



برآورد شاخص تنوع گونه‌ای چوبی با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی و تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: جنگل‌های مریوان)

مهتاب پیرباوقار*

^۱دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی دکتر هدایت غضنفری، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱)

چکیده

مقدمه: آگاهی از پراکنش مکانی تنوع گونه‌های گیاهی برای مدیران جنگل به منظور شناسایی زیستگاه‌های آسیب‌پذیر ضروری است. مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی و انتخاب بهترین روش برآورد شاخص تنوع گونه‌ای چوبی اطلاعات بارزتری در اختیار مدیران جنگل قرار می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان مناطق مناسبی را برای ذخیره‌گاه‌ها و دیگر مناطق حفاظت‌شده معرفی کرد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، روش‌های مختلف درون‌یابی برای برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تنوع گونه‌های چوبی بررسی شد. از ۹۵ قطعه نمونه مربع‌شکل با مساحت ۱۶۰۰ متر مربع برای محاسبه شاخص تنوع زیستی شانون-وینر در بخشی از جنگل‌های شهرستان مریوان استفاده شد. روش‌های درون‌یابی مکانی همانند معکوس فاصله وزنی (IDW)، کریجینگ و کوکریجینگ برای برآورد شاخص تنوع گونه‌ای بررسی شدند. همبستگی شاخص‌های طیفی NDVI، RVI، SAVI و NDWI حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر بررسی شد و در نهایت از شاخص طیفی SAVI به‌دلیل ضریب همبستگی بیشتر به‌عنوان متغیر کمکی برای روش کوکریجینگ استفاده شد.

یافته‌ها: واریانس ساختار در استفاده از روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ به ترتیب ۷۶/۸ و ۹۱/۴ درصد به دست آمد که بر ساختار مکانی قوی متغیر شاخص تنوع گونه‌ای در منطقه پژوهش دلالت دارد. براساس آماره‌های تحت بررسی، با استفاده از متغیر شاخص تنوع گونه‌ای به‌تنهایی، روش کریجینگ معمولی نسبت به روش معکوس فاصله وزنی، بهترین نتیجه و کمترین مقدار خطا را ارائه داد (۲۷/۰۴۳ = RMSEr). با استفاده از متغیر کمکی شاخص طیفی SAVI و کاربرد روش کوکریجینگ معمولی، نتایج برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر اندکی بهبود یافت (RMSEr = ۲۶/۴۲۲). دامنه تأثیر در روش کریجینگ ۲۴۰ متر و در روش کوکریجینگ و استفاده از متغیر کمکی، ۴۱۱۰ متر به دست آمد. استفاده از شاخص طیفی SAVI، سبب افزایش دامنه تأثیر شده و همبستگی مکانی تا فواصل بیشتری مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که امکان برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی معکوس فاصله وزنی، کریجینگ و کوکریجینگ در منطقه اجرای پژوهش و مناطق مشابه با دقت مناسب وجود دارد. بهترین نتایج با استفاده از روش کوکریجینگ و استفاده از شاخص طیفی SAVI به‌عنوان متغیر کمکی به دست آمد. همچنین کوچک‌ترین ضریب تغییرات سطوح پیش‌بینی‌شده در روش کوکریجینگ معمولی مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: ساختار مکانی، زاگرس، کریجینگ، کوکریجینگ.

مقدمه

نقاط مجهول و در نتیجه یک نقشه پیوسته از ارزش‌های برآورد شده دست یافت. با استفاده از آمار مکانی و درون‌یابی مکانی، می‌توان درک بهتری از چگونگی تنوع مکانی گونه‌های جنگلی در مناطق وسیع به دست آورد.

از ساده‌ترین روش‌های درون‌یابی روش معکوس فاصله وزنی (IDW) است. این روش از جمله روش‌های قطعی است که به‌طور مستقیم از مقادیر نقاط نمونه همسایه برای درون‌یابی استفاده می‌کند (Munyati & Sinthumule, 2021). روش معکوس فاصله وزنی نوعی روش غیر زمین‌آماری است و استفاده از آن نسبت به روش‌های زمین‌آماری ساده و سریع است. اشکال اصلی این روش این است که همانند روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و کوکریجینگ، برآورد واریانس را برای ارزش‌های برآورد شده ارائه نمی‌دهد. اساس این روش این است که نمونه‌های نزدیک‌تر اغلب شباهت بیشتری از نمونه‌های دورتر دارند (Kalivas et al., 2013).

روش‌های زمین‌آماری از دیگر روش‌های درون‌یابی هستند. تکنیک‌های زمین‌آماری مبتنی بر آن دسته از مدل‌های آماری است که بر پایه خودهمبستگی مکانی عمل می‌کنند. در این دسته از روش‌ها مقدار مشاهده شده یک متغیر در یک مکان، با توجه به همبستگی مقادیر در مکان‌های همسایه تعریف می‌شود. برخلاف درون‌یابی IDW، روش‌های زمین‌آماری افزون‌بر تولید یک سطح درون‌یابی (پیش‌بینی)، معیاری از قطعیت یا دقت پیش‌بینی‌ها را نیز فراهم می‌کند. روش کریجینگ از روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری است که پذیرش گسترده‌ای یافته است. کم بودن تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری شده سبب عدم قطعیت در برآورد کریجینگ می‌شود. در این شرایط، ترکیب کریجینگ با متغیرهای کمکی و استفاده از روش کوکریجینگ می‌تواند سبب افزایش صحت برآوردها شود (Kalivas et al., 2013).

خودهمبستگی مکانی ویژگی کلی متغیرهایی است

جنگل‌های زاگرس با مساحت حدود ۵/۵ میلیون هکتار گسترده‌ترین رویشگاه جنگلی ایران است (Sagheb Talebi et al., 2014). این جنگل‌ها از نظر حفاظت خاک و آب ارزش بسیاری دارند و جزو جنگل‌های حفاظتی به شمار می‌روند. تهیه نقشه تغییرات مکانی تنوع گونه‌های درختی به‌منزله یکی از شاخص‌های مهم اکولوژیکی در حفاظت از تنوع زیستی جنگل‌ها اهمیت بسزایی دارد. تنوع گونه‌های جنگلی، شاخصی است که تعاملات بین محیط و پوشش گیاهی منطقه و تغییرات صورت گرفته توسط انسان یا عوامل طبیعی را نشان می‌دهد. در این زمینه، برای پایش و مدیریت بهتر بوم‌سازگان‌های جنگلی، آگاهی از شاخص تنوع زیستی مناطق مختلف بسیار ضرورت دارد. شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر از پرکاربردترین شاخص‌های تنوع گونه‌ای برای پایش تنوع زیستی جنگل‌هاست (Ghaisaryan et al., 2023; Araújo et al., 2019; Parma & Shataee, 2013) که در این پژوهش چگونگی برآورد و تهیه نقشه آن با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی بررسی می‌شود.

آماربرداری صددرصد جنگل بسیار پرهزینه و زمان‌بر است؛ از این‌رو به‌طور معمول قطعات نمونه زمینی محدود و شمارش تعداد درختان و گونه‌های هر قطعه نمونه برای محاسبه تنوع گونه‌ای به کار می‌رود و سپس از میانگین این اندازه‌گیری‌ها برای توده یا بخش استفاده می‌شود. بنابراین در روش سنتی و استفاده از قطعات نمونه محدود نمی‌توان یک نقشه پیوسته از مشخصه‌های جنگل ارائه داد. به همین دلیل، درون‌یابی مکانی از نمونه‌های میدانی محدود، برای دستیابی به یک نقشه پیوسته از متغیر مدنظر برای کل منطقه ضروری است (Akhavan et al., 2021; Munyati & Sinthumule, 2021). با استفاده از روش‌های درون‌یابی روی ارزش‌های قطعه نمونه‌های برداشت‌شده در آماربرداری زمینی، می‌توان به برآورد

برآورد تراکم مکانی تنوع زیستی در این جنگل‌ها مناسب است. (Araújo et al. (2019) برای بررسی پراکنش مکانی تنوع گونه‌های درختی در بخشی از جنگل‌های برزیل از روش زمین‌آماری کریجینگ استفاده کردند. پژوهشگران بیان کردند که وابستگی مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای امکان استفاده از مدل‌سازی زمین‌آماری برای تهیه نقشه برآورد این شاخص‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. (Pelissari et al. (2018) تغییرپذیری مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌های درختی را در جنگل‌های آمیخته حاره جنوب برزیل با استفاده از روش کریجینگ بررسی کردند. مدل کروی بهترین برآورد را برای شاخص‌های شانون-وینر و مارگالف و مدل گاوسی دقیق‌ترین برآورد را برای شاخص سیمپسون نشان داد. (Batista et al. (2016) با استفاده از کریجینگ معمولی، تنوع و غنای گونه‌ای را در درختچه‌زارهای ساوانا در برزیل بررسی کردند. با توجه به نتایج واریوگرافی و ساختار مکانی قوی متغیرها، پژوهشگران بیان کردند که استفاده از کریجینگ معمولی برای برآورد متغیرهای تحت بررسی کاملاً مناسب است. (Rezaei et al. (2014) کارایی کریجینگ را در پهنه‌بندی تراکم و تاج پوشش جنگل‌های بلوط ناحیه زاگرس بررسی کردند و با توجه به نارایی برآوردها به این نتیجه رسیدند که می‌توان نقشه پراکنش مکانی نمایه‌های تراکم جنگل را در جنگل‌های زاگرس با دقت مناسبی تهیه کرد. (Kalivas et al. (2013) به مقایسه سه روش درون‌یابی مکانی شامل معکوس فاصله وزنی (IDW)، کریجینگ و کوکریجینگ برای برآورد حجم جنگل در جنگل‌های شهری جزیره اسکایروس در یونان پرداختند. در روش کوکریجینگ از متغیر شیب به‌عنوان متغیر کمکی استفاده شد. استفاده از روش کریجینگ، بهترین نتیجه را برای برآورد حجم جنگل در پی داشت و روش معکوس فاصله وزنی کمترین دقت را در برآوردها نشان داد. (Neves et al. (2010) از زمین‌آمار و روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ

که در فضای جغرافیایی اندازه‌گیری می‌شوند و زمانی مشاهده می‌شود که مقدار یک متغیر در هر مکانی به مقادیر نقاط همسایه وابسته باشد. آماره خودهمبستگی مکانی مقدار وابستگی بین مشاهدات را اندازه‌گیری و تحلیل می‌کند. متغیرهای دارای این ویژگی، متغیرهای ناحیه‌ای نامیده می‌شوند. خودهمبستگی مکانی که در تمام جوامع بوم‌شناختی یا حتی در هر پدیده جغرافیایی وجود دارد می‌تواند در آماربرداری جنگل‌ها بسیار کاربرد یابد، زیرا نتایج محلی و محدود را به سطح گسترده‌تری گسترش می‌دهد (Gilbert & Lowell, 1997).

از متداول‌ترین کاربردهای روش‌های زمین‌آماری در جنگلداری می‌توان به برآورد و تهیه نقشه ویژگی‌های جنگل مانند تاج‌پوشش، تعداد در هکتار، زی‌توده، سطح مقطع، حجم جنگل و تنوع گونه‌ها اشاره کرد.

(Hernandez-Stefanoni & Ponce-Hernandez, Kalivas et al., Akhavan & Kleinn, 2009; 2006 Pelissari et al., 2018; Rezaei et al., 2013; Hernandez-Stefanoni & Ponce- (2014; Hernandez (2006) نقشه تغییرپذیری مکانی تنوع گیاهی را با روش‌های مختلف درون‌یابی مکانی شامل معکوس فاصله وزنی، کریجینگ و کوکریجینگ در بخشی از جنگل‌های تروپیکال بررسی کردند. (Munyatı & Sinthumule (2021) مناسب بودن نسبی روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی و معکوس فاصله وزنی (IDW) را برای تهیه نقشه تراکم درختان و تنوع گونه‌های چوبی در جنگل‌های ساوانا بررسی کردند. نتایج نشان داد که کریجینگ معمولی برای تهیه نقشه تراکم جنگل‌های متراکم مناسب است، درحالی‌که درون‌یابی IDW برای درختزارهای پراکنده ساوانا عملکرد بهتری دارد. (Prasertsri et al. (2021) با استفاده از روش درون‌یابی معکوس فاصله وزنی (IDW) و کریجینگ به برآورد تراکم مکانی تنوع زیستی در بخشی از جنگل‌های تایلند پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هر دو روش برای تهیه نقشه

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، بررسی چگونگی ساختار مکانی شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر و استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی IDW، کریجینگ و کوکریجینگ در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر و تهیه نقشه پراکنش مکانی این شاخص است. در این پژوهش، از شاخص‌های طیفی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ به‌عنوان متغیر کمکی برای روش کوکریجینگ استفاده شده است.

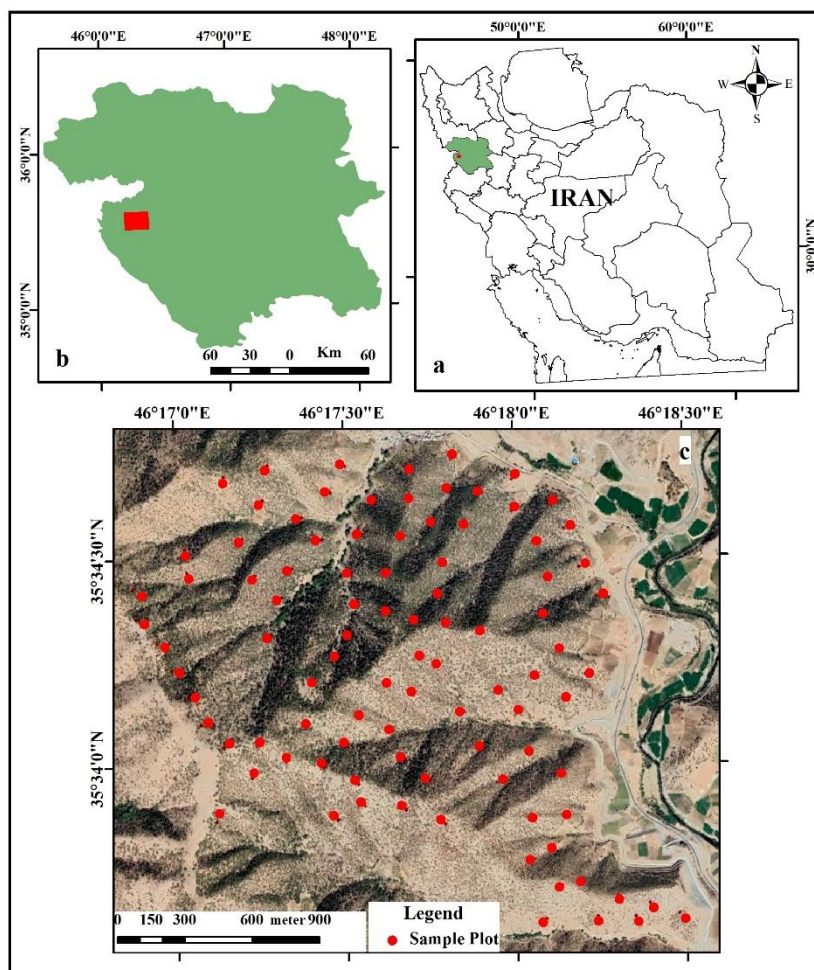
مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

منطقه پژوهش با مساحت ۴۳۷ هکتار در ۱۵ کیلومتری شهرستان مریوان و در سامان عرفی گمارلنگ در حوضه آبخیز چناره در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۹ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). دامنه ارتفاع از سطح دریا در این منطقه ۱۳۰۰ تا ۱۹۷۸ متر است. گونه‌های درختی وی‌ول (*Quercus libani* Lindl.)، مازودار (*Quercus infectoria* Oliv.) و برودار (*Quercus brantii* Lindl.) تیپ‌های غالب منطقه را تشکیل می‌دهند که ۹۰ درصد پایه‌های آنها به‌صورت شاخه‌زاد است (Saed Mocheshei et al., 2019; Miri et al., 2024). گونه‌های گلابی وحشی (*Pyrus syriaca* Boiss.)، بنه (*Pistacia atlantica* Desf.)، کیکم (*Acer cinerascens* Boiss.)، زالزالک (*Amygdalus orientalis* Mill.)، دافنه (*Crataegus meyeri* Pojark.) و شون (*Lonicera mucronate* Royle) نیز در منطقه حضور دارند (Saed Mocheshei et al., 2019).

برای ارزیابی تنوع زیستی مناطق حفاظت‌شده جنگلی در بخشی از جنگل‌های سائوپائولوی برزیل استفاده کردند. استفاده از کوکریجینگ و استفاده از متغیر تعداد پایه‌ها سبب افزایش اندک صحت نتایج شد. Akhavan et al. (2010) برای بررسی تنوع مکانی موجودی جنگل در جنگل‌های هیرکانی ایران، از زمین‌آمار و روش کریجینگ معمولی استفاده کردند، اما به دلیل ساختار مکانی ضعیف متغیر تحت بررسی، کریجینگ نتوانست برآورد دقیقی ارائه دهد.

با توجه به پیشینه پژوهش، استفاده از روش‌های درون‌یابی و زمین‌آمار برای برآورد متغیرهایی با ساختار مکانی مناسب (متغیرهایی که مقدار آنها با موقعیت جغرافیایی داده‌ها همبستگی دارد)، پیشنهاد شده است. دقت روش‌های مختلف درون‌یابی برای متغیرهای مختلف و تحت شرایط رویشگاهی مختلف، متفاوت است. بنابراین ارزیابی دقت روش‌های مختلف درون‌یابی مکانی برای برآورد متغیرهای مختلف اکولوژیکی ضروری است. تا کنون پژوهش‌هایی درباره استفاده از روش‌های آمار مکانی برای برآورد برخی مشخصه‌های جنگل همانند تراکم و تاج پوشش در جنگل‌های زاگرس انجام گرفته است (Vafaei et al., 2022; Rezaei et al., 2014; Akhavan et al., 2011)؛ اما درباره استفاده از روش‌های درون‌یابی در تهیه نقشه پراکنش مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای که شاخصی مهم در مدیریت جنگل‌ها به شمار می‌رود پژوهشی صورت نگرفته است. چنین پژوهش‌هایی با هدف آگاهی از چگونگی ساختار مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای در جنگل‌های زاگرس و بررسی امکان تهیه یک نقشه پیوسته از ارزش‌های برآوردشده شاخص تنوع گونه‌ای به‌منظور برنامه‌ریزی و حفاظت بهتر این جنگل‌ها ضروری است.



شکل ۱- موقعیت منطقه پژوهش در ایران (a)، استان کردستان (b) و موقعیت قطعه نمونه‌ها در منطقه (c)
 Figure 1. The study area in Iran (a), Kurdistan Province (b), and the distribution of sample plots in the study area (c)

شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر گونه‌های چوبی (شامل درخت و درختچه) برای هر قطعه نمونه براساس رابطه ۱ (Shannon, 1948) در نرم‌افزار PAST محاسبه شد.

$$H' = \sum_{i=1}^s P_i \log P_i \quad \text{رابطه ۱}$$

H' = شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر، s = تعداد گونه، P_i = فراوانی نسبی گونه i در اجتماع

محاسبه شاخص‌های طیفی گیاهی

شاخص‌های طیفی زیادی که حاصل نسبت‌گیری باندهای طیفی هستند برای پژوهش‌های بوم‌شناختی ارائه شده‌اند. در این پژوهش از چهار شاخص پوشش گیاهی طیفی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای بررسی مقدار همبستگی آنها با تنوع گونه‌ای،

شیوه اجرای پژوهش

برداشت قطعه نمونه‌های زمینی و محاسبه شاخص تنوع گونه‌ای

در این پژوهش از ۹۵ قطعه نمونه ۴۰ در ۴۰ مترمربعی که به صورت تصادفی و با حداقل فاصله ۱۰۰ متر از هم در پژوهش Saed Mocheshei et al. (2019) برداشت شده بود استفاده شد. از GPS دستی مدل Garmin Map 78Sc برای ثبت قطعات نمونه استفاده شد. برای محاسبه شاخص تنوع گونه‌ای در هر قطعه نمونه، نوع و تعداد گونه‌های چوبی شامل گونه‌های درختی و درختچه‌ای ثبت شد (حد شمارش قطر ۵ سانتی‌متر در ارتفاع برابر سینه). در خصوص درختان شاخه‌زاد هر جستی که از حد شمارش قطری گذشته بود، یک پایه مجزا در نظر گرفته شد.

رابطه قوی با مقدار سلامت پوشش گیاهی استفاده می‌شوند (Hernandez-Stefanoni & Ponce- Hernandez, 2006; Ahmadi et al., 2025). شاخص NDWI که از شاخص‌هایی است که از باند مادون قرمز طول موج کوتاه استفاده می‌کند و با محتوای رطوبتی گیاه در ارتباط است (Gao, 1996) (جدول ۱).

به‌منظور استفاده از آنها به‌عنوان متغیر کمکی در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر از طریق روش کوکریجینگ استفاده شد. شاخص‌ها در دو دسته انتخاب شدند: ۱. شاخص‌هایی که از اختلاف باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه می‌شوند، همانند RVI، NDVI و SAVI؛ این شاخص‌ها به‌طور معمول به‌دلیل

جدول ۱- شاخص‌های طیفی استفاده‌شده در پژوهش

Table 1. Spectral indices used in the research

شاخص طیفی Spectral indices	رابطه Equation	شماره رابطه Equation No.
NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	2
RVI	$\frac{NIR}{RED}$	3
NDWI	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	4
SAVI	$(1 + L) * \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}$	5

NIR: طول موج مادون قرمز نزدیک، RED: طول موج قرمز، SWIR: مادون قرمز طول موج کوتاه و L: ضریب تصحیح روشنایی خاک
NIR: Near Infrared wavelength, RED: Red wavelength SWIR: Shortwave Infrared wavelength, L: Soil brightness correction factor

نمونه‌های همسایه به‌عنوان تابعی معکوس از فاصله به دست می‌آیند (رابطه ۶). نکاتی که قبل از استفاده از روش درون‌یابی IDW باید بررسی شود، شعاع جست‌وجوی بهینه و مقدار توان است (p در رابطه ۷). در مورد شعاع جست‌وجوی بهینه عدد قطعی مشخصی در پژوهش‌ها وجود ندارد و به‌طور معمول براساس ارزیابی نتایج از شعاع جست‌وجوی مناسب استفاده می‌شود (Zimmerman et al., 1999). برخی محققان نیز از مقدار شعاع پیشفرض ۱۲ استفاده می‌کنند (Gong et al., 2014). ماهیت متغیر باید در تعیین شعاع جست‌وجو در درون‌یابی IDW در نظر گرفته شود. اگر متغیر تنوع مکانی زیادی داشته باشد (برای مثال براساس معیار آماری پراکندگی)، باید از شعاع جست‌وجوی کم استفاده شود، زیرا به‌دلیل خودهمبستگی مکانی، نقاط نمونه دورتر احتمالاً ارزش متفاوتی دارند (Munyati & Sinthumule, 2021). در این پژوهش بهترین شعاع جست‌وجو براساس نتایج آزمون شعاع‌های مختلف به دست آمد. منطقی‌ترین

روش تحلیل

آماره‌های میانگین، انحراف معیار، کمینه و بیشینه به‌منظور توصیف آماری شاخص تنوع گونه‌ای محاسبه شدند. برای جلوگیری از تأثیر اریبی مقادیر زیاد بر تخمین‌گرهای خطی روش‌های زمین‌آماري کوریجینگ و کوکریجینگ، بهتر است پراکنش داده‌ها نرمال باشد. آزمون نرمال بودن پراکنش داده‌ها با استفاده از بررسی چشمی هیستوگرام، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و بررسی نمودار چندک-چندک انجام گرفت.

برای برآورد شاخص تنوع گونه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی، داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو دسته تقسیم شدند. از ۷۰ درصد داده‌ها برای درون‌یابی و ارائه مدل و از ۳۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی استفاده شد.

روش معکوس فاصله وزنی IDW بر مبنای روش درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایه استوار است. بنابراین برآوردها از میانگین وزنی مقادیر تنوع گونه‌ای قطعه

ارائه می‌دهد و درصد ساختار مکانی با استفاده از رابطه ۹ محاسبه می‌شود. درصد ساختار مکانی کمتر از ۲۵ درصد، بین ۲۵-۷۵ درصد و بیشتر از ۷۵ درصد به ترتیب ساختار مکانی ضعیف، متوسط و قوی را نشان می‌دهد.

(Total variance -nugget variance)/ total variance*100 = Relative structural variance ۹ رابطه

در زمین‌آمار، یک متغیر تصادفی به‌طور معمول با تجزیه آن به یک جزء روند قطعی صاف و یک باقی‌مانده تصادفی نشان داده می‌شود. فرض ضمنی الگوریتم‌های پیش‌بینی زمین‌آمار «ایستایی» (stationarity) است؛ به این مفهوم که آمار مکانی متغیر تصادفی نسبت به مکان درون حوزه تغییرناپذیر باشد. وجود روندهای در مقیاس بزرگ این فرض ثابت بودن را نقض می‌کند. هدف از مدل‌سازی با روند، حذف مؤلفه روند قطعی مقیاس بزرگ از متغیر تصادفی برای برآورده کردن فرض ثابت بودن متغیر است (Harding & Doutsch, 2021). در این پژوهش، وجود یا نبود روند در داده‌ها با استفاده از ابزار تحلیل روند Trend Analysis در نرم‌افزار ArcGIS بررسی شد.

برای بررسی همسانگردی (Isotropy) یا ناهمسانگردی (Anisotropy) داده‌ها از ترسیم واریوگرام‌های تجربی جهت‌دار برای چهار جهت صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه و همچنین واریوگرام‌های سطحی دو و سه‌بعدی در نرم‌افزار GS+ استفاده شد. اگر مقدار سمی‌واریوگرام در همه جهت‌ها برابر باشد، سمی‌واریوگرام همسانگرد است. اگر مقدار سمی‌واریوگرام وابسته به جهت باشد و در جهت‌های مختلف برابر نباشد، سمی‌واریوگرام ناهمسانگرد خواهد بود. در بررسی از طریق واریوگرام‌های سطحی دو و سه‌بعدی نیز اگر رویه سمی‌واریوگرام متقارن باشد، داده‌ها همسانگردند.

شاخص‌های اثر قطعه‌ای (Nugget) و حد آستانه (Sill) نیز در هر مدل محاسبه شدند. اثر قطعه‌ای، عرض از مبدأ سمی‌واریوگرام است و حد آستانه یا

نتایج درون‌یابی IDW با استفاده از توان ۲ به دست می‌آید (Gong et al., 2014)، بنابراین در پژوهش حاضر نیز توان ۲ در نظر گرفته شد.

$$Z_{(x0)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{(xi)} \quad \text{رابطه ۶}$$

$Z_{(x0)}$: ارزش مقادیر نامعلوم، $Z_{(xi)}$: ارزش مقادیر معلوم، λ_i : مقدار وزن

$$\lambda_i = \left[d_{(xi,x0)} \right]^p / \sum_{i=1}^n \left[d_{(xi,x0)} \right]^p \quad \text{رابطه ۷}$$

$d_{(xi,x0)}$: فاصله اقلیدسی بین $x0$ و xi و p ارزش توان

در روش‌های زمین‌آمار کریجینگ و کوکریجینگ فرض بر همبستگی مکانی نمونه‌هاست. به عبارتی این روش برای متغیرهای ناحیه‌ای (Regionalized variable) که ساختار مکانی (spatial structure) داشته باشند استفاده می‌شود. سمی‌واریوگرام، بخشی جدایی‌ناپذیر از فرایند کریجینگ به شمار می‌رود و ارزیابی خودهمبستگی مکانی را ممکن می‌سازد. برای هر دو نقطه نمونه xi و xj با داده‌های مربوط به متغیر مکانی Z ، سمی‌واریوگرام به‌صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود:

$$\lambda(x_i, x_j) = \frac{1}{2} \text{Var} [Z_{(xi)} - Z_{(xj)}] \quad \text{رابطه ۸}$$

Var: واریانس را نشان می‌دهد. اگر xi و xj از نظر فاصله به هم نزدیک باشند، انتظار می‌رود مقادیر به‌نسبت مشابه داشته باشند و در نتیجه اختلاف مقادیر آنها ($Z_{(xi)} - Z_{(xj)}$) کم خواهد بود و اگر فاصله بین آنها زیاد باشد، انتظار می‌رود شباهت مقادیر بین آنها کم باشد؛ در نتیجه اختلاف مقادیر آنها زیاد خواهد بود (Munyati & Sinthumule, 2021).

سمی‌واریوگرام‌ها برای شناسایی و توصیف ساختار مکانی استفاده می‌شوند. برای درک بهتر ساختار مکانی خودهمبستگی مکانی (spatial autocorrelation) بین نمونه‌ها بررسی شد. برای این منظور با ترسیم فاصله بین قطعه نمونه‌ها، واریانس ارزش شاخص تنوع زیستی محاسبه شد. نسبت واریانس ساختاردار به حد آستانه ساختار مکانی را

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{(xi)} - z'_{(xi)} }^2 \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$RMSEr = \frac{RMSE}{\bar{z}_{(xi)}} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

n تعداد نمونه، $z_{(xi)}$ مقدار اندازه گیری شده، $z'_{(xi)}$ مقدار برآوردشده، $\bar{z}_{(xi)}$ میانگین نمونه‌های اندازه گیری شده

نتایج

در جدول ۲ آماره‌های میانگین، انحراف معیار، کمینه و بیشینه شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر ارائه شده است. آزمون نرمال بودن پراکنش داده‌ها با استفاده از بررسی چشمی هیستوگرام و همچنین آزمون کولموگروف- اسمیرنوف نشان دهنده نرمال بودن پراکنش داده‌های شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر بود (statistics=۰/۰۷۹، df=۹۵، sig=۰/۱۷۴).

نتایج بررسی وجود روند در داده‌های تنوع گونه‌ای شانون- وینر (شکل ۲) نشان دهنده وجود روند ضعیفی در راستای شمالی- جنوبی (خط آبی) و غربی- شرقی (خط قرمز) است و اختلاف مقادیر شاخص تنوع گونه‌ای در جهت‌های مختلف مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه پیشفرض روش‌های زمین‌آمارای ایستایی است، قبل از به‌کارگیری روش‌ها، حذف روند از داده‌ها با استفاده از معادله درجه ۲ انجام گرفت.

انطباق واریوگرام‌های تجربی جهت‌دار برای چهار جهت صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه و متقارن بودن تغییر نماهای سطحی نمایه شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر نشان دهنده یکسان بودن مقدار سمی واریوگرام‌ها در جهت‌های مختلف و مستقل بودن آن از جهت دامنه یعنی همسانگردی داده‌هاست (شکل ۳ چپ). بر این اساس، برای تجزیه و تحلیل مکانی داده‌ها، از سمی واریوگرام همه‌جهته (Omni-directional) استفاده شد (شکل ۳ راست).

سقف، مقدار سمی واریوگرامی است که در آن، مدل به صورت یک خط صاف می‌شود. در فاصله جداسازی صفر، از نظر تئوری سمی واریوگرام باید صفر باشد. اثر قطعه‌ای را می‌توان به خط‌های اندازه‌گیری یا منابع تغییرات مکانی در فواصل کمتر از فاصله نمونه‌گیری نسبت داد (Oliver & Webster, 2014).

انتخاب مدل سمی واریوگرام و مشخصه‌های مدل در صحت درون‌یابی بسیار تأثیرگذار است. بنابراین در این پژوهش چهار مدل خطی، گوسی، نمایی و کروی و تعداد همسایه‌های محل نمونه‌برداری آزمون شدند. مناسب‌ترین مدل برازش داده‌شده به سمی واریوگرام تجربی براساس بیشترین ضریب تعیین (R^2) و کمترین مجموع مربعات باقی‌مانده خطا (Residual Sum of Squares) انتخاب شد و تهیه نقشه پیش‌بینی و خطای برآورد روش‌های زمین‌آمارای کریجینگ و کوکریجینگ بر اساس آن انجام گرفت.

برای ارزیابی نتایج روش‌های درون‌یابی و تعیین دقت پیش‌بینی مدل‌ها در مناطق نامعلوم از ۳۰ درصد داده‌ها که به‌عنوان داده‌های آزمون کنار گذاشته شده بود، استفاده شد و مقادیر واقعی با مقادیر برآوردشده توسط مدل‌ها در محل نمونه‌های متناظر مقایسه شد. آماره‌های استفاده‌شده برای ارزیابی مدل‌ها، میانگین خطا (ME)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) است (رابطه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲). رابطه‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ هم مقادیر نسبی این آماره‌ها را نشان می‌دهند (Kambhammettu et al., 2011; Munyati & Sinthumule, 2021).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z_{(xi)} - z'_{(xi)}] \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$MEr = \frac{ME}{\bar{z}_{(xi)}} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

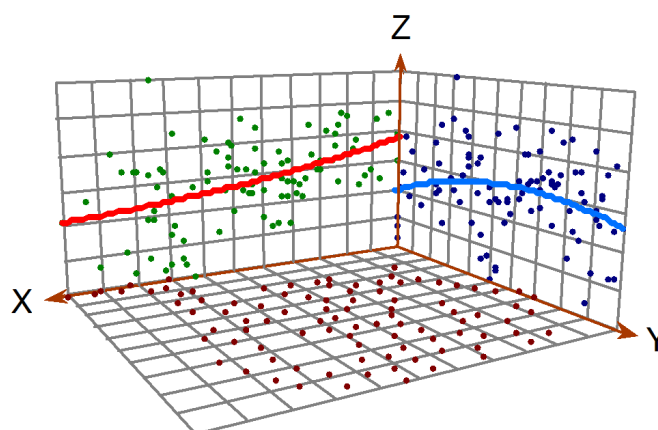
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_{(xi)} - z'_{(xi)}| \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$MAEr = \frac{MAE}{\bar{z}_{(xi)}} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

جدول ۲- آماره‌های توصیفی شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر در قطعات نمونه

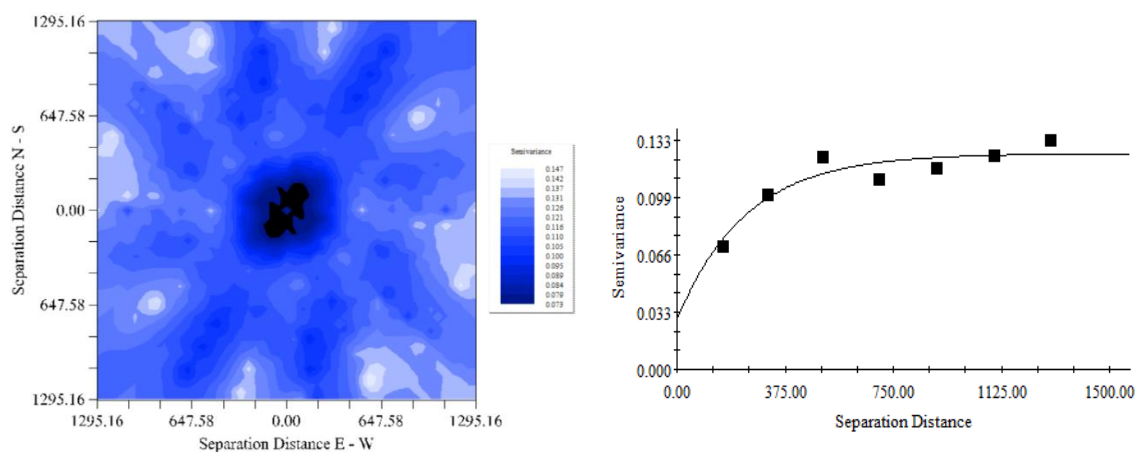
Table 2. The descriptive statistics of Shannon Wiener species diversity index in the sample plots

متغیر Variable	کمیته	بیشینه maximum	میانگین mean	انحراف معیار Standard Deviation
شانون- وینر Shannon Wiener	All data	0.13	1.98	0.364
	training	0.22	1.98	0.365
	test	0.13	1.59	0.351



شکل ۲- بررسی وجود روند در داده‌های تنوع گونه‌ای شانون- وینر. خط قرمز: راستای غربی- شرقی و خط آبی: راستای شمالی-جنوبی

Figure 2. Trend analysis of Shannon Wiener species diversity index. Red Line: trend in the east-west direction, and the blue line: the trend in the north-south direction



شکل ۳- سمی‌واریوگرام همه‌جهته تجربی (راست) و تغییرنمای سطحی (چپ) داده‌های تنوع گونه‌ای شانون- وینر در روش کریجینگ
Figure 3. Experimental omnidirectional semi-variogram (Right), and Surface variogram maps (Left) of Shannon Wiener species diversity index in the kriging method

کریجینگ در نظر گرفته شد. بهترین سمی‌واریوگرام برای درون‌یابی کریجینگ با استفاده از مدل نمایی با ضریب تعیین 0.874 به دست آمد که دارای کمترین مجموع مربعات باقی‌مانده نیز بود (جدول ۳). ارزش‌های اثر قطعه‌ای (C_0) ، حد آستانه (C_0+C) و

مدل‌های سمی‌واریوگرام برای روش درون‌یابی کریجینگ تغییرات مکانی نشان داده‌شده توسط مدل‌های سمی‌واریوگرام، ساختار مکانی را نشان می‌دهد. با آزمون و خطا فاصله ۲۰۰ متر برای گام در روش

مدل‌های سمی‌واریوگرام برای روش درون‌یابی کوکریجینگ

به منظور انتخاب شاخص پوشش گیاهی طیفی NDVI، RVI، SAVI و NDWI، به عنوان متغیر کمکی برای مدل کوکریجینگ، ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر و شاخص‌های گیاهی طیفی بررسی شد (جدول ۴). از بین شاخص‌های طیفی، شاخص SAVI بیشترین همبستگی را با شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر دارد، از این رو از آن به عنوان متغیر کمکی برای روش کوکریجینگ استفاده شد.

دامنه (A₀) مدل‌های زمین‌آماري برازش شده برای شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر در جدول ۳ ارائه شده است.

واریانس ساختار که واریانس ناشی از وابستگی مکانی ارائه شده توسط مدل را بیان می‌کند (رابطه ۹) در مدل نمایی ۷۶/۸ درصد به دست آمد که نشان دهنده ساختار مکانی قوی متغیر است (جدول ۳). دامنه تأثیر در روش کریجینگ ۲۴۰ متر به دست آمد که فاصله‌ای را نشان می‌دهد که واریوگرام به حد ثابتی می‌رسد و تا این فاصله متغیر دارای وابستگی مکانی است (جدول ۳).

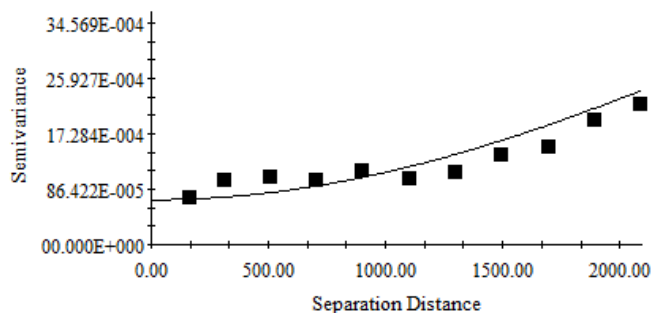
جدول ۳- مشخصه‌ها و آماره‌های مدل‌های سمی واریوگرام توصیف کننده تنوع مکانی شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر
Table 3. Parameters and statistics of semi-variogram models describing the spatial variability of Shannon-Wiener species diversity index

روش درون‌یابی Interpolation Method	مدل Model	اندازه گام Lag size	واریانس اثر قطعه‌ای Nugget variance C ₀	واریانس کل حد آستانه Total variance Sill C ₀ +C	دامنه Range A ₀	واریانس نسبی ساختار Relative structural variance (%) C/(C ₀ +C)	ضریب تبیین R ²	مجموع مربعات خطای باقیمانده RSS
کریجینگ Kriging	نمایی Exponential	200	0.0290	0.1250	240	76.8	0.874	3.13E-04
کوکریجینگ CoKriging	گوسی Gaussian	150	0.0007	0.0082	4110	91.4	0.91	7.38E-07

جدول ۴- ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر و شاخص‌های طیفی
Table 4. Pearson correlation coefficient between Shannon Wiener species diversity index and spectral indices

متغیر Variable	شاخص‌های طیفی Spectral indices			
شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر	NDWI	SAVI	RVI	NDVI
Shannon Wiener index	0.323**	0.502**	0.359**	0.453**

** p-value < 0.01

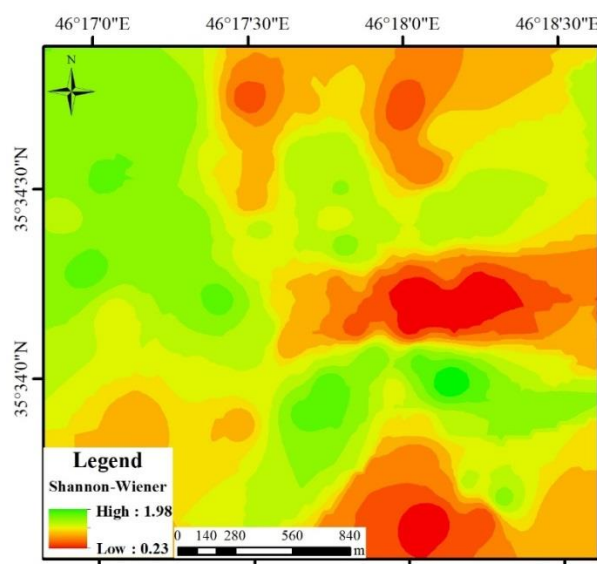


شکل ۴- سمی‌واریوگرام همه‌جهته تجربی داده‌های تنوع گونه‌ای شانون-وینر در روش کوکریجینگ
Figure 4. Experimental omnidirectional semi-variogram of Shannon Wiener species diversity index in co-kriging method

نشان می‌دهد که متغیر دارای وابستگی مکانی است (جدول ۳).

نتایج درون‌یابی به روش معکوس فاصله وزنی (IDW)
بهترین نتیجه برای روش درون‌یابی IDW با در نظر گرفتن توان ۲ و حداقل و حداکثر مقدار همسایگی ۳ و ۵ به دست آمد. شکل ۵ نقشه درون‌یابی شاخص تنوع گونه‌ای با استفاده از ۷۰ درصد نمونه‌ها به کمک روش معکوس فاصله وزنی را نشان می‌دهد.

ارزش‌های اثر قطعه‌ای یا ناگت (C_0)، حد آستانه (C_0+C) و دامنه (A_0) مدل‌های زمین‌آماري برآزش شده برای شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر در جدول ۳ ارائه شده است. با آزمون و خطا فاصله ۱۵۰ متر برای گام در روش کوکریجینگ در نظر گرفته شد. بهترین سمی‌واریوگرام برای درون‌یابی کوکریجینگ با استفاده از مدل گوسی با ضریب تعیین ۰/۹۱ به دست آمد که ساختار مکانی قوی (۹۱/۴ درصد) را نیز ارائه داد (جدول ۳ و شکل ۴). دامنه تأثیر در روش کوکریجینگ ۴۱۱۰ متر به دست آمد که فاصله‌ای را



شکل ۵- نقشه پیش‌بینی شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر حاصل از روش درون‌یابی با استفاده از روش معکوس فاصله وزنی
Figure 5. Prediction map of Shannon Wiener species diversity index using IDW interpolation method

۲۶/۴۲۲ درصد به دست آمد که نتایج برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر تنها به مقدار حدود ۱ درصد بهبود یافت (جدول ۵). شکل ۶ نقشه پیش‌بینی (برآورد) و نقشه خطای برآورد با استفاده از روش کوکریجینگ معمولی را نمایش می‌دهد. نقشه پیش‌بینی شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر در سه طبقه ارائه شده است. مناطقی که در نقشه پیش‌بینی با رنگ سبز مشخص شده‌اند، بیشترین تنوع گونه‌ای را در منطقه نشان می‌دهند. در نقشه خطای برآورد، مناطق قرمز، بیشترین خطای برآورد را دارند.

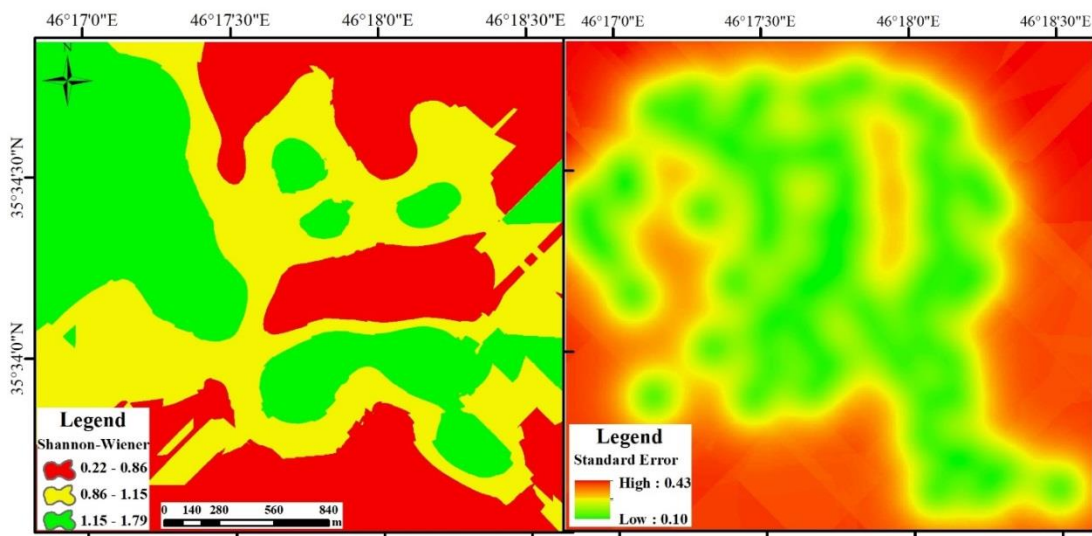
مقایسه نتایج روش‌های مختلف درون‌یابی در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر

نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی بر اساس ۳۰ درصد نمونه‌های اعتبارسنجی در جدول ۵ ارائه شده است. براساس آماره‌های تحت بررسی در صورت استفاده از متغیر شاخص تنوع گونه‌ای به‌تنهایی، روش کوریجینگ معمولی بهترین نتیجه و کمترین مقدار خطا را ارائه داد ($RMSEr = 27/043\%$). در صورت استفاده از متغیر کمکی شاخص طیفی SAVI و استفاده از روش کوکریجینگ معمولی، میانگین خطای مطلق ۲۲/۵۸۸ درصد و مجذور میانگین مربعات خطا

جدول ۵- نتایج ارزیابی روش‌های درون‌یابی در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر

Table 5. Validation results of interpolation methods in prediction of Shannon Wiener species diversity index

روش‌های درون‌یابی Interpolation methods	ME	MEr	MAE	MAEr	RMSE	RMSEr
معکوس فاصله وزنی IDW	0.0892	9.247%	0.223	23.138%	0.266	27.582%
کریجینگ معمولی Ordinary kriging	0.0888	9.205%	0.221	22.899%	0.261	27.043%
کوکریجینگ معمولی Ordinary co-kriging	0.0882	9.143%	0.218	22.588%	0.255	26.422%



شکل ۶- نقشه پیش‌بینی در سه طبقه (چپ) و نقشه خطای برآورد (راست) شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر با استفاده از روش کوکریجینگ

Figure 6. Prediction map (left) and the prediction standard error (Right) of Shannon Wiener species diversity index using the co-kriging interpolation method

واریانس ساختار که واریانس ناشی از وابستگی مکانی ارائه شده توسط مدل را بیان می‌کند در استفاده از روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ به ترتیب ۷۶/۸ و ۹۱/۴ درصد به دست آمد که بر ساختار مکانی قوی متغیر شاخص تنوع گونه‌ای در منطقه پژوهش بررسی دلالت دارد. مقدار کم اثر قطعه‌ای (جدول ۳) نیز نشان‌دهنده ساختار مکانی زیاد متغیر تحت بررسی است (Ahadi et al., 2017). از این رو این شاخص یک متغیر ناحیه‌ای (Regionalized variable) است که تغییرات آن وابسته به فاصله و تحت تأثیر شرایط مختلف رویشگاهی است و می‌توان از روش‌های زمین‌آماری برای برآورد این متغیر استفاده کرد.

بحث

در این پژوهش کاربرد روش‌های مختلف درون‌یابی معکوس فاصله وزنی، کریجینگ معمولی و کوکریجینگ معمولی بر برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر در بخشی از جنگل‌های زاگرس در شهرستان مریوان بررسی شد. کمترین و بیشترین ارزش شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر در منطقه پژوهش ۰/۱۳ و ۱/۹۸ به دست آمد که با دامنه اعداد تنوع گونه‌ای شاخص شانون- وینر در پژوهش Jamshidi Bakhtar et al. (2013) در جنگل‌های مریوان مطابقت دارد و تأییدی بر درستی تنوع گونه‌ای محاسبه شده در جنگل‌های تحت بررسی است.

تنوع گونه‌ای شانون- وینر است. کریجینگ معمولی قوی‌ترین و متداول‌ترین روش کریجینگ است و نسبت به دیگر روش‌های کریجینگ همانند کریجینگ ساده و عام، به نتایج بهتری منجر می‌شود (Bostan, 2017). استفاده از متغیر کمکی شاخص طیفی SAVI و روش کوکریجینگ، سبب کاهش مقدار خطا شد (جدول ۵). بنابراین استفاده از روش کوکریجینگ با مقدار جذر مربعات میانگین خطای کمتر، برتری اندکی نسبت به روش‌های کریجینگ و IDW دارد. (King et al., 2000) نیز در مقایسه برآورد حجم جنگل با استفاده از دو روش کریجینگ و کوکریجینگ و متغیر طیفی شاخص تفاوت گیاهی نرمال‌شده (NDVI) به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش کوکریجینگ به نتایج بهتری منجر شد. (Fakhire & Najafi Zilaie, 2014) در مقایسه روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و کوکریجینگ در برآورد تراکم درختان در غرب کرخه به این نتیجه رسیدند که کاربرد روش کوکریجینگ به نتایج بهتری منجر شده است. برخلاف پژوهش حاضر در پژوهش در بخشی از جنگل‌های تروپیکال با هدف تهیه نقشه تغییرپذیری مکانی تنوع گیاهی با روش‌های مختلف توابع معکوس فاصله وزنی، کریجینگ و کوکریجینگ، نتایج نشان داد که درون‌یابی مکانی با استفاده از روش کوکریجینگ به دلیل همبستگی ضعیف بین متغیرهای تنوع گیاهی و شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه‌شده توسط سنجش از دور به‌عنوان متغیرهای کمکی، ضعیف‌ترین نتایج را ارائه داد (Hernandez-Stefanoni & Ponce-Hernandez, 2006). بنابراین استفاده از متغیر کمکی تنها زمانی به نتایج بهتری منتج می‌شود که با متغیر اصلی همبستگی معنی‌داری وجود داشته باشد. در پژوهش Kalivalis et al. (2013) در برآورد حجم جنگل با وجود مقدار ضریب تغییرات و دامنه خطای استاندارد کمتر ارزش‌ها در استفاده از روش کوکریجینگ، روش کریجینگ با مقدار خطای استاندارد کمتر، نتایج بهتری نسبت به روش کوکریجینگ و IDW ارائه داد.

پژوهشگران دیگری نیز به همبستگی مکانی مناسب شاخص تنوع گونه‌ای شانون- وینر اشاره داشتند (Araújo et al., 2019; Batista et al., 2016). نتایج تحقیقات (Rezaei et al., 2014) در بررسی ساختار مکانی دو متغیر تراکم و تاج‌پوشش بخشی از جنگل‌های زاگرس در استان لرستان و نتایج پژوهش Vafaei et al. (2022) درباره متغیر تاج‌پوشش جنگل در جنگل‌های مریوان استان کردستان نیز نشان از ساختار مکانی قوی متغیرهای تحت بررسی در جنگل‌های زاگرس داشت.

دامنه تأثیر در روش کریجینگ ۲۴۰ متر و در روش کوکریجینگ و استفاده از متغیر کمکی، ۴۱۱۰ متر به دست آمد. به نظر می‌رسد که استفاده از شاخص طیفی SAVI، سبب افزایش دامنه تأثیر شده است و همبستگی مکانی تا فواصل بیشتری مشاهده می‌شود. دامنه تأثیر فاصله‌ای را نشان می‌دهد که واریوگرام به حد ثابتی می‌رسد. بنابراین تا این فاصله متغیرها دارای وابستگی مکانی‌اند و پس از آن نمونه‌ها مستقل از هم در نظر گرفته می‌شوند و شباهت کمتری به هم دارند. هرچه دامنه تأثیر کوچک‌تر باشد باید فاصله نمونه‌برداری را کمتر در نظر گرفت. از دامنه تأثیر برای تعیین فاصله قطعه نمونه‌ها نیز می‌توان استفاده کرد (Akhavan et al., 2011). با توجه به نتایج این پژوهش در صورت استفاده از روش کوکریجینگ و کاربرد متغیر شاخص طیفی SAVI، می‌توان فاصله بین قطعات نمونه را افزایش داد. به این ترتیب در صورت استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و استخراج شاخص طیفی SAVI، با استفاده از تعداد قطعه نمونه کمتر و در نتیجه صرف زمان و هزینه کمتر برای برداشت قطعات نمونه زمینی، می‌توان به دقت مدنظر دست یافت.

نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی (جدول ۵) نشان داد که در صورت استفاده از متغیر شاخص تنوع گونه‌ای به‌تنهایی، روش کریجینگ معمولی با مقدار خطای کمتر بهترین روش برای برآورد شاخص

و برنامه‌ریزی منابع جنگلی کمک می‌کند. Hoseinpour et al. (2019) نیز در پژوهش خود در بخشی از جنگل‌های هیرکانی، به همبستگی مکانی مناسب شاخص شانون-وینر و سیمپسون و امکان برآورد آنها با استفاده از روش کریجینگ اشاره داشتند. نقشه‌های تنوع گونه‌ای را می‌توان به‌عنوان شاخص مناطق بالقوه برای ایجاد واحدهای حفاظت، ایجاد کریدورهای اکولوژیکی و حمایت از توسعه سیاست‌های زیست‌محیطی استفاده کرد (Araújo et al., 2019).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که امکان تولید نقشه پهنه‌بندی تنوع گونه‌ای جنگل با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی معکوس فاصله وزنی، کریجینگ و کوکریجینگ در منطقه اجرای پژوهش و مناطق مشابه با دقت مناسب وجود دارد. بهترین نتایج با استفاده از روش کوکریجینگ و استفاده از شاخص طیفی SAVI به‌عنوان متغیر کمکی به دست آمد. نتایج نشان داد که شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر متغیری است که وابستگی مکانی دارد و می‌توان آن را از طریق آمار مکانی در نقاط نمونه‌برداری نشده مدل‌سازی و برآورد کرد. بنابراین فرضیه مبنی بر وابستگی مکانی شاخص تنوع گونه‌ای در جنگل‌های زاگرس تأیید شد. از نقشه تنوع گونه‌ای می‌توان به‌منزله شاخص مناطق بالقوه برای ایجاد واحدهای حفاظتی استفاده کرد. استفاده از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر جنگل‌های زاگرس مفید خواهد بود.

در مقایسه روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و کوکریجینگ با روش IDW، می‌توان گفت روش‌های زمین‌آماری با توجه به مزایایی همانند تولید نقشه خطای برآورد، خوشه‌زدایی و کاهش واریانس برآورد، بر روش IDW برتری دارند. با استفاده از نقشه خطای پیش‌بینی به‌همراه هر برآورد (شکل ۶)، می‌توان مناطق دارای خطای زیاد را شناسایی کرد و در این مناطق با اندازه‌گیری نمونه‌های اضافی، مقدار خطا را کاهش داد. پراکنش مکانی خطای برآورد ارائه‌شده در شکل ۶ با تراکم قطعات نمونه (شکل ۱) مرتبط است. در مناطقی با تراکم زیاد قطعات نمونه، خطای برآورد کمتر است. این نتیجه با یافته Kalivas et al. (2013) درباره برآورد حجم جنگل همخوانی دارد.

نتایج پژوهش‌های دیگر درباره متغیرهای تراکم و تاج‌پوشش جنگل در بخش‌هایی از جنگل‌های زاگرس، نشان‌دهنده مناسب بودن روش IDW و کریجینگ در درون‌یابی و برآورد آن نمایه‌ها در جنگل‌های زاگرس است (Rezaei et al., 2014; Akhavan et al., 2011). هرچند با مقایسه جذر میانگین مربعات خطا می‌توان نتیجه گرفت که درون‌یابی و برآورد شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر ($RMSEr = 26/42\%$) در پژوهش حاضر نسبت به نمایه‌های تراکم ($RMSEr = 56/50\%$) و تاج‌پوشش جنگل ($RMSEr = 30/7/86$) در پژوهش Rezaei et al. (2014) نتایج بهتری ارائه داده است. (Araújo et al. (2019) پس از تأیید همبستگی مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای در بخشی از جنگل‌های برزیل بیان کردند که استفاده از روش‌های زمین‌آماری ابزار مناسبی برای برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای است و نتایج آن به مدیریت

References

- Ahadi, Z., Alavi, S.J., & Hosseini, S.M. (2017). Beech forest site productivity mapping using ordinary kriging and IDW (Case study: research forest of Tarbiat Modares University). *Forest and Wood Products*, 70(1), 93-102. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2017.61615> (In Persian)
- Ahmadi, S., Fatehi, P., Namiranian, M., & Miri, N. (2025). Oak Forest Canopy Cover Estimation using Landsat 9 data in the Northern Zagros Forests. *Iranian Journal of Forest*, 16(4), 471-488. <https://doi.org/10.22034/ijf.2025.457774.1989>. (In Persian)
- Akhavan, R., Karami Khoramabadi, M., & Soosani, J. (2011). Application of Kriging and IDW methods in mapping of crown cover and density of coppice oak forests (case study: Kakareza region, Khorramabad). *Iranian Journal of Forest*, 3(4), 305-316. (In Persian)
- Akhavan, R., & Kleinn, Ch. (2009). On the potential of kriging for estimation and mapping of forest plantation stock (Case study: Beneshki plantation). *Forest and Poplar Research*, 17(2), 303-318. (In Persian)
- Akhavan, R., Zahedi Amiri, G., & Zobeiri, M. (2010). Spatial variability of forest growing stock using geostatistics in the Caspian region of Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 8(1), 43-53.
- Araújo, E.J.G.D., Morais, V.A., David, H.C., Scolforo, J.R.S., Mello, J.M.D., & Ebling, A.A. (2019). Spatialization of tree species diversity in the State of Minas Gerais. *Floresta e Ambiente*, 26, 1-13. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.020615>
- Batista, A.P.B., Mello, J.M.D., Raimundo, M.R., Scolforo, H.F., Reis, A.A.D., & Scolforo, J.R.S. (2016). Species richness and diversity in shrub savanna using ordinary kriging. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51, 958-966. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000800008>
- Bostan, P. (2017). Basic kriging methods in geostatistics. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 27(1), 10-20. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.305093>
- Fakhire, A., & Najafi Zilaie, M. (2014). Comparison of different kriging methods to estimate the tree density. A case study: West of Karkheh in Southwest of Iran. *ProEnvironment Promediu*, 7(20), 204-212.
- Gao, B.C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Ghaisaryan, A., Fatehi, P., & Etemad, V. (2023). Estimation of species diversity in the Hyrcanian forests using Sentinel-2 Data (Case study: Kheyroud forest, Mazandaran). *Forest and Wood Products*, 76(3), 229-243. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2023.362198.1261> (In Persian)
- Gilbert, B., & Lowell, K. (1997). Forest Attributes and Spatial Autocorrelation and Interpolation: Effects of Alternative Sampling Schemata in the Boreal Forest. *Landscape Urban Planning*, 37, 235–244. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(97\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(97)80007-2)
- Gong, G., Mattevada, S., & O'Bryant, S.E. (2014). Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. *Environmental research*, 130, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.12.005>
- Harding, B.E., & Deutsch, C.V. (2021). Trend Modeling and Modeling with a Trend. In J. L. Deutsch (Ed.), *Geostatistics Lessons*. Retrieved from <http://www.geostatisticslessons.com/lessons/trendmodeling>
- Hernandez-Stefanoni J.L., & Ponce-Hernandez R. (2006). Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: comparison of spatial interpolation methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117(1-3), 307-34. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-0885-z>. PMID: 16917715.
- Hoseinpour, A., Jalilvand, H., Niknejad, M., Parynejad, H., & Savadkahi, A. (2019). Investigating the Effects of Forestry Plans on Tree Diversity Indices Mapped by Kriging Method (A Case Study:

Watson Forestry Plan in the Eastern of Mazandaran). *Iranian Journal of Applied Ecology*, 8(3), 17-30. <https://doi.org/10.47176/ijae.8.3.11651> (In Persian)

Jamshidi Bakhtar, A., Marvie Mohajer, M.R., Sagheb Talebi, Kh., Namiranian, M., & Maroufi, H. (2013). Alteration of plant diversity after fire in Zagros forest stands, case study: Marivan forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(3), 529-541. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2014.4731> (In Persian)

Kalivas, D.P., Kollias, V.J., & Apostolidis, E.H. (2013). Evaluation of three spatial interpolation methods to estimate forest volume in the municipal forest of the Greek island Skyros. *Geo-Spatial Information Science*, 16(2), 100-112. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.766398>

Kambhammettu, B.V.N.P., Allena, P., & King, J.P. (2011). Application and evaluation of universal kriging for optimal contouring of groundwater levels. *Journal of Earth System Science*, 120, 413-422. <https://doi.org/10.1007/s12040-011-0075-4>

King, S.L., Lister, A.J., & Hoppus, M. (2000). A comparison of kriging and cokriging for mapping forest volume in Connecticut. *Proceedings of SOFOR GIS 2000: The 3rd Southern Forest Resources GIS Conference. The Center for Continuing Education, The University of Georgia, Athens, Georgia.*

Miri, N., Fatehi, P., Darvishsefat, A.A., Pir Bavaghar, M., & Homolová, L. (2024). Leaf area index estimation in the Zagros forests of Iran using Sentinel-2 image and Gaussian Process Regression. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(4), 323-337. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.364041.2129> (In Persian)

Munyati, C., & Sinthumule, N.I. (2021). Comparative suitability of ordinary kriging and Inverse Distance Weighted interpolation for indicating intactness gradients on threatened savannah woodland and forest stands. *Environmental and Sustainability Indicators*, 12, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100151>.

Neves, D.A., Lemos, F., González, A.P., Vieira, S.R., & Siqueira, G.M. (2010). Using geostatistics for assessing biodiversity of forest reserve areas. *Bragantia*, 69, 131-140. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000500014>

Oliver, M., & Webster, R. (2014). A Tutorial Guide to Geostatistics: Computing and Modelling Variograms and Kriging. *Catena*, 113, 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>

Parma, R., & Shataee, S. (2013). Estimation of species diversity of trees and shrubs using ETM+ sensor data (Case study of forests in Qalajeh Kermanshah province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(1), 71-78.

Pelissari, A.L.F., Filho, A.F.O.N.S.O., Ebling, A.A., Sanquetta, C.R., Cysneiros, V.C., & Corte, A.P.D. (2018). Spatial variability of tree species diversity in a mixed tropical forest in Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90, 2491-2500. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170826>

Prasertsri, N., Buasri, N., Sangpradid, S., & Utta, T. (2021). Spatial Density Estimates of Plant Biodiversity in KhokHin Lad National Forest, Thailand. *International Journal of Advances in Engineering and Management*, 3(8), 1458-1463. <https://doi.org/10.35629/5252-030814581463>

Rezaei, E., Akhavan, R., Soosani, J., & Pourhashemi, M. (2014). Efficiency of Kriging for Estimation and Mapping of Crown Cover and Density of Zagros Oak Forests (Case study: Dadabad Region, Khorramabad). *Journal of Forest and wood product*, 67(3), 359-539. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2014.52083> (In Persian)

Saed Mocheshei, A., Pir Bavaghar, M., Shabaniyan, N., & Fatehi, P. (2019). Possibility of estimating the woody species diversity using Sentinel optical imagery (Case study: Marivan forests). *Forest and Wood Product*, 72(2), 101-110. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2019.271590.984> (In Persian)

Sagheb Talebi, Kh., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran: A Treasure from the Past, A Hope for the Future. Springer, 152p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4>

Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.

Vafaei, S., Maleknia, R., Naghavi, H., & Fathizadeh, O. (2022). Estimation of forest canopy using remote sensing and geostatistics (Case study: Marivan, Baghan Forests). *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(1), 71-82. (In Persian)

Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., & Armstrong, M.P. (1999). An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*, 31, 375-390. <https://doi.org/10.1023/A:1007586507433>



Woody species diversity estimation using interpolation techniques and satellite imagery (Case study: Marivan Forests)

M. Pir Bavaghar^{*1}

¹Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources & the Center for Research and Development of Northern Zagros Forestry, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

(Received: 4 November 2024; Accepted: 19 February 2025)

Abstract

Introduction: Information about the spatial distribution of plant species diversity is essential for forest managers to identify vulnerable habitats. Comparing different interpolation methods and selecting the best method for estimating the woody species diversity index provides valuable information to forest managers. In this way suitable areas can be identified for reserves and other protected areas.

Material and Methods: In this research, various interpolation methods were investigated to estimate the Shannon Wiener species diversity index, as one of the most important indices of woody species diversity. Ninety-Five square sample plots with an area of 1600 square meters were used to calculate the Shannon Wiener species diversity index in a part of the forests of Marivan. Spatial interpolation methods such as inverse weighted distance (IDW), kriging, and co-kriging were used to estimate the species diversity index. The correlation coefficient between NDVI, RVI, SAVI, and NDWI spectral indices obtained from Sentinel-2 satellite images and the Shannon Wiener species diversity index was calculated, and finally, the SAVI spectral index was used as an auxiliary variable for the co-kriging method due to its higher correlation coefficient.

Results: The structural variance using the kriging and co-kriging methods was 76.8% and 91.4%, respectively, indicating a strong spatial structure of the species diversity index variable in the study area. Based on the analyzed statistics, if the species diversity index variable is used alone, the ordinary kriging method provided the best results and the lowest error compared to IDW (RMSEr = 27.043). In the case of using the SAVI spectral index auxiliary variable and the ordinary co-kriging method, an RMSEr of 26.422% was obtained, which slightly improved the Shannon-Wiener species diversity index estimation results. The influence range was 240 meters in the kriging and 4110 meters in the co-kriging method and the use of auxiliary variables. Using the SAVI spectral index has led to an increase in the range of influence and spatial correlation can be observed over greater distances.

Conclusion: This research showed that it is possible to estimate the Shannon-Wiener species diversity index using different methods of IDW, kriging, and co-kriging in the research area and other areas with a similar situation with acceptable accuracy. The best results were obtained by using the co-kriging method and using the SAVI spectral index as an auxiliary variable. Also, the smallest coefficient of variation of predicted levels was observed in the ordinary co-kriging method.

Keywords: Co-kriging, Kriging, Spatial structure, Zagros.