03)، میانگین وزنی فرم رویشی ژئوفیت ها ($R^2=0.23$, P-value=0.006) و میانگین تک ویژگی ها (CWM-) ($R^2=0.14$, P-value=0.03) بر چندعملکردی بود، حال آنکه با میانگین وزنی فرم رویشی کامفیت ها ($R^2=0.41$, P-value<0.001) و واگرایی عملکرد ($R^2=0.11$, P-value=0.05) به طور چشم گیری افزایش یافت. این الگوها نشان می دهند که نه تنها تنوع عملکردی، بلکه ترکیب گونه ای و تسلط فرم های رویشی خاص، نقش کلیدی در تقویت عملکردهای هم افزا و تعدیل روابط مبادله ای میان عملکردها دارد (شکل ۴ و ۵).



شکل ۴. همبستگی بین شاخص های تنوع با عملکردهای فردی و چندگانه (* و **) به ترتیب بیانگر تفاوت معنی دار در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ درصد و عدم وجود ستاره بیانگر عدم اختلاف معنی دار است)

عملکردهای اکوسیستم (AGB): زیتوده گیاهی، SCF: فاکتور حفاظت خاک، MBC: زیتوده میکروبی، SR: تنفس میکروبی، TEC: کربن کل اکوسیستم، EMF: چندعملکردی اکوسیستم) و شاخص های تنوع (Richness: غنای گونه ای، Sha_Div: تنوع شانون، CWM_CH: فرم رویشی کامفیت ها، CWM_HE: فرم رویشی همی کریپتوفیت ها، CWM_Ge: فرم رویشی ژئوفیت ها، CWM_Average: میانگین تک ویژگی ها، Fun_Div: واگرایی عملکرد، RaoQ: شاخص آنترپپی رانو، Fun_Beta: تنوع بتای عملکرد)



شکل ۵. رگرسیون خطی بین شاخص‌های تنوع با عملکردهای فردی و چندگانه

۴. بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات عملکرد اکوسیستم در مقیاس سیمای سرزمین بیش از آنکه تابع تغییرات در غنای گونه‌ای باشد، به ترکیب ویژگی‌های عملکردی و هویت فرم‌های رویشی غالب وابسته است. این الگو بیانگر آن است که ساختار عملکردی جوامع گیاهی از طریق تنظیم نحوه بهره‌برداری از منابع، الگوهای تخصیص زیتوده و مسیرهای گردش ماده و انرژی، نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل فرآیندهای اکوسیستمی دارد. در واقع، غالب بودن فرم‌های رویشی خاص می‌تواند مسیر جریان انرژی و ماده را در اکوسیستم تغییر دهد و از طریق اثرات مستقیم بر تولید زیتوده و اثرات غیرمستقیم بر فرآیندهای خاک، الگوی عملکردی اکوسیستم را بازآرایی کند. این موضوع بیانگر آن است که ناهمگنی محیطی موجود در لکه‌های گیاهی با ایجاد ترکیب‌های متفاوتی از صفات عملکردی، سبب شکل‌گیری پاسخ‌های عملکردی متنوع در اکوسیستم شده است.

رابطه مثبت و معنی دار فرم های رویشی کامافیت ها با زیتوده گیاهی و کربن کل اکوسیستم نشان می دهد که گونه های بوته ای چندساله به دلیل بر خورداری از استراتژی های رشد محافظه کارانه، طول عمر بیشتر و توسعه سیستم ریشه ای پایدارتر، توانایی بالاتری در تثبیت منابع و تجمع ماده آلی در دوره های زمانی طولانی تر داشته و نوسانات محیطی را بهتر تعدیل می کنند. در مقابل، اثر منفی همی کریپتوفیت ها و ژئوفیت ها بر زیتوده را می توان به چرخه زیستی کوتاه تر، نرخ بالاتر تجزیه بقایا و وابستگی بیشتر این گونه ها به شرایط رطوبتی فصلی نسبت داد. چنین تفاوت هایی نشان می دهد که تغییر در ترکیب فرم های رویشی می تواند ظرفیت تولیدی اکوسیستم را از طریق تغییر در استراتژی های تخصیص منابع تنظیم نماید (۳۹،۲۵).

نتایج مربوط به شاخص حفاظت خاک نشان داد که افزایش تنوع گونه ای و واگرایی عملکردی موجب تقویت پایداری سطح خاک شده است. این الگو را می توان در چارچوب فرضیه مکملیت آشیان های اکولوژیک تفسیر کرد؛ به طوری که حضور گونه هایی با صفات مورفولوژیک و عملکردی متفاوت، موجب افزایش پیچیدگی ساختار پوشش گیاهی و بهبود پوشش سطح خاک می شود. افزایش تنوع در ویژگی های مورفولوژیک و معماری تاج پوشش، منجر به کاهش انرژی بر خورد قطرات باران و در نتیجه کاهش فرسایش می گردد. در مقابل، افزایش سهم گونه هایی با صفات عملکردی مشابه می تواند به هم پوشانی استفاده از منابع و کاهش کارایی تثبیت خاک منجر شود که در نهایت اثر منفی بر شاخص حفاظت خاک خواهد داشت. در بخش فرآیندهای زیرزمینی، ارتباط مثبت تنوع گونه ای و واگرایی عملکردی با شاخص های میکروبی نشان داد که تغییرات ترکیب عملکردی گونه ها می تواند از طریق کیفیت و کمیت ورودی های آلی، فعالیت زیستی خاک را تنظیم کند. گونه هایی با ویژگی های عملکردی متفاوت، بقایای گیاهی با ترکیب شیمیایی متنوع تری تولید می کنند که این امر موجب افزایش تنوع منابع کربنی در دسترس میکروارگانیسم ها می شود. در نتیجه، فعالیت تنفسی و زیتوده میکروبی افزایش یافته و فرآیندهای چرخه عناصر غذایی تقویت می گردد. این یافته ها بیانگر آن است که پیوند میان تنوع عملکردی گیاهان و عملکردهای زیستی خاک یکی از مهم ترین مسیرهای اثر گذاری تنوع زیستی بر عملکرد اکوسیستم محسوب می شود. تحلیل چند عملکردی اکوسیستم نشان داد که اثر ترکیب صفات عملکردی گونه ها بر هم زمانی عملکردهای اکوسیستم از اثر هر عملکرد منفرد قوی تر است. افزایش چند عملکردی در حضور فرم های رویشی خاص و واگرایی عملکردی بیانگر آن است که هم زمانی عملکردهای اکوسیستم زمانی تقویت می شود که گونه ها از نظر استراتژی های بهره برداری از منابع مکمل یکدیگر باشند. در چنین شرایطی، رقابت کاهش یافته و استفاده از منابع در ابعاد زمانی و مکانی مختلف گسترش می یابد (۱۱،۹). این نتیجه بیانگر آن است که چند عملکردی اکوسیستم بیش از آنکه تابع تعداد گونه ها باشد، به نحوه سازمان یافتگی صفات عملکردی در جامعه وابسته است. چنین نتیجه ای با مطالعاتی که تنوع عملکردی را عامل کلیدی در کنترل چند عملکردی اکوسیستم معرفی کرده اند (۵۲،۴۵،۲۰،۱۰)، همخوانی دارد.

یکی از مهم ترین یافته های این پژوهش نقش ناهمگنی مکانی لکه های گیاهی در تقویت روابط میان تنوع و عملکرد بود. ناهمگنی محیطی با ایجاد گرادین های متفاوت خاکی و رطوبتی، سبب شکل گیری ترکیب های متنوعی از صفات عملکردی در مقیاس سیمای سرزمین شده است. این ساختار موزائیکی امکان استقرار گونه هایی با استراتژی های متفاوت را فراهم نموده و دامنه پاسخ های عملکردی اکوسیستم را افزایش داده است. بنابراین، درک روابط تنوع- عملکرد بدون در نظر گرفتن ساختار مکانی جوامع گیاهی می تواند منجر به ساده سازی بیش از حد فرآیندهای اکولوژیکی گردد.

نتایج این مطالعه نشان داد که تنوع عملکردی و ترکیب ویژگی های عملکردی گونه ها نقش تعیین کننده ای در بهبود عملکرد اکوسیستم ها دارند. برخلاف تأکیدات معمول بر غنای گونه ای، این تحقیق نشان داد که ویژگی های عملکردی گونه ها و نحوه ترکیب آن ها در جامعه گیاهی تأثیر بیشتری بر فرآیندهای اکوسیستم دارند. گونه های چندساله با استراتژی های رشد پایدار و گونه های یک ساله با ویژگی های عملکردی متنوع، موجب بهبود پایداری خاک و افزایش زیتوده گیاهی شدند. همچنین، این مطالعه تأکید کرد که ناهمگنی مکانی لکه ها تأثیر عمیقی بر ترکیب و عملکرد گونه ها دارد و باعث می شود که پاسخ های اکوسیستمی پیچیده تر و متنوع تر باشند. به طور کلی، این پژوهش بر لزوم توجه به ترکیب عملکردی گونه ها و ساختار مکانی سیمای سرزمین در مدیریت و حفاظت از اکوسیستم ها تأکید دارد و نشان می دهد که چنین رویکردهایی می توانند در پایداری و کارایی اکوسیستم ها نقش حیاتی ایفا کنند.

منابع

1. Ali A, 2019, Forest stand structure and functioning: Current knowledge and future challenges, *Ecological Indicators*, 98, 665-677.
2. Allan E, et al, 2013, A comparison of the strength of biodiversity effects across multiple functions, *Oecologia*, 173, 223-237.
3. Alsterberg C, et al, 2017, Habitat diversity and ecosystem multifunctionality the importance of direct and indirect effects, *Sci. Adv*, 3, e1601475.
4. Asadi H, Esmailzadeh O, Hosseini S.M, Asri Y, & Zare H, 2016, Application of Cocktail method in vegetation classification, *Taxonomy and Biosystematics*, 8(28), 21-38.
5. Balvanera P, Siddique I, Dee L, Paquette A, Isbell F, Gonzalez A, et al, 2013, Linking biodiversity and ecosystem services: current uncertainties and the necessary next steps, *Bioscience*, 64, 49-57.
6. Baselga A, Orme D, Villeger S, et al, 2017, Partitioning beta diversity into turnover and nestedness components, R package version 1.3.
7. Bonham C.D, 2013, Measurements for terrestrial vegetation, John Wiley & Sons.
8. Cadotte M.W, 2011, The new diversity: management gains through insights into the functional diversity of communities, *Journal of Applied Ecology*, 48(5), 1067-1069.
9. Chanteloup P, & Bonis A, 2013, Functional Diversity in Root and above-Ground Traits in a Fertile Grassland Shows a Detrimental Effect on Productivity, *Basic and applied ecology*, 14(3), 208-216.
10. Chen C, Chen H.Y.H, Chen X, & Huang Z, 2019, Meta-analysis shows positive effects of plant diversity on microbial biomass and respiration, *Nature communications*, 10, 1332.
11. Conti G, & Díaz S, 2013, Plant functional diversity and carbon storage-an empirical test in semi-arid forest ecosystems, *Journal of Ecology*, 101(1), 1828.
12. Duffy J.P, Pratt L, Anderson K, Land P.E, & Shutler J.D, 2018, Spatial assessment of intertidal seagrass meadows using optical imaging systems and a lightweight drone, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 200, 169-180.
13. Esler K, & Rebelo A, 2014, Quantifying Functional Biodiversity.
14. Estefan G, Rolf S, & John R, 2013, Methods of Soil, Plant, and Water Analysis, A manual for the West Asia and North Africa region, 170-176.
15. Finegan B, Peña-Claros M, de Oliveira A, Ascarrunz N, Bret-Harte M.S, Carreño-Rocabado G, Casanoves F, Díaz S, Eguiguren Velepucha P, Fernandez F, & Licona J.C, 2015, Does functional trait diversity predict above-ground biomass and productivity of tropical forests? Testing three alternative hypotheses, *Journal of Ecology*, 103(1), 191201.
16. Hautier Y, Isbell F, Borer E.T, Seabloom E.W, Harpole W.S, Lind E.M, MacDougall A.S, Stevens C.J, Adler P.B, Alberti J, Bakker J.D, et al, 2018, Local loss and spatial homogenization of plant diversity reduce ecosystem multifunctionality, *Nature Ecology & Evolution*, 2(1), 50-56.
17. Küchler A.W, & Zonneveld I.S, 2012, Vegetation mapping: Springer Netherlands, 632 p.
18. Lavorel S, Karl G, Pene lope L, Marie-Pascale C, Denys G, Jacky G, Gilles P, & Rolland D, 2011, Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services, *Journal of Ecology*, 99, 135-147.
19. Lefcheck J.S, et al, 2015, Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats, *Nat. Commun*, 6, 6936.
20. Liu M, Zhang G, Yin F, Wang S, & Li L, 2022, Relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality along the elevation gradient in alpine meadows on the eastern Qinghai Tibetan plateau, *Ecological Indicators*, 141, 109097.
21. Maestre F.T, Castillo-Monroy A.P, Bowker M.A, & Ochoa-Hueso R, 2012, Species richness effects on ecosystem multifunctionality depend on evenness, composition and spatial pattern, *Journal of Ecology*, 100(2), 317-330.

22. Magurran A.E, 2013, *Ecological Diversity and Its Measurement*, Springer Science & Business Media. 179 p.
23. Maning P, van der Plas F, Soliveres S, Allan E, Fernando T.M, Mace G, Whittingham M.J, & Fischer M, 2018, Redefining ecosystem multifunctionality, *Nature Ecology & Evolution*. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 427-436.
24. McLaren J.R, & Turkington R, 2010, Ecosystem properties determined by plant functional group identity, *Journal of Ecology*, 98(2), 459-469.
25. Mensah S, du Toit B, & Seifert T, 2018, Diversity-biomass relationship across forest layers: implications for niche complementarity and selection effects, *Oecologia*, 187(3), 783795.
26. Meyer S.T, et al, 2017, Biodiversity-multifunctionality relationships depend on identity and number of measured functions, *Nature Ecology & Evolution*, doi.org/10.1038/s41559-017-0391-4.
27. Mokany K, Thomson J.J, Lynch A.J.J, Jordan G.J, & Ferrier S, 2015, Linking changes in community composition and function under climate change, *Ecol, Appl*, 25(8), 2132-2141.
28. Mori A.S, Isbell F, & Seidl R, 2018, β -diversity, community assembly, and ecosystem functioning, *Trends in ecology & evolution*, 33(7), 549-564.
29. Nizami S.M, 2012, The inventory of the carbon stocks in sub-tropical forests of Pakistan for reporting under Kyoto Protocol, *Journal of Forestry Research*, 23(3), 377-384.
30. Nizami S.M, Mirza S.N, Livesley S, Arndt S, Fox J.C, Khan I.A, & Mahmood T, 2009, Estimating carbon stocks in sub-tropical pine (*Pinus roxburghii*) forests of Pakistan, *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 46(4), 266-270.
31. Oksanen J, Blanchet F.G, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlinn D, Minchin P.R, O'Hara R.B, Simpson G.L, Solymos P, & Stevens M.H.H, 2018, *Vegan: community ecology package*, R package version, 2, 5-2.
32. Omidipour R, Ebrahimi A, Tahmasebi P, & Faramarzi M, 2019, Investigating the relationship between stability and plant functional diversity of rangeland ecosystems along the productivity gradient in arid and semi-arid regions, *PhD Thesis in Natural Resources, Rangeland Management*, Shahrekord University, 162 p.
33. Omidipour R, Tahmasebi P, Faizabadi M.F, Faramarzi M, & Ebrahimi A, 2021, Does β diversity predict ecosystem productivity better than species diversity? *Ecological Indicators*, 122, 107212.
34. PerezHarguindeguy N, Diaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, BretHarte M.S, Cornwell W.K, Craine J.M, & Gurvich D.E, 2013, New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide, *Aust. J. Bot*, 61, 167-234.
35. Pla L, Casanoves F, & Di Rienzo J, 2011, *Quantifying functional biodiversity*, Springer Science & Business Media, USA, 109 p.
36. Rader R, Birkhofer K, Schmucki R, Smith H.G, Stjernman M, & Lindborg R, 2014, Organic farming and heterogeneous landscapes positively affect different measures of plant diversity, *Journal of Applied Ecology*, 51, 1544-1553.
37. Raiesi F, & Sadeghi E, 2019, Interactive effect of salinity and cadmium toxicity on soil microbial properties and enzyme activities, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168, 221-229.
38. Raiesi F, Razmkhah M, & Kiani S, 2018, Salinity stress accelerates the effect of cadmium toxicity on soil N dynamics and cycling: Does joint effect of these stresses matter? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 153, 160-167.
39. Roscher C, Schumacher J, Gubsch M, Lipowsky A, Weigelt A, Buchmann N, Schmid B, & Schulze E.D, 2012, Using Plant Functional Traits to Explain Diversity-Productivity Relationships, *PLoS ONE*, 7(5), e36760.
40. Santoandré S, Filloy J, Zurita G.A, & Bellocq M.I, 2019, Taxonomic and functional β -diversity of ants along tree plantation Chrono sequences differ between contrasting biomes, *Basic and Applied Ecology*, 41, 1-12.
41. Tahmasebi P, Moradi M, & Omidipour R, 2017, Plant Functional Identity as the Predictor of Carbon Storage in Semi-Arid Ecosystems, *Plant Ecology & Diversity*, 10(2-3), 139-151.
42. Team R.C, 2020, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

43. Villéger S, Grenouillet G, & Brosse S, 2013, Decomposing functional β -diversity reveals that low functional β -diversity is driven by low functional turnover in European fish assemblages, *Global Ecology and Biogeography*, 22(6), 671-681.
44. Walkley A, & Black I.A, 1934, An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil science*, 37(1), 29-38.
45. Wang S, Isbell F, Deng W, Hong P, Dee L.E, Thompson P, & Loreau M, 2021, How complementarity and selection affect the relationship between ecosystem functioning and stability, *Ecology*, 0(0), e03347.
46. Willemen L, Hein L, van Mensvoort M.E.F, & Verburg P.H, 2010, Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region, *Ecological Indicators*, 10, 62-73.
47. Wulder M.A, Coops N.C, Roy D.P, White J.C, & Hermosilla T, 2018, Land cover 2.0, *International Journal of Remote Sensing*, 39(12), 4254-4284.
48. Xu Y, Seshadri B, Sarkar B, Wang H, Rumpel C, Sparks D, Farrell M, Hall T, Yang X, & Bolan N, 2018, Biochar modulates heavy metal toxicity and improves microbial carbon use efficiency in soil, *Science of the Total Environment*, 621, 148-159.
49. Xu Y, Seshadri B, Bolan N, Sarkar B, Ok Y.S, Zhang W, Rumpel C, Sparks D, Farrell M, Hall T, & Dong Z, 2019, Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals, *Environment International*, 125, 478-488.
50. Yuan Z, Ali A, Wang S, Wang X, Lin F, Wang Y, Fang S, Hao Z, Loreau M, & Jiang L, 2019, Temporal stability of aboveground biomass is governed by species asynchrony in temperate forests, *Ecological Indicators*, 107, 105661.
51. Zhan J, Li T, Zhang X, Yu H, & Zhao L, 2018, Rhizosphere characteristics of phytostabilizer *Athyrium wardii* (Hook.) involved in Cd and Pb accumulation, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 892-900.
52. Zirbel C.R, Grman E, Bassett T, Brudvig L.A, 2019, Landscape context explains ecosystem multifunctionality in restored grasslands better than plant diversity, *Ecology*, 100(4), e02634.

Evaluation of the Correlation between diversity Indices and Individual and Multiple Ecosystem Functions at the Landscape Scale

Samaneh Sadat Mahzooni Kachapi^{*1}, Pejman Tahmasebi², Ataollah Ebrahimi³

1. D. Rangeland Science and Engineering, Department of Nature engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. (sadatmahzooni@yahoo.com)
2. Associate Prof., Department of Nature engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
3. Associate Prof., Department of Nature engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article type:

Research Full Paper

2026; Vol 1, Issue 1

Article History:

Received: 09.02.2026

Revised: 09.03.2026

Accepted: 10.04.2026

Keywords:

Vegetation Patches

Biodiversity

Ecosystem

Multifunctionality

Central Zagros

The pattern of the landscape and its corresponding changes is a reflection of environmental ecology. Ecosystem function varies due to biophysical or management heterogeneity and vital responses to these factors in the landscape. The present study aimed to investigate the effect of different aspects of biodiversity on various functions of a heterogeneous landscape in the Central Zagros. For this purpose, Google Earth images were used to classify the area. This has led to producing classification maps with various patches and placing them in seven different classes in the plant community. Then, 4 to 5 patches of each type of plant patches that had a proper distribution in the area were selected for statistics, and depending on the size of each patch, the first 5 to 10 macroplots of 30*30 m² were established randomly systematically. Sampling of cover and soil factors was done using 3 plots of 2*2 m² in each macroplot according to the peak growth time of plant species. Ecosystem functioning was quantified based on key performance indicators of plant and soil components. To estimate ecosystem multifunctionality (EMF), standardized values of various performance indicators were calculated using the Z-score method, and their average for each patch was determined as a unified multifunctionality index using the "multifunc" package in R 4.2.2. In the next step, different indices of species diversity, functional diversity, and functional β diversity were extracted using the statistical packages "vegan", "FD" and "betapart" in R software. Finally, using the statistical packages "ggplot2", "ggpubr" and "ggcorrplot" in R software, regression and correlation relationships were investigated and the existing relationships were determined by analyzing the significance level and the value of the explanation coefficient (R^2). The results showed that ecosystem functions likely depend on the value of the functional traits of its dominant species. Also, the functional identity of the dominant species influences multifunctionality through similar mechanisms that enhance individual functions.

Cite this article: Mahzooni Kachapi S. S., P. A.Tahmasebi. Ebrahimi. Evaluation of the Correlation between diversity Indices and Individual and Multiple Ecosystem Functions at the Landscape Scale. Journal of New Research in Natural Resources sciences, 2026, 1 (1): 56-70.