

## مدلسازی اثر پیوستگی لکه‌های جنگل بر کیفیت آب رودخانه‌ها در حوزه آبریز دریای خزر

سحر حیدری مستعلی<sup>۱\*</sup>، محمود بیات<sup>۲</sup><sup>۱\*</sup> - گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.<sup>۲</sup> - بخش تحقیقات جنگل، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: saharheidari@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۳

## چکیده

در این تحقیق، پیوستگی سیمای سرزمین از منظر سنج‌های سیمای سرزمین (۱۰ شاخص) و شاخص‌های تئوری گراف (۱۲ شاخص) تحلیل شد. در مرحله بعد همبستگی بین شاخص‌های پیوستگی و پارامترهای کیفیت آب با استفاده از ضریب همبستگی اسپیرمن و پیرسون انجام و با روش رگرسیون خطی گام به گام و از طریق مدل‌های رگرسیون توانی، نمایی و لگاریتمی مدلسازی انجام و با ضریب آکائیکه بهترین مدل انتخاب شد. نتایج نشان داد که در بین سنج‌های سیمای سرزمین دو سنجه CONIG و FRAC و نیز طول کریدور و اغلب شاخص‌های پیوستگی تئوری گراف دارای همبستگی منفی معنادار با پارامترهای کیفیت آب بودند. همچنین بیشترین ضریب تبیین یا  $R^2$  متعلق به مدل‌های  $CO_3$  با ضریب تبیین ۰/۸۱۸،  $Ca$  با ضریب تبیین ۰/۷۷۳ و TDS با ضریب تبیین ۰/۷۰۴ بود. همچنین نتایج مدلسازی نشان داد که تقریباً تمامی مدل‌های منتخب با ضریب آکائیکه مدل‌های غیر خطی است. همبستگی معنی دار شاخص‌های پیوستگی سیمای سرزمین به ویژه شاخص‌های پیوستگی تئوری گراف و نیز طول کریدور با شاخص‌های کیفیت آب نشان دهنده تاثیر ویژگی‌های ساختاری سیمای سرزمین بر کیفیت آب در حوزه‌های آبخیز بوده؛ یعنی تکه شدگی سیمای سرزمین و لکه‌ای شدن به شدت بر کیفیت آب اثرگذار است.

## کلمات کلیدی

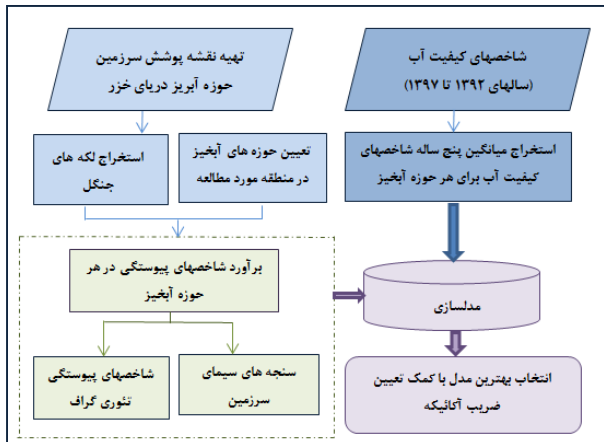
تئوری گراف، سنج‌های سیمای سرزمین، کریدور، جنگل، مدلسازی، کیفیت آب

## ۱. مقدمه

پیوستگی سیمای سرزمین مفهومی مهم در اکولوژی سیمای سرزمین بوده که علاوه بر تاثیر بر حرکت و جا به جایی اجزای زنده در اکوسیستم می تواند شامل حرکت عوامل غیر زنده مانند مواد مغذی و آب باشد. با این حال، معیارهای پیوستگی معمولاً برای اندازه گیری حرکت بالقوه موجودات زنده استفاده می شود. در اکولوژی سیمای سرزمین، پیوستگی سیمای سرزمین بخش مهمی از درک ساختار و عملکردهای فعلی سیمای سرزمین است و به طور منظم برای اهداف برنامه ریزی و حفاظت استفاده می شود. (Spanowicz and Jaeger, 2019) به طور گسترده می توان دو نوع پیوستگی سیمای سرزمین را در نظر رفت: پیوستگی ساختاری و عملکردی. پیوستگی ساختاری پاسخ رفتاری موجودات به ساختار سیمای سرزمین را نادیده می گیرد و فقط روابط فیزیکی میان لکه ها مانند کریدورهای زیستگاه یا فواصل بین لکه را توصیف می کند. این به راحتی با انواع معیارهای سیمای سرزمین یا رویکردهای تحلیلی فضایی اندازه گیری می شود. (Moilanen and Nieminen, 2002) ساختار سیمای سرزمین یکی از مهم ترین فاکتورهایی است که بر مواد غذایی و مواد آلی رواناب در حوزه های آبخیز تأثیر می گذارد (Turner et al. 2003). بنابراین تقاضا برای شاخص ها و روش هایی برای ارزیابی فاکتورهای سیمای سرزمین مؤثر بر کیفیت آب که مدیریت آب‌های شیرین را ممکن می‌سازد، افزایش یافته است. مطالعات زیادی به این نتیجه رسیدند که ساختار سیمای سرزمین یکی از مهم ترین و اصلی ترین فاکتورها در تعیین کیفیت آب است. که این مساله هم در مقیاس جهانی و هم در مقیاسهای محلی و منطقه ای برای کاربری

های کشاورزی و جنگلی و سیمای سرزمین های چندگانه نمایش داده شده است. توزیع فضایی الگوی سیمای سرزمین در یک حوزه آبخیز با فرایند ایجاد آلودگی غیر نقطه ای کاملاً در ارتباط است. برخی از سیمای سرزمین ها مانند مناطق جنگلی می توانند مانع انتشار و یا جذب لاینده های آب رودخانه ها در یک حوزه آبخیز باشند (Xin et al., 2017). بنابراین تغییر در الگوهای سیمای سرزمین می تواند اثر معنادار و مشخصی را بر روی کیفیت آب آن منطقه بگذارد. سنج‌های سیمای سرزمین می تواند ساختار فضایی الگوهای سیمای سرزمین را توصیف کند، که در این زمینه یعنی بین الگوهای ساختار سیمای سرزمین و پارامترهای کیفیت آب یک منطقه، آنالیزهای همبستگی و تجزیه و تحلیل این ارتباطات از طریق مدلسازی بین آنها می تواند مورد استفاده قرار گیرد (Zhang et al., 2018). همچنین پژوهش هایی در خصوص نقش پیوستگی سرزمین در جنبه‌های مختلف کارکردهای اکوسیستم انجام شده است که به طور عمده در ارتباط با حفظ زیستگاه‌ها برای حیات وحش و حمایت از تنوع زیستی بوده است و به سایر جنبه‌های مهم خدمات اکوسیستمی مانند کیفیت آب بسیار کمتر پرداخته شده است (Mitchell et al., 2013). از طرف دیگر مطالعاتی هم که در حوزه بررسی کیفیت آب با رویکرد سیمای سرزمین انجام شده است، تنها به الگو و کاربری‌های سرزمین توجه شده است و تاکنون مطالعه‌ای در زمینه مدلسازی و بررسی تاثیر کریدورهای سیمای سرزمین بر کیفیت آب رودخانه‌ها انجام نشده است. تاکنون روش‌های متعددی در جهت مطالعه، بررسی و اندازه‌گیری پیوستگی اکولوژیک در ایران و در دنیا معرفی شده است. به تازگی محققان علوم محیط‌زیست دریافته‌اند استفاده از تئوری

مراحل کلی انجام این تحقیق در شکل ۲ به طور خلاصه نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمودار مراحل اجرای تحقیق

### • جمع آوری داده‌ها

بدین منظور از آخرین نقشه ملی پوشش جنگل تهیه شده توسط سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور در سال ۱۳۹۷ استفاده شد. این نقشه با دقت بسیار بالا که لکه‌های جنگلی با جزئیات کامل و دقیق استخراج شده تهیه و برای هدف مورد نظر کاملا مناسب است. این نقشه دارای پنج طبقه بدون پوشش جنگلی، جنگل متراکم، نیمه‌متراکم و تنک و باغ است. که طبقه جنگل از این نقشه، استخراج و طبقات بدون پوشش و باغ در نظر گرفته نشد. در شکل ۳ این نقشه ارائه شده است.

### • تعیین حوزه‌های آبخیز

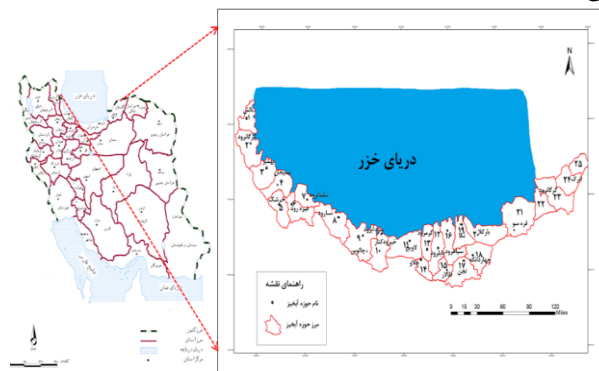
حوزه‌های آبخیز منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 به صورت دستی ترسیم شد. در انتخاب حوزه‌های آبخیز به عنوان واحدهای کاری و بستن مرز حوزه‌ها، مساحت و بزرگی حوزه‌ها اهمیت ویژه‌ای داشت؛ چرا که با توجه به هدف مطالعه که تعیین پیوستگی و ارتباط لکه‌ها با هم، در هر یک از آنها بود، حوزه‌ها باید به اندازه کافی بزرگ انتخاب می‌شدند تا تغییرات پیوستگی ساختاری لکه‌ها کاملا مشهود و قابل بررسی باشد. هرچند حوزه‌های ۱۰۴ گانه تهیه شده توسط سازمان جنگلها و مراتع کشور موجود بود، اما با توجه به اینکه هدف از مطالعه حاضر بررسی ارتباطات ساختاری لکه‌های جنگل با هم بود، باید هر حوزه آبخیز به عنوان یک واحد، حداقل شامل چندین لکه جنگل بود تا بررسی و تحلیل ارتباط و پیوستگی بین آنها امکان پذیر باشد ولی از آنجا که این حوزه‌ها اغلب کوچک بوده و برای هدف مطالعه حاضر مناسب نبودند لذا با توجه به این موضوع و پس از بررسی‌های زیاد، تعداد ۲۵ حوزه کلان آبخیز که در برگیرنده رودخانه‌های اصلی بودند، در سه استان گیلان، مازندران و گلستان به عنوان واحدهای اصلی مطالعه انتخاب شدند و مرز حوزه‌ها به شکل دستی بسته شد که نقشه آنها در شکل ۳ نشان داده شده است.

گراف روشی مؤثرتر در اندازه‌گیری پیوستگی اکولوژیک است (Urban et al., 2009). تئوری گراف ابزاری تصویری است که براساس آن می‌توان یک شبکه را با قوت‌ها و ضعف‌هایش به نمایش گذاشت (Galpern et al., 2011). مطالعات زیادی اذعان کرده‌اند که تئوری گراف روشی مؤثر جهت مدل کردن سیمای سرزمین و برهم کنش‌ها و ارتباطات آنهاست (Zetterberg et al., 2010). به طور کلی گراف به‌عنوان روشی سریع جهت تجزیه و تحلیل مطالعات اکولوژیکی شناخته می‌شود. (Urban and Keitt, 2001) امروزه کمی‌سازی تغییرات در سیمای سرزمین با استفاده از سنجه‌ها دچار تحولات بسیاری شده است. اخیرا سنجه‌های سیمای سرزمین گسترش و تنوع زیادی یافته و از توصیف صرف تغییرات ساختاری به ابزارهایی با امکان کمی‌سازی فرآیندهای اکولوژیکی متحول شده‌اند. در حقیقت، اکولوژی ساختاری سرزمین و نقش آن در خدمات اکوسیستمی به‌عنوان یک شکاف مشخص و مهم، در مطالعات اکولوژی باقی مانده است و به‌طور خاص، هنوز این موضوع که چگونه تغییر در کریدورها و پیوستگی-های سرزمینی می‌تواند بر خدمات و عملکردهای اکوسیستمی اثر بگذارد، به‌طور کامل شناخته نشده است؛ بنابراین مطالعاتی در جهت درک اینکه چگونه جنبه‌های مختلف پیوستگی لکه‌های سرزمینی می‌تواند بر خدمات اکوسیستمی اثرگذار باشد، به‌شدت توصیه می‌شود (Mitchell et al., 2013). بنابراین هدف از این مطالعه مدل‌سازی تاثیر پیوستگی سیمای سرزمین بر کیفیت آب رودخانه‌ها (به عنوان یکی از مهمترین عملکردهای اکوسیستم) در حوزه آبریز جنوبی دریای خزر است که برای این منظور جهت سنجش پیوستگی سیمای سرزمین از تلفیقی از رویکرد سنجه‌های سیمای سرزمین و تئوری گراف و جهت مدل‌سازی از انواع مدل‌های رگرسیون خطی و غیر خطی استفاده شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### • منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در حوضه آبریز جنوبی دریای خزر، بین ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه طول شرقی از نصف النهار مبدا قرار دارد. حوضه آبریز دریای خزر یکی از شش حوضه اصلی کشور محسوب شده و ۵۸۱۶۷ کیلومتر مربع وسعت دارد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

مشخصات این سنجه‌ها را نشان می‌دهد. به منظور محاسبه این سنجه‌ها، هر حوزه آبخیز به عنوان یک واحد انتخاب و طبقه پوشش جنگل متراکم در آن در نظر گرفته شده، سپس هر حوزه ابتدا تبدیل به رستر شده و جهت تحلیل بهتر و با دقت بالاتر پیش از ورود به محیط نرم‌افزار 4.2 Fragstats خروجی مورد نظر، ابتدا در فرمت TIFF ذخیره و سپس وارد محیط نرم‌افزار شد. جدول ۲ این نتایج را نشان می‌دهد.

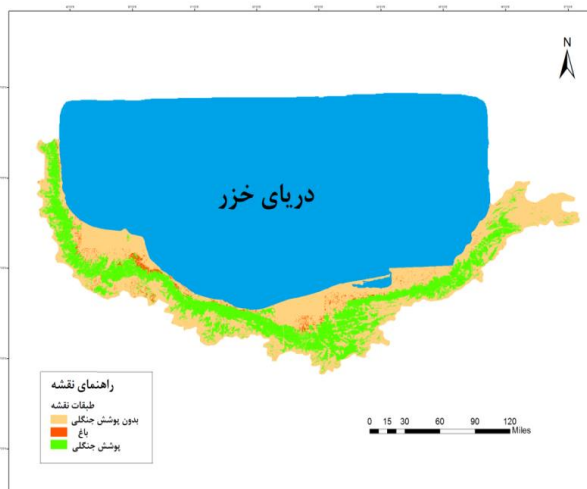
• **تعیین اهمیت لکه‌ها و شاخص‌های تنوری**  
**گراف**

در این مرحله پیوستگی بین لکه‌های کانونی جنگل که قبلاً از نقشه پوشش سرزمین استخراج شده بود، ارزیابی و تعیین می‌شود. این کار با کمک تنوری گراف انجام شد. از آنجا که در این تحقیق، هدف بررسی ساختاری و فیزیکی اتصالات سیمای سرزمین است، لذا از تنوری گراف جهت بررسی کریدورها و پیوستگی بین لکه‌ها استفاده می‌شود. ابتدا کلیه لکه‌های جنگلی که در مراحل قبل از نقشه کاربری سرزمین استخراج شده‌اند، به صورت شبکه‌ای از نقاط و اتصالات در محیط Arc GIS 10.3 مدل‌سازی می‌شود. جهت تهیه شبکه از نرم‌افزار Conefor 2.6 استفاده شد. به این ترتیب، شبکه‌ای متشکل از لکه‌های کانونی جنگل به همراه ارتباط همسایگی‌شان ساخته می‌شود که در واقع هر کدام از این ارتباطات یک اتصال نام دارد. به این ترتیب نخست شبکه‌ای متشکل از لکه‌های جنگل متراکم به همراه ارتباط همسایگی میان آنها ساخته شد، که در واقع هر کدام از این ارتباطات یک اتصال نام دارد. اتصالها براساس فاصله لبه به لبه هر یک از لکه‌ها نسبت به یکدیگر سنجیده و برحسب میزان فاصله بین لکه‌های سبز وزن داده شدند. این شاخصها در جدول ۲ ارائه شده است:

جدول ۱- شاخص‌های پیوستگی سنجه‌های سیمای سرزمین

ردیف	نام شاخص	علامت	نام فارسی
۱	landscape shape	LSI	شاخص شکل سیمای سرزمین
۲	Cohesion	COHESION	شاخص پیوستگی لکه
۳	Contiguity	CONTIG	شاخص همسایگی
۴	perimeter area fractal dimension	PAFRAC	شاخص بعد فراکتال محیط به مساحت
۵	Fractal dimension index	FRAC	شاخص بعد فراکتال
۶	Clumpy index	CLUMPY	شاخص انبوهی
۷	Total edge index	TE	شاخص کل حاشیه
۸	Edge density index	ED	شاخص تراکم حاشیه
۹	Split index	SPLIT	شاخص گسستگی
۱۰	Aggregation index	AI	شاخص تجمع

جدول ۲- شاخص‌های پیوستگی تنوری گراف



شکل ۳- نقشه پوشش جنگلی منطقه مورد مطالعه

• **استخراج داده‌های کیفیت آب**

داده‌های کیفیت آب از شرکت مدیریت منابع آب ایران، اخذ شد که برای پرهیز از تغییرات سالانه و رسیدن به نتایج قابل اتکاء و مهمتر از همه، همزمانی با نقشه ملی پوشش جنگل (Forests, Rangelands and Watershed Management Organization, 2019) از میانگین پنج ساله داده‌های کیفیت آب رودخانه‌های مطالعاتی استفاده شده است. متغیرهای کیفیت آب شامل  $SO_4^-$ , SAR,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , TDS,  $CO_3$ ,  $CO_2$ ,  $HCO_3$ , EC, pH,  $Cl^-$  و دبی آب که میانگین سالهای ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷ محاسبه گردیده.

• **تعیین سنجه‌های پیوستگی سیمای سرزمین در حوزه‌های مطالعاتی**

برای بررسی پیوستگی ساختاری سیمای سرزمین در حوزه‌های مطالعاتی ابتدا از کل نقشه پوشش جنگلی تهیه شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 طبقه جنگل جدا و برای کمی‌سازی شاخصهای سیمای سرزمین از نرم‌افزار 4.2 Fragstats در سطح سیمای سرزمین برای هر یک از ۲۵ حوزه آبخیز استفاده شد. درنهایت با مرور منابع مختلف و متعدد که بررسی پیوستگی سیمای سرزمین را انجام و مطالعه نموده بودند، ۱۰ معیار، شاخص پیوستگی لکه (COHESION)، شاخص همسایگی (CONTIG)، شاخص شکل سیمای سرزمین (LSI) و شاخص فراکتال محیط به مساحت (PAFRAC)، شاخص بعد فراکتال (FRAC)، شاخص انبوهی (CLUMPY)، شاخص کل حاشیه لکه (TE)، شاخص تراکم حاشیه (ED)، شاخص گسستگی (Split) و شاخص تجمع (AI) برای تحلیل وضعیت پیوستگی ساختاری حوزه‌های مطالعاتی محاسبه شد. این سنجه‌ها از گروه سنجه‌های پیکربندی (Configuration) هستند، که طبق مطالعات در بین سایر گروه‌های سنجه‌های سیمای سرزمین، مانند گروه اندازه و مساحت، وضعیت پیوستگی سیمای سرزمین را بهتر نشان می‌دهند (McGarigal et al., 1994; Farina, 1986). جدول ۱

تمام داده‌های مورداستفاده در تحقیق از نظر توزیع نرمال بودن توسط آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مورد آزمون قرار گرفته و در صورت عدم نرمال بودن، تصحیحات لازم جهت ورود داده‌ها به فرایند مدل‌سازی صورت گرفت.

• **مدلسازی رابطه بین شاخص‌های پیوستگی و**

**کریدورهای سیمای سرزمین و کیفیت آب در**

**حوزه‌های آبخیز**

در مرحله بعد مدلسازی بین شاخصهای کیفیت آب (متغیرهای وابسته) و شاخصهای پیوستگی و کریدور (متغیرهای مستقل) با انواع مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی، نمایی، توانی و لگاریتمی انجام شد، تجزیه و تحلیل آماری توسط نرم‌افزارهای SPSS و Excel انجام گرفت و برای مدلسازی ارتباط بین کریدورهای سیمای سرزمین و کیفیت آب رودخانه، از مدل‌های رگرسیونی با روش گام به گام، مورد استفاده قرار می‌گیرد تا مناسبترین مدل برای کیفیت آب تعیین شود. (Bayat et., 2021)

• **اعتبارسنجی مدل**

با استفاده از سنجه‌های اعتبارسنجی، مقادیر سنجه‌های ریشه میانگین مربع خطا ( $RMSE^y$ ) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای هر یک از مدل‌های مرحله پیش، محاسبه شد (Bayat et al., 2023, Heidari Mastali., 2023).

• **انتخاب مدل**

در این مرحله از میان مدل‌های رگرسیونی، از طریق معیار انتخاب مدل آکائیکه انتخاب مناسب‌ترین مدل انجام می‌پذیرد. معیار اطلاعات آکائیکه معیاری است که به کارگیری آن برای مقایسه و گزینش مدل به انتخاب مدلی منجر می‌شود که به خوبی برازش داده شده باشد و در عین حال از تعداد متغیرهای کمتری برخوردار باشد. مقدار عددی معیار اطلاعات آکائیکه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$AIC = (\log RSS/n) + 2k n$$

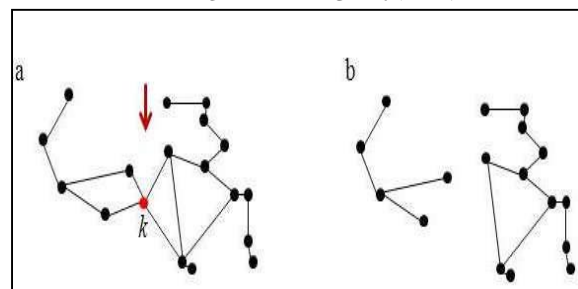
که در آن AIC مقدار عددی معیار اطلاعات آکائیکه، k تعداد متغیرهای مدل که شامل متغیر فاصله از مبدا مدل نیز می‌شود n تعداد نمونه است (Johnson, and Omland, 2004, Bayat et., 2021).

۳. **نتایج**

جدول ۴ نتایج همبستگی شاخصهای کیفیت آب و شاخصهای پیوستگی محاسبه شده را نشان می‌دهد. که بدین منظور از تحلیل پیوستگی اسپیرمن و پیرسون استفاده شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مورد شاخص TDS بیشترین همبستگی با شاخصهای dIIC و dLCP که همبستگی به صورت منفی و به میزان ۰/۷۲۰ بود، همچنین این شاخص با سنجه‌های PAFRAC, TE, FRAC و CONTIG و شاخصهای تنوری گراف dPCflux, dPCintra, dH, dIICflux, dA نیز دارای همبستگی معنی‌دار بود. شاخص EC بیشترین همبستگی با شاخص طول کریدور به صورت منفی و به میزان ۰/۷۱۵ بود. همچنین این شاخص با سنجه‌های

ردیف	نام شاخص	علامت	نام فارسی
۱	Attribute of the node	dA	شاخص اهمیت لکه
۲	Harary index	dH	شاخص Harary
۳	Landscape coincidence probability	dLCP	شاخص احتمال انطباق
۴	Integral index of connectivity	dIIC	شاخص انتگرال پیوستگی
۵	Integral index of connectivity Cintra	dIICintra	شاخص انتگرال پیوستگی Cintra
۶	Integral index of connectivity flux	dIICflux	شاخص انتگرال پیوستگی flux
۷	Integral index of connectivity connector	dIICconnector	شاخص انتگرال پیوستگی عامل انطباق‌دهنده
۸	Probability of connectivity	dPC	شاخص احتمال پیوستگی
۹	Probability of connectivity Cintra	dPCintra	شاخص احتمال پیوستگی Cintra
۱۰	Probability of connectivity flux	dPCflux	شاخص احتمال پیوستگی flux
۱۱	Probability of connectivity connector	dPCconnector	شاخص احتمال پیوستگی عامل انطباق‌دهنده
۱۲	The total length of the corridors	CORRIDOR	شاخص طول کریدور

در رابطه با چگونگی تعیین اهمیت لکه‌ها و اتصالات، بر اساس آنالیز حذف گره یا node-removal با حذف هر یک از نقطه‌های مربوط به مدل شبکه بوم‌شناسی، شبکه مجدداً تشکیل داده می‌شود و سپس میزان پیوستگی نقطه قبل و بعد از حذف نقطه با یکدیگر مقایسه شد (شکل ۴). بدین صورت میزان اهمیت و نقش هر یک از نقطه‌ها و متعاقباً لکه‌های مرتبط با آنها در پیوستگی شبکه مشخص شد.



شکل ۴- نمونه‌ای ساده‌ای از الگوریتم برداشت نقطه (پیوستگی سیمای سرزمین در حالت a؛ یعنی قبل از برداشت نقطه k و حالت b؛ یعنی پس از برداشت نقطه k مقایسه و در نتیجه اهمیت آن تعیین می‌گردد). بدیهی است لکه‌هایی که با حذف آنها پیوستگی شبکه آسیب بیشتری ببیند، دارای اهمیت بیشتری هستند. پس از محاسبه میزان مشارکت لکه‌ها، براساس هر یک از مسافتها تجزیه و تحلیل آماری برای هر دسته از داده‌ها انجام گرفت.

• **آماده‌سازی داده‌ها**

شاخص کیفیت آب بعدی، شاخص SAR بود که بیشترین همبستگی با شاخص dPCintra به صورت منفی و به میزان ۰/۵۳۸ بود. همچنین این شاخص با شاخصهای تئوری گراف طول کریدور و dA، dPCintra و dH نیز دارای همبستگی معنی دار بود. شاخص کیفیت آب بعدی، شاخص دبی آب بود که بیشترین همبستگی با شاخص dPC به صورت منفی و به میزان ۰/۶۴۸ بود. همچنین این شاخص با سنجه های CONTIG و FRAC، و شاخصهای تئوری گراف dIIC, dIICintra, dH, dPCconnector و dLCP dA, dPCintra و dIICflux نیز دارای همبستگی معنی دار بود.

### جدول ۳- نتایج مربوط به مدل‌های منتخب

همان گونه که توضیح داده شد ابتدا همبستگی بین شاخصهای پیوستگی سیمای سرزمین و پارامترهای کیفیت آب تعیین شد که نتایج آن در جدول ۴ آمده است و سپس مدلسازی با انواع مدل‌های رگرسیون خطی و غیر خطی انجام شد و از بین مدل‌ها توسط معیار انتخاب مدل آکائیکه بهترین مدل انتخاب شد که نتایج مربوط به مدل‌های منتخب در جدول ۳ آورده شده است:

### جدول ۴- نتایج همبستگی بین شاخصهای کیفیت آب و شاخصهای پیوستگی

ردیف	نوع مدل	رابطه	R <sup>2</sup>	RMSE
۱	توانی	$\text{LogTDS} = -1.793 - 5.052(\log\text{contig}) + 66.877(\log\text{frac})$	0.704	0.265
۲	نمایی	$\text{LogEC} = 2.535 - 7.138e(\text{corridor})$	0.408	0.0352
۳	لگاریتمی	$\text{Ph} = 15.214 - 2.608(\log\text{dLCP}) - 1.118(\log\text{TE})$	0.558	0.400
۴	لگاریتمی	$\text{CO}_3 = 0.011 - 0.040(\log\text{dA})$	0.818	0.025
۵	نمایی	$\log\text{HCO}_3 = 0.564 - 0.124(\text{dPCintra})$	0.426	0.089
۶	توانی	$\text{LogCl} = 0.488 - 0.168(\log\text{IICintra})$	0.341	0.082
۷	توانی	$\text{LogSo}_4 = 0.182 - 1.337(\log\text{dLCP})$	0.455	0.218
۸	توانی	$\text{LogCa} = 0.230 - 16.450(\log\text{FRAC}) - 0.112(\log\text{dPCconnector})$	0.772	0.095
۹	نمایی	$\text{Logmg} = -1.688 - 0.135(\text{dPCflux}) + 1.136(\text{PAFRAC})$	0.458	0.0739
۱۰	لگاریتمی	$\text{Na} = 1.150 - 2.302(\log\text{dLCP})$	0.507	0.381
۱۱	لگاریتمی	$\text{K} = -0.338 - 0.464(\log\text{contig}) + 5.818(\log\text{FRAC})$	0.695	0.029
۱۲	خطی	$\text{SAR} = 0.315 - 0.041(\text{dIICintra}) - 0.548(\text{dIICconnector})$	0.479	0.026
۱۳	توانی	$\text{Logdebi} = 0.242 + 2.906(\log\text{dIIC}) + 0.229(\log\text{dIICconnector})$	0.733	0.508

CONTIG و FRAC و شاخصهای تئوری گراف dPCflux و dIICflux نیز دارای همبستگی معنی دار بود. شاخص کیفیت آب بعدی، شاخص pH بود که بیشترین همبستگی با شاخص dIIC به صورت منفی و به میزان ۰/۴۴۱ بود. همچنین این شاخص با سنجه CONTIG و شاخصهای تئوری گراف dLCP و dIICflux نیز دارای همبستگی معنی دار بود. شاخص کیفیت آب بعدی، شاخص CO<sub>3</sub> بود که بیشترین همبستگی با شاخص dA به صورت منفی و به میزان ۰/۶۱۲ بود. همچنین این شاخص شاخصهای تئوری گراف dH, dIICintra, dLCP, dIIC, dPCintra و dPCconnector نیز دارای همبستگی معنی دار بود.

در مورد شاخص HCO<sub>3</sub> نیز بیشترین همبستگی با شاخصهای dIICintra که همبستگی به صورت منفی و به میزان ۰/۶۴۳ بود. همچنین این شاخص با سنجه های AI, LSI, CLUMPY و CONTIG و شاخصهای تئوری گراف dIIC, dPCintra, dPCconnector, dH, dLCP و dA نیز دارای همبستگی معنی دار بود.

در مورد شاخص Cl نیز بیشترین همبستگی با شاخصهای dPCintra که همبستگی به صورت منفی و به میزان ۰/۵۸۰ بود. همچنین این شاخص با سنجه Cohesion و شاخصهای تئوری گراف طول کریدور، dH, dIICintra و dA نیز دارای همبستگی معنی دار بود.

در مورد شاخص SO<sub>4</sub> نیز بیشترین همبستگی با شاخصهای dLCP که همبستگی به صورت منفی و به میزان ۰/۷۰۲ بود. همچنین این شاخص با سنجه CONTIG و شاخصهای تئوری گراف dIIC, dPCintra, dPC, dH, dA نیز دارای همبستگی معنی دار بود.

شاخص Ca بیشترین همبستگی با شاخص طول کریدور به صورت منفی و به میزان ۰/۷۶۰ بود. همچنین این شاخص با سنجه های FRAC و CONTIG و شاخصهای تئوری گراف dPCflux و dIICflux نیز دارای همبستگی معنی دار بود. شاخص Mg بیشترین همبستگی با شاخص dPCflux به صورت منفی و به میزان ۰/۶۱۶ بود. همچنین این شاخص با سنجه های FRAC, Split, Cohesion, CONTIG و PAFRAC و شاخصهای تئوری گراف طول کریدور، dIICflux, dPCflux, dIIC, dPC, dLCP نیز دارای همبستگی معنی دار بود. شاخص کیفیت آب بعدی، شاخص Na بود که بیشترین همبستگی با شاخص dLCP به صورت منفی و به میزان ۰/۵۶۴ بود. همچنین این شاخص با سنجه های LSI, TE و CONTIG و شاخصهای تئوری گراف dPC, dPCconnector و dIIC, dIICintra, dH, dA, dPCintra نیز دارای همبستگی معنی دار بود. شاخص کیفیت آب بعدی، شاخص K بود که بیشترین همبستگی با شاخص dLCP به صورت منفی و به میزان ۰/۵۹۸ بود. همچنین این شاخص با سنجه های PAFRAC, TE FRAC و CONTIG و شاخصهای تئوری گراف dIIC, dH, dA, dPCintra, dPC, dPCconnector و dIICflux نیز دارای همبستگی معنی دار بود.

dA	dH	dLCP	dHC	dHCintra	dHCflux	dHCconnector	dPC	dPCintra	dPCflux	dPCconnector	corridor	FRAC	Contig	Cohesion	TE	ED	LSI	PAFRC	CLUMPY	Split	AI	شاخصه ای پیوستگی شاخصه ای کیفیت آب	
-/663**	-/653**	-/720**	-/720**	-/239	-/556**	/134	-/704**	-/516**	-/507**	/225	-/291	-/549*	-/657*	-/306	/520*	/366	/368	-/612**	-/218	-/373	-/081	TDS	
-/189	-/215	-/300	-/335	-/۲۱۱	-/435*	-/075	-/278	-/۱۰۱۰	-/515**	-/135	-/715**	-/534*	-/509*	-/۳۱۲	-/۲۰۸	-/۱۳۴	-/۰۶۱	-/۳۸۶	-/075	-/400*	032/	EC	
-/387	-/374	-/435*	-/441*	-/274	-/397*	-/۱۶۰	-/369	-/367	-/245	-/۲۲۹	-/269	-/292	-/441*	-/۱۰۳	-/۱۲۵	-/150	-/۱۱۵	-/۳۱۶	-/102	-/122	-/127	pH	
-/612**	-/600**	-/606**	-/600**	-/450*	-/395	-/۱۹۴	-/549**	-/582**	-/278	-/۳۸۹	-/127	-/270	-/302	-/۰۸	-/۲۹۷	-/۱۸۴	-/۲۶۹	-/۳۰۰	-/225	-/128	-/0/149	Co <sub>3</sub>	
-/518**	-/508**	-/496*	-/477*	-/643**	-/126	-/۱۱۵	-/482*	-/557**	-/۰۶۷	/558**	-/۲۹۲	-/196	-/402*	-/236	-/۲۵۵	-/۲۷۱	545**	-/۳۰۹	-/492*	-/۲۶۸	-/496*	-/0/149	Hco <sub>3</sub>
-/442*	-/477*	-/387	-/283	-/475*	-/۰۹۵	-/022	-/338	-/580**	-/۲۱۰	-/۲۹۳	-/۴۴۹*	-/۱۹۶	289/	-/406*	-/028	-/۱۷۴	-/۲۱۰	-/216	-/229	-/۳۲۰	-/296	Cl	
-/647**	-/642**	-/702**	-/685**	-/368	-/389	-/۰۳۲	-/654**	-/595**	-/225	-/۲۳۷	-/003	-/328	-/445*	-/۰۶۲	-/۲۰۵	-/۱۵۱	-/۲۳۴	-/۲۶۱	-/143	-/093	-/147	So4	
-/229	-/227	-/285	-/319	-/031	-/418*	-/۲۳۶	-/317	-/107	-/528**	-/175	-/760**	-/446*	-/420*	-/۳۶۷	-/۱۹۸	-/۱۷۶	-/۰۸۱	-/۲۸۷	-/035	-/391	-/۰۶۳	Ca	
-/362	-/365	-/473*	-/489*	-/۱۷۴	-/616**	-/۰۱۸	-/448*	-/138	-/641**	-/167	-/603**	-/441*	-/534*	-/۳۰۲*	-/۳۳۸	-/۱۳۵	-/۱۲۵	-/۵۰۲*	-/055	-/480*	-/۰۸۸	Mg	
-/541**	-/546**	-/564**	-/561**	-/411*	-/401*	-/106	-/546**	-/506**	-/315	/56۲**	-/094	-/345	-/405*	-/۰۱۷	5۳۰**	-/۲۲۹	-/۴۷۳*	-/۲۵۰	-/236	-/۰۳۳	-/141	Na	
-/545**	-/543**	-/598**	-/580**	-/287	-/423*	-/۰۸۳	-/584**	-/444*	-/336	-/۳۶۷	-/105	-/453*	-/548*	-/۱۷۲	-/۳۸۱*	-/۲۴۵	-/۳۷۴	-/۴۳۵*	-/289	-/232	-/161	K	
-/441*	-/453*	-/337	-/321	-/560**	-/۰۶۵	-/315	-/344	-/538**	-/۲۰۷	-/۳۴۹	-/۳۲۰*	-/113	-/010	-/237	-/۰۹۱	-/۲۱۰	-/۲۰۷	-/137	-/209	-/۱۹۴	-/185	SAR	
-/۶۰۷**	604**/	-/۵۹۴**	-/۶۲۹**	-/۴۰۵*	-/۴۰۷*	-/190	648**/	-/۴۹۲*	306/	-/462*	002/	477*/	432*/	-/132	-/383	-/378	-/298	-/171	-/۲۳۲	-/۱۹۶	0/149	دی	

\*\*مفنی دار در سطح ۰۰۵

\*\*\*مفنی دار در سطح ۰۰۱

## ۴. نتیجه گیری

۲۰۰۷ نیز موید همین مطلب است، چنان که آنها هم رابطه منفی بین افزایش میزان پیوستگی سیمای سرزمین و کاهش مواد ارگانیک در آب پیدا کردند. یعنی با افزایش میزان پیچیدگی سرزمین و مقادیر کمتر سنجه CONTIG مقادیر هیومیک و فولویک اسید در آب کاهش یافته است. در نهایت آنها چنین نتیجه گرفتند که در یک سیمای سرزمین در یک کاربری واحد، ترکیب بندی سیمای سرزمین که با سنجه هایی مانند CONTIG محاسبه می شود، نقش مهمی در میزان مواد ارگانیک و نیز مواد غذایی در حوزه های آبخیز یک منطقه ایفا می کند. همچنین Zhang و همکاران در سال ۲۰۲۰ نیز در پژوهش خود در منطقه Wujingang چنین نتیجه گرفتند که سنجه CONTIG به شکل منفی دارای رابطه معنی دار با شاخصهای کیفیت آب بود. شاخص فرکتال نیز نشان دهنده پیچیدگی شکل در طیف وسیعی از مقیاسهای مکانی (اندازه لکه) است. این سنجه نیز با اغلب شاخصهای کیفیت آب دارای همبستگی منفی در سطح معناداری ۹۸ درصد بود که نشان می دهد. هر چه شاخص شکل افزایش پیدا کرده یعنی شکل لکه ها کمتر دستکاری شده و پیچیده تر بوده و دستخوش دخالتهای انسانی واقع نشده و به عبارتی پیوستگی بالاتر بوده، شاخصهای کیفیت آب که دارای همبستگی بود TDS, EC, Ca, Mg, K و دبی نیز کمتر شده، یعنی کیفیت آب بهبود نشان داده است. در این زمینه، می توان مطالعه Song و همکاران در سال ۲۰۲۰ را نام برد که رابطه فاکتورهای کیفیت آب را با الگوهای سیمای سرزمین در حوزه آبخیز Hangzhou چین مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که شاخص های سیمای سرزمین مانند شاخص شکل، شاخص گسستگی و لکه ای شدن، شاخص انطباق و شاخص تنوع همگی دارای رابطه معنی دار با فاکتورهای کیفیت آب بودند. آنها همچنین نتیجه گرفتند پیچیدگی شکل لکه های جنگلی به شکل منفی با آلایندهی آب دارای رابطه معنی دار است که این نتیجه همسو با نتیجه مطالعه حاضر است. در مورد شاخصهای پیوستگی تئوری گراف و همچنین طول کریدورهای بین لکه، می توان گفت تقریباً همه این شاخصها با اکثر شاخصهای کیفیت آب در سطح معناداری ۹۸ درصد دارای رابطه معناداری منفی بودند.

شاخص dIIC یا انتگرال پیوستگی و ترکیبات آن یعنی dIICintra، dIICflux and dIICconnector یکی از مهمترین شاخصهای تئوری گراف است که اهمیت یک لکه از لحاظ حفظ پیوستگی کلی یک سیمای سرزمین را مشخص می کند. همچنین شاخص dLCP یا احتمال پیوستگی نیز مانند شاخص قبل احتمال پیوستگی بین لکه های را محاسبه کرده و مقدار عددی آن با افزایش پیوستگی بین لکه ها افزایش می یابد (Bodin and Saura, 2010; Baranyi et al., 2011; Saura and Torné, 2012). تئوری گراف ابزاری قدرتمند هم در جهت ارزیابی و کمی کردن پیوستگی ساختاری و هم جهت بررسی پیوستگی عملکردی بین لکه های جنگل دارای کاربرد است. با استفاده از این رویکرد می توان مهمترین کریدورهایی که ارتباط واقعی بین لکه های یک سیمای سرزمین را ایجاد کرده و همچنین اولویت بندی آنها را برای اهداف مختلف انجام داد (Smith et al., 2011, Roy et al., 2010). شاخص های پیوستگی نشان داد که تقریباً تمامی مدل‌های منتخب مدلهای

در این پژوهش، ۱۰ معیار سیمای سرزمین مورد بررسی قرار گرفت؛ به طور کلی از منظر سنجه‌های پیوستگی سیمای سرزمین غالب حوزه‌ها متوسط و ضعیف از نظر پیوستگی هستند. از آنجا که با بررسی سنجه‌های شکل و بعد فراکتال مشخص شد وضعیت شکل اغلب لکه‌ها متوسط بوده و تقریباً حالت بینابینی از لحاظ سادگی و پیچیدگی دارند؛ و نیز با تجزیه و تحلیل شاخصهای پیوستگی و همسایگی لکه‌ها آنچه در ارتباط با وضعیت پیوستگی لکه‌های جنگل، به نظر می‌رسد وجود گسستگی فراوان و فاصله زیاد لکه‌ها از هم است که سبب پایین بودن شاخص‌های پیوستگی شده است. نتایج تحلیل شاخصهای تئوری گراف هم یافته‌هایی مشابه بدست داد؛ ۱۲ معیار پیوستگی بررسی شد که اگر دو شاخص مهم از میان آنها، یعنی شاخص انتگرال پیوستگی (dICC) و شاخص احتمال پیوستگی (dPC) تفسیر شود. در بین سنجه‌های سیمای سرزمین سنجه CONTIG و همچنین سنجه FRAC با اکثر شاخص‌های کیفیت آب دارای همبستگی منفی معنی‌دار در سطح ۹۸ درصد بود. همچنین در بین شاخص‌های تئوری گراف نیز شاخص‌های طول کریدور، شاخص dPC، شاخص dIIC، dH و dA با تعداد زیادی از شاخص‌های کیفیت آب دارای رابطه معنی‌دار بودند. سنجه CONTIG که به آن شاخص همسایگی هم اطلاق می‌شود سنجه ای است که ارتباطات همسایگی یک لکه با لکه های اطراف خود را آنالیز می‌کند. از آنجا که هر چه سیمای سرزمین از هم گسیختگی و به عبارتی لکه شدگی کمتر اتفاق بیفتد پیوستگی بالاتر است، لذا بالاتر بودن این شاخص نشان از لکه لکه شدگی یا fragmentation بوده و کمتر بودن آن نشان دهنده پیوستگی بالاتر لکه ها و یکپارچگی آنهاست (Karami and Mirsanjari, 2018). از آنجا که این ارتباط با شاخصهای کیفیت آب در سطح ۹۸ درصد معنادار ارزیابی شد، و از آنجا که این رابطه اکثراً منفی بود پس می توان نتیجه گرفت هر چه مجاورت و ارتباطات همسایگی لکه ها با هم افزایش یافته، میزان شاخصهای کیفیت آب مانند TDS, EC, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Ca, Mg, Na, K و دبی کاهش یافته و یا به عبارت دیگر کیفیت آب بهبود داشته است. در این زمینه پژوهش Uuema و همکاران در سال غیر خطی بوده و در نتیجه می توان گفت روابط بین شاخصهای پیوستگی سیمای سرزمین و پارامترهای کیفیت آب رابطه ای غیر خطی است. همچنین، نتایج مدلسازی رگرسیون چندگانه خطی و غیر خطی بین متغیرهای کیفیت آب به عنوان متغیر وابسته و شاخصهای پیوستگی سیمای سرزمین به عنوان متغیر مستقل نشان داد که تعدادی از مدل ها دارای ضرائب R<sup>2</sup> بالایی بودند و به طور کلی این ضریب برای تمامی مدل‌های ساخته شده و منتخب بین ۰/۸۱۸ تا ۰/۳۴ متغیر بود. بالاترین ضریب R<sup>2</sup> متعلق به مدل CO<sub>3</sub> بوده (۰/۸۱۸) و کمترین نیز مربوط به مدل Cl (۰/۳۴) هست. مدل TDS مدل توانی و دارای ضریب R<sup>2</sup> ۰/۷۰۴، مدل pH ۰/۵۵۷، مدل EC ۰/۴۰۸، مدل HCO<sub>3</sub> ۰/۴۲۶، مدل SO<sub>4</sub> ۰/۴۵۵، مدل Ca ۰/۷۷۷، مدل Mg ۰/۴۵۸، مدل Na ۰/۵۱۸، مدل SAR ۰/۶۹۵، مدل ۰/۴۷۹ و مدل دبی ۰/۷۳۳ می باشد. بنابراین چنان چه از نتایج مشخص است تعدادی از مدل‌ها دارای ضرائب R<sup>2</sup> بالاتر نسبت به بقیه هستند که از آن جمله می توان به مدل‌های CO<sub>3</sub>, TDS, Ca, K و دبی اشاره کرد. در این زمینه پژوهش Zhang و

همکاران در سال ۲۰۱۸ در منطقه رود Jiulong در چین داشتند و از مدل رگرسیون چندگانه خطی استفاده کرده و شاخصهای سیمای سرزمین و کیفیت آب را مدلسازی کردند ضریب  $R^2$  رابرای مدل pH برابر با ۰/۷۴ در سطح حوزه آبخیز محاسبه کردند. مطالعه دیگر در این زمینه پژوهش Wu و همکاران در سال ۲۰۱۲ است که رابطه بین سنجه های سیمای سرزمین و فاکتورهای کیفیت آب شامل  $EC$ ,  $pH$ ,  $SS$ ,  $DO$ ,  $COD$ ,  $TN$ ,  $TP$ ,  $NO_3^-$ ،  $N$ ،  $NH_4^+$  را برای ۲۴ حوزه آبخیز در منطقه Sihu چین مورد بررسی قرار داده و در این زمینه مدل های آومتريک را با مدل های رگرسیون ساده خطی مقایسه کردند که نتایج نشان داد در مقایسه با مدل های رگرسیون خطی ساده مدل های آومتريک برای متغیرهای  $SS$ ,  $DO$ ,  $TP$ ,  $TN$ ,  $NH_4^+$ ،  $N$ ،  $NH_4^+$ ،  $NO_3^-$ ،  $EC$  و  $NO_3^-$  اختلاف معنی داری بین این دو مدل دیده نشده. چنان چه نتایج پژوهش حاضر هم دقیقاً همسو با همین یافته هاست چرا که همان گونه که در نتایج مشاهده شد مدل های آومتريک بهتر از مدل های رگرسیون خطی توانستند تغییرات شاخصهای کیفیت آب را پیش بینی کنند. همچنین پژوهش دیگری که به نوعی نتایج حاصل از مطالعه حاضر را تایید می کند، پژوهش Wu و Lu در سال ۲۰۲۱ است که ۱۲ زیرحوزه آبخیز را در غرب چین مورد مطالعه قرار داده و رابطه بین شاخصهای کیفیت آب و طبقات مختلف شاخصهای سیمای سرزمین شامل شاخصهای پیکربندی سیمای سرزمین، شاخصهای فیزیوگرافی سیمای سرزمین و شاخصهای ترکیب بندی سیمای سرزمین را مورد مطالعه قرار داده و مدل سازی کردند که مشابه مطالعه حاضر به این نتیجه رسیدند که شاخصهای پیکر بندی سیمای سرزمین که همان گونه که پیش تر اشاره شد، به نوعی مؤید پیوستگی سیمای سرزمین هستند توانسته بودند تغییرات فاکتورهای کیفیت آب را بیش از سایر گروه ها توصیف کنند. آنها همچنین نتیجه گرفتند شاخص شکل و پیچیدگی شکل سیمای سرزمین مهمترین کلید اصلی شاخصهای توصیف کننده سیمای

سرزمین در منطقه مورد مطالعه بوده است. پژوهش دیگری که یافته های این مطالعه را به نوعی تایید می کند پژوهش Clément و همکاران در سال ۲۰۱۷ است که در ۲۵۰ زیر حوزه آبخیز در شرق کانادا این مطالعه را انجام داده و به این نتیجه رسیدند که شاخصهای پیکربندی سیمای سرزمین توانسته اند حدود ۴۸٪ از تغییرات کیفیت آب را در فرایند مدل سازی توصیف کنند. آنها همچنین بیان داشتند که شکل و موقعیت لکه های جنگلی دارای رابطه معنی داری با متغیرهای کیفیت آب بودند. نتایج مدل سازی نشان داد که تقریباً تمامی مدل های منتخب با ضریب آکائیکه مدل های غیر خطی بوده و این نشان دهنده روابط غیر خطی بین شاخصهای پیوستگی و پارامترهای کیفیت آب است. همچنین همبستگی معنی دار شاخصهای پیوستگی سیمای سرزمین به ویژه شاخصهای پیوستگی تئوری گراف و نیز طول کریدور با شاخصهای کیفیت آب نشان دهنده تاثیر ویژگیهای ساختاری سیمای سرزمین بر کیفیت آب در حوزه های آبخیز بوده؛ یعنی تکه شدگی سیمای سرزمین و لکه ای شدن به شدت بر کیفیت آب اثر گذار است. بنابراین این مطالعه به عنوان نخستین مطالعه ای که اثر شاخصهای پیوستگی و کریدورهای سیمای سرزمین را بر کیفیت آب حوزه های آبخیز برری نمود، نشان داد که کریدورهای سیمای سرزمین علاوه بر تاثیری که تا کنون در مطالعات مختلف بر تنوع زیستی حیات وحش یک منطقه بررسی شده، تاثیر زیادی نیز بر سایر عملکردهای یک اکوسیستم مانند تامین و کیفیت آب می گذارد که این لزوم حفاظت و جلوگیری از گسستگی و لکه ای شدن سیمای سرزمین را نشان می دهد.

با توجه به سهولت استفاده تئوری گراف و شاخصهای پیوستگی حاصل از آن، و در عین حال دقت نتایج در بررسی پیوستگی سیماهای سرزمین، استفاده از این رویکرد به عنوان روشی کارا توصیه می شود. با شناسایی لکه های با ارزش، برنامه ریزی های مدیریتی باید به سمت حفاظت از آنها سوق داده شود تا بیشترین سود با حداقل هزینه ها در جهت حفاظت از لکه های با اهمیت به دست آید.

## منابع

- Bayat, M., Bettinger, P., Masteali, S.H., Hamidi, S.K., Masood Awan, H.U. and Abolhasani, A., 2023. Recreation Potential Assessment at Tamarix Forest Reserves: A Method Based on Multicriteria Evaluation Approach and Landscape Metrics. *Forests*, 14(4), p.705.
- Bayat, M., Burkhart, H., Namiranian, M., Hamidi, S.K., Heidari, S. and Hassani, M., 2021. Assessing Biotic and Abiotic Effects on Biodiversity Index Using Machine Learning. *Forests* 2021, 12, 461.
- Bayat, M., Bettinger, P., Heidari, S., Hamidi, S.K. and Jaafari, A., 2021. A Combination of Biotic and Abiotic Factors and Diversity Determine Productivity in Natural Deciduous Forests. *Forests*, 12(11), p.1450.
- Bodina, O., Saurac, S. (2010). Ranking individual habitat patches as connectivity providers: Integrating network analysis and patch removal experiments. *Ecological Modelling*, 221, 2393-2405.
- Farina, A. (1998). Principles and methods in landscape ecology. Springer, Netherlands, 235pp
- Griffith, J.A., Martinko, E.A., Whistler, J.L. Price, K.P. (2002). Preliminary comparison of landscape pattern-normalized difference vegetation index (NDVI) relationships to central plains stream conditions. *Environ. Qual.*, 31(3), 846–859.
- Johnson, J.B., Omland, K.S. (2004). Model selection in ecology and evolution. *Trends in ecology & evolution*, 19(2), 101-108.



- Karami, P., Mirsanjari, M. (2018). Analysis of Landscape Degradation in the Hawizeh Wetland by Using Remote Sensing. *Wetland Ecobiology*, 10 (1),39-54
- Baranyi, G., Saura, S., Podanic, J., Jord, J. (2011). Contribution of habitat patches to network connectivity: Redundancy and uniqueness of topological indices. *Ecological Indicators*, 11, 1301-1310 (In Persian).
- Li, X.Z., Jongman, R.H.G., Hu, Y.M., Bu, R.C., Harms, B., Bregt, A.K., He, H.S. (2005). "Relationship between landscape structure metrics and wetland nutrient retention function: A case study of Liaohe Delta, China". *Ecological Indicators*, 5(4), 339–349.
- Li, H.; Liu, L.; Ji, X. (2015). Modeling the relationship between landscape characteristics and water quality in a typical highly intensive agricultural small watershed, Dongting Lake Basin, South Central China. *Environ. Monit. Assess*, 187, 129.
- Liu, W., Zhang, Q., Liu, G. (2012). Influences of watershed landscape composition and configuration on lake-water quality in the Yangtze River basin of China. *Hydrol. Process*, 26, 570–578
- McGarigal, K., Marks, B.J. (1994). Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. 134 pages, Available in Patch Analyst software help (metrics definition).
- Mitchell, M. G., Bennett, E. M., Gonzalez, A. (2013). Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps. *Ecosystems*, 16(5), 894-908.
- Pascual-Hortal, L., Saura, S. (2007). Impact of spatial scale on the identification of critical habitat patches for the maintenance of landscape connectivity. *Landscape and Urban Planning*, 83(2-3), 176-186.
- Masteali, S.H., Bettinger, P., Bayat, M., Amiri, B.J. and Awan, H.U.M., 2023. Comparison between graph theory connectivity indices and landscape connectivity metrics for modeling river water quality in the southern Caspian sea basin. *Journal of Environmental Management*, 328, p.116965.
- Spanowicz, A.G., Jaeger, J.A., (2019). Measuring landscape connectivity: On the importance of within-patch connectivity. *Landscape Ecology*, 34(10),2261-2278.
- Song, Y., Song, X. and Shao, G. (2020). Response of water quality to landscape patterns in an urbanized watershed in Hangzhou, China. *Sustainability*, 12(14), 5500.
- Turner, R.E., Rabalais, N.N., Justic, D., Dortch, Q. (2003), "Global patterns of dissolved N, P and Si in large rivers", *Biogeochemistry*, 64(3), 297–317.
- Tischendorf, L., Fahrig, L. (2000). On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*, 90, 7-19.
- Uuemaa, E., Roosaare, J., Mander, U. (2007), "Landscape metrics as indicators of river water quality at catchment scale". *Nordic Hydrology*, 38(2), 125–138
- Wu, J. Hobbs, R. 2002. Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology* 7: 355–365.
- Wu, J., Lu, J. (2021). Spatial scale effects of landscape metrics on stream water quality and their seasonal changes. *Water Research*, 191, 116811.
- Xia, L.L., Liu, R.Z., Zao, Y.W. (2012). Correlation Analysis of Landscape Pattern and Water Quality in Baiyangdian Watershed. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 2188 – 2196.
- Xiao, R., Wang, G., Zhang, Q., Zhang, Z. (2016). Multi-scale analysis of relationship between landscape pattern and urban river water quality in different seasons. *Sci. Rep*, 6, 25250.
- Xiao, H.G., Ji, W. (2007), "Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques", *Journal of Environmental Management*, 82(1), 111–119,
- Zhang, X., Liu, Y. Zhou, L. (2018). Correlation analysis between landscape metrics and water quality under multiple scales. *International journal of environmental research and public health*, 15(8), 1606.

## Modeling the effect of forest patch connectivity on river water quality in the Caspian Sea basin

<sup>1</sup>Sahar Heidari Masteali,

<sup>2</sup>Mahmoud Bayat

\ Faculty of Natural Resources, University of Tehran

\*(saharheidari@ut.ac.ir)

<sup>2</sup>Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization

### Abstract

In this research, the continuity of land landscape was analyzed from the perspective of land landscape metrics (10 indicators) and graph theory indicators (12 indicators). First the correlation between correlation indices and water quality parameters was performed using Spearman and Pearson correlation coefficient and then with the help of stepwise linear regression method and through power, exponential and logarithmic regression models and using Akaike coefficient, the best model was chosen. The results showed that there was a significant negative correlation with water quality parameters between the land quality measures of CONIG and FRAC and the length of the corridor and most of the continuity indices of graph theory. Also, the highest coefficient of explanation or  $R^2$  belonged to  $CO_3$  models with a coefficient of explanation of 0.818, water flow with a coefficient of explanation of 0.733, Ca with a coefficient of explanation of 0.772 and TDS with a coefficient of explanation of 0.704. Almost all selected models are nonlinear models. Significant correlation of land feature continuity indicators, especially graph theory continuity indicators and corridor length with water quality indicators, shows the effect of structural features of land landscape on water quality in watersheds.

**Keywords:** Graph theory, Landscape metrics, Corridors, Forests, Modeling, Water quality.

### Introduction:

The forests of the Caspian basin are one of the most important forest resources in Iran country, but what is seen as a large gap in research in this area is the need to pay attention to the structural dimensions, especially to maintain the structural connectivity of these forests. Various studies have attempted to determine the relationship between land cover structure and water quality, but most these, rely on landscape measures. It is also important not only to understand the total area of the resource and storage, but also their spatial arrangement with respect to the routes. Therefore, the evaluation of this relationship remains an important gap in research in this field. Therefore, the present study was conducted with the aim of modeling the effect of landscape connectivity on water quality indicators in forest patches of the Caspian Basin. In order to analyze the connectivity, a combination of graph theory and land use measurement approaches was used.

Each of these methods has limitations and advantages. Graph theory is an image tool based on which a network can be represented with its strengths and weaknesses. Numerous studies have acknowledged that graph theory is an effective way to model the landscape and its interactions and relationships. Graphs are generally recognized as a rapid method for analyzing ecological studies.

The first application of graph theory in ecology was made by Kantwell and Foreman in 1993 by simulating a heterogeneous land image. Then Bann et al. (2000) used graph theory to measure the coherence of the landscape and since then this theory has been increasingly used in the study of coherence. As a result, graph theory is often used in studies to measure and measure connectivity. Whereas the structural patterns that make up the landscape depend on the size, shape, number, origin and, most importantly, the arrangement of the patches in the landscape. Therefore, land use metrics are a good tool to express the structure of land appearance. Landscape metrics focus on the spatial characteristics and distribution of patches in the landscape. Although individual patches have few spatial characteristics, total patches can have multiple collective characteristics, which may be a type of patch or a set of patches.

### Materials and methods:

The study area is located in the southern catchment area of the Caspian Sea, between 36 degrees and 33 minutes to 38 degrees and 8 minutes north latitude and 48 degrees and 32 minutes to 56 degrees and 19 minutes east longitude of the origin meridian. The Caspian Sea catchment is one of the six main basins of the country and has an area of 58,167 square kilometers. Figure 1 shows the location of the study area.

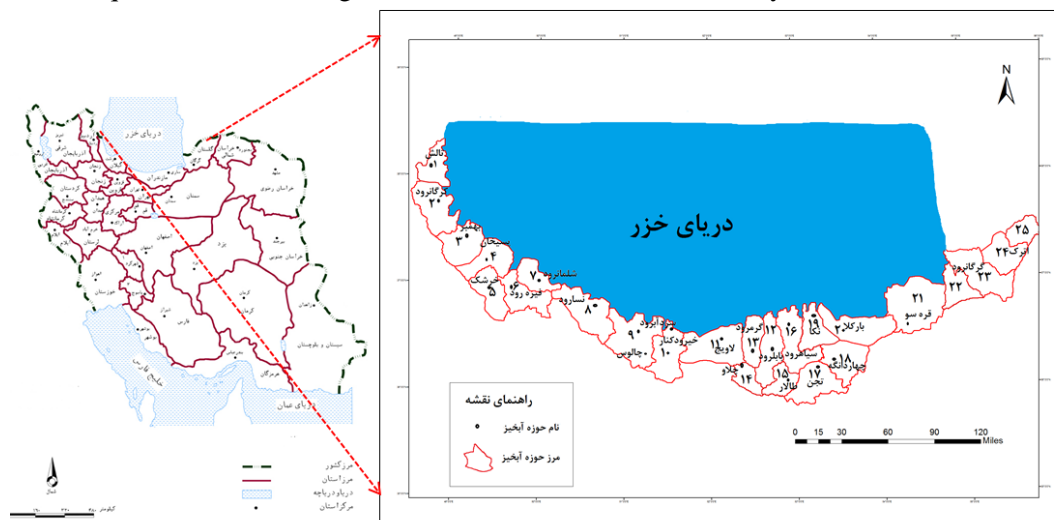


Figure 1- Location of the study area

First, the forest layer was extracted from the land cover map and 25 large watersheds were selected. Landscape connectivity was analyzed and calculated from the perspective of land landscape metrics (10 indicators) and graph theory indicators (12 indicators). In the next step, first the correlation between correlation indices and water quality parameters was performed using Spearman and Pearson correlation coefficient and then with the help of stepwise linear regression method and through power, exponential and logarithmic regression models and modeling using Akaike coefficient. The best model was chosen.

### Discussion and Results:

The results of correlation analysis also showed that there was a significant negative correlation with water quality parameters between the land quality measures of CONIG and FRAC and the length of the corridor and most of the connectivity indices of graph theory. Also, the highest coefficient of determination or  $R^2$  belonged to  $CO_3$  models with a coefficient of explanation of 0.818, water flow with a coefficient of explanation of 0.733, Ca with a coefficient of explanation of 0.772 and TDS with a coefficient of explanation of 0.704.

Table 1- Results of selected models

RMSE	R <sup>2</sup>	Relation	Model Type	Number
0.265	0.704	LogTDS= -1.793-5.052 (logcontig)+66.877(logfrac)	Power	1
0.0352	0.408	LogEC= 2.535-7.138e(corridor)	exponential	2
0.400	0.558	Ph= 15.214-2.608(logdLCP)-1.118(logTE)	Logarithmic	3
0.025	0.818	CO <sub>3</sub> =0.011-0.040(logdA)	Logarithmic	4
0.089	0.426	logHCO <sub>3</sub> =0.564-0.124(dPCintra)	exponential	5
0.082	0.341	LogCl=0.488-0.168(logIICintra)	Power	6
0.218	0.455	LogSo <sub>4</sub> =0.182-1.337(logdLCP)	Power	7
0.095	0.772	LogCa= 0.230-16.450(logFRAC)-0.112(logdPCCconnector)	Power	8
0.0739	0.458	Logmg= -1.688-0.135(dCPflux)+1.136(PAFRAC)	exponential	9
0.381	0.507	Na= 1.150-2.302(logdLCP)	Logarithmic	10
0.029	0.695	K= -0.338-0.464(logcontig)+5.818(logFRAC)	Logarithmic	11
0.026	0.479	SAR= 0.315-0.041(dIICintra)-0.548(dIICconnector)	Linear	12
0.508	0.733	Logdebi= 0.242+2.906(logdIIC)+0.229(logdIICconnector)	Power	13

Considering the importance of maintaining the cohesion of forest patches, and its role in preserving the biodiversity and functions of Caspian forests, the results of this study will be used in forest management and rehabilitation programs; So that in areas with low connectivity, extensive programs are needed to rehabilitate and prevent further rupture of these patches. Also, the modeling results showed that almost all selected models with non-linear models are nonlinear models and this shows the nonlinear relationships between connectivity indices and water quality parameters. The results showed that graph theory indicators are a powerful, simple and at the same time efficient tool for examining the connectivity of patches in a landscape. Also, the significant correlation of land feature

connectivity indicators, especially graph theory connectivity indicators and corridor length with water quality indicators, shows the effect of structural features of land landscape on water quality in watersheds; That is, fragmentation of the landscape and staining greatly affects water quality.

**Conclusion:**

Therefore, this study was the first study to investigate the effect of connectivity indicators on water quality of watersheds, showed that land connectivity in addition to the effects that have been studied in various studies on wildlife biodiversity in an area, Also has a great impact on other functions of an ecosystem, such as water supply and quality, which shows the need to protect and prevent the rupture and staining of the landscape. Due to the ease of use of graph theory and the resulting connectivity indicators, and at the same time the accuracy of the results in examining the connectivity of land features, the use of this approach is recommended as an efficient method. With the identification of valuable patches, management planning should be directed towards their protection in order to obtain the maximum profit with the least cost in order to protect important patches.