

ارزیابی کیفیت محیط زیست با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش از دور بهبود یافته (IRSEI) با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین (مطالعه موردی: شهرستان قائمشهر)

مرضیه احمدی^{۱*}، لیلا گلی مختاری^۲، ابوالقاسم امیراحمدی^۳

۱- دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی دانشگاه حکیم سبزواری،

marzieh.ahmadi0513@gmail.com

۲- استادیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی دانشگاه حکیم سبزواری،

l.mokhtari@hsu.ac.ir

۳- استاد گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی دانشگاه حکیم سبزواری،

amirahmadi1388@gmail.com

چکیده

نظارت بر کیفیت اکولوژیکی و محیط زیستی در حوضه و تجزیه و تحلیل عوامل محرک برای حفاظت از محیط زیست اکولوژیکی و بهبود کیفیت اقتصادی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله از ۵ دوره تصاویر سنجش از دور لندست در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۴، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۴ به عنوان داده‌های پایه استفاده شده است و از بسترها و ابزارهای فنی مانند RS و GIS برای رمزگشایی و استخراج سه دوره اطلاعات کاربری اراضی استفاده شده است. شاخص اکولوژیکی سنجش از دور بهبود یافته (IRSEI) و روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) برای ساخت مدل بهبود یافته شاخص محیط زیستی سنجش از دور (IRSEI) بر اساس سبزی (KNDVI)، رطوبت (LSM)، گرما (LST)، خشکی (NDBSI) و شوری (NDSI) به منظور تحقق نظارت پویا کیفیت اکولوژیکی و محیط زیستی در شهرستان قائمشهر، بر اساس روند بهبود شاخص اکولوژیکی سنجش از دور (IRSEI) انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص اکولوژیکی سنجش از دور بهبود یافته (IRSEI) می‌تواند الگوی توزیع مکانی و روند تغییرات زمانی IRSEI را در منطقه مورد مطالعه به‌طور کارآمد و دقیق به دست آورد که با ویژگی‌های شاخص‌های این منطقه همخوانی بیشتری دارد. IRSEI در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۴ روند کاهشی نشان داد، از ۰/۶۱۵۴ به ۰/۵۲۴۰ رسید و نسبت طبقات اکولوژیکی طبقات خیلی ضعیف و ضعیف سال به سال در طول دوره افزایش یافت. در بین شاخص‌های ارزیابی، KNDVI و NDBSI از عوامل اصلی تأثیرگذار بر کیفیت محیط زیستی و اکولوژیکی شهرستان قائمشهر هستند و افزایش پوشش گیاهی، تنظیم اقلیم و فعالیت‌های انسانی تأثیرات ترویجی آشکاری بر بهبود محیط زیست محیطی دارد.

کلمات کلیدی: شاخص IRSEI، روش PCA، ماهواره لندست، شهرستان قائمشهر.

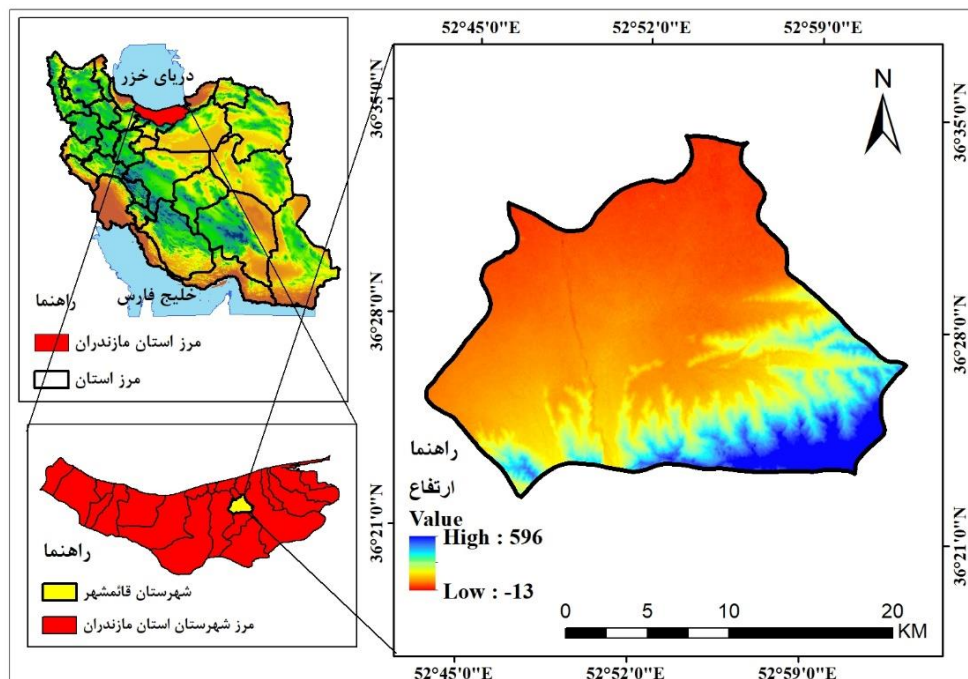
۱. مقدمه

محیط زیست به عنوان یک عنصر اساسی در توسعه انسانی و سرزمینی شناخته می‌شود که انسان‌ها به آن وابسته هستند. این وابستگی، محیط زیست را به یک عامل کلیدی برای تحقق توسعه پایدار اقتصادی و اجتماعی تبدیل می‌کند. به منظور دستیابی به این هدف، ارزیابی علمی و دقیق کیفیت محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. این ارزیابی‌ها می‌توانند به عنوان یک پایه علمی معتبر برای نظارت، حفاظت و مدیریت اکولوژیکی محیط زیست عمل کنند. برای پایش و بررسی وضعیت کنونی و تحولات کیفیت محیط زیست، از روش‌های مختلف ارزیابی بهره‌برداری می‌شود. این روش‌ها نه تنها به شناسایی مشکلات موجود کمک می‌کنند، بلکه زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های مؤثر و بهینه‌سازی فرآیندهای مدیریتی نیز می‌گردند. با توجه به تغییرات سریع جهانی و چالش‌های زیست‌محیطی، توجه به این ارزیابی‌ها و استفاده از آن‌ها در سیاست‌گذاری‌های محیط زیستی، امری ضروری به شمار می‌آید [1]. فناوری سنجش از دور به عنوان یک ابزار کلیدی برای پایش محیط زیست شناخته می‌شود. این فناوری به طور خاص با استفاده از مشاهدات طولانی‌مدت، نظیر شاخص گیاهی نرمال شده (NDVI)، ویژگی‌های اکولوژیکی خاصی از محیط را تحلیل می‌کند. با این حال، سیستم‌های اکولوژیکی به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی و تأثیرات متنوع عوامل مختلف، ارزیابی دقیق با استفاده از یک شاخص واحد را دشوار می‌سازند. بنابراین، در مطالعات محیط زیستی، ضروری است که به جای تمرکز بر یک شاخص یا عامل خاص، تحلیل جامعی از مجموعه‌ای از عوامل تأثیرگذار انجام شود تا از یک‌سویه‌نگری و قضاوت‌های ذهنی جلوگیری گردد [2]. شاخص اکولوژیکی سنجش از دور بهبود یافته (IRSEI) به طور گسترده‌ای در ارزیابی کیفیت اکوسیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و به تجزیه و تحلیل "سلامت" اکوسیستم‌ها می‌پردازد. با معرفی IRSEI، مزایای قابل توجهی از جمله سهولت در جمع‌آوری داده‌ها، تسریع در فرآیند تحلیل و قابلیت تجسم نتایج به وجود آمد. به همین دلیل، این شاخص به طور وسیعی در تحقیقات کیفیت محیط زیست در مقیاس‌های مختلف، از جمله مناطق معدنی و شهری، به کار گرفته شده است. این نوع تحقیقات علاوه بر ارائه ارجاعات عملی، به عنوان یک پایه نظری برای ارزیابی محیط زیست بر اساس سنجش از دور عمل می‌کنند و به درک بهتری از وضعیت اکوسیستم‌ها کمک می‌نمایند [3]. مطالعات مختلف در زمینه بررسی شرایط کیفیت محیط زیست در ایران [4,5] و در خارج [6,7,8] انجام شد که نشان دهنده اهمیت بررسی موضوع شرایط کیفیت محیط زیست می‌باشد.

۲. مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

شهرستان قائم‌شهر یکی از شهرستان‌های واقع در استان مازندران است که در محدوده طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۷۲ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۰۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه شمالی قرار دارد. بر اساس آمار سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت این شهرستان حدود ۳۰۹۱۹۹ نفر برآورد شده است که از این تعداد، ۲۱۵۲۸۰ نفر در مناطق شهری و ۹۳۹۱۹ نفر در مناطق روستایی سکونت دارند. از نظر جغرافیایی، شهرستان قائم‌شهر از سمت شرق به شهرستان ساری، از سمت غرب به شهرستان بابل، از شمال به شهرستان‌های سیمرغ و جویبار و از سمت جنوب به شهرستان سوادکوه شمالی محدود می‌شود. این موقعیت جغرافیایی، اهمیت ویژه‌ای به شهرستان قائم‌شهر می‌بخشد و به عنوان یک نقطه تلاقی بین شهرستان‌های مختلف استان، نقش مهمی در تعاملات اجتماعی و اقتصادی ایفا می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهرستان قائمشهر.

تهیه داده‌ها

به دلیل افزایش میزان شهرنشینی و نیز ساخت و سازهای مختلف در شهرستان قائمشهر، جهت بررسی کیفیت محیط زیستی منطقه، از بازه ۱۵ ساله استفاده شد. تصاویر سنجنش از راه دور میانگین تابستانه سال ۲۰۰۹ از لندست ۵ (سنجنده TM) و سال‌های ۲۰۱۴، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۴ لندست ۸ (سنجنده OLI) که از نظر رادیومتری، جوی و هندسی تصحیح شده‌اند، از پلتفرم GEE (<https://earthengine.google.com/>) با وضوح مکانی ۳۰ متر، تهیه شدند.

مدل IRSEI

معادله IRSEI (Improved Remote Sensing Ecological Index) از پنج شاخص تشکیل شده است (رابطه ۱)، یعنی KNDVI (Normalized Difference Vegetation Index)، LSM (Land Surface Moisture) رطوبت، NDBSI (Normalized Difference Bare Soil Index) خشکی، LST (Land Surface Temperature) گرما و NDSI (Normalized Difference Salinity index) شوری که بر اساس چارچوب پاسخ فشار به حالت (Pressure State Response) که یکی از گسترده‌ترین معیارهاست از چارچوب‌های ارزیابی کیفیت محیط زیستی استفاده شده است. چارچوب PSR ریشه عمیق در مفهوم علیت و مفهوم شاخص‌های انتخاب شده در سه کلاس فشار انسانی (P)، وضعیت محیطی (S) و پاسخ‌های اقلیمی (R) دارد (جدول ۱) [9,10].

رابطه ۱: $IRSEI = 1 - PCA(KNDVI, LSM, LST, NDBSI, NDSI)$

که در آن PCA (Principal Component Analysis) به تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی اشاره دارد.

جدول ۱. شاخص‌های مورد استفاده و فرمول آن‌ها

شاخص	توضیحات	فرمول
KNDVI	kernel normalized difference vegetation index	$\tanh\left(\left(\frac{NIR-Red}{2\sigma}\right)\right)^2 [11]$
NDBSI	Normalized Differential Build-Up and Bare Soil Index	$SI = \frac{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})]}{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})]}$ $IBI = \frac{\{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{green}/(\rho_{green} + \rho_{SWIR1})]\}}{\{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green}/(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\}}$ $NDBSI = \frac{(IBI + SI)}{2} [12]$
LSM	Land Surface Moisture	$LSM_{TM} = 0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$ $LSM_{OLI} = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1972\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} [13]$
LST	Land Surface Temperature	$LST = \frac{T_{sensor}}{1 + (\lambda \times T_{sensor} / \rho) \ln \varepsilon}$ $\varepsilon = \begin{cases} 0.995 & NDVI \leq 0 \\ 0.970 & 0 < NDVI \leq 0.157 \\ 1.0094 + 0.047 \ln NDVI & 0.157 < NDVI \leq 0.72 \\ 0.986 & NDVI > 0.72 \end{cases}$ $T_{sensor} = \frac{K_2}{\ln(K_1/L_\lambda + 1)}$ $L_\lambda = Gain \times DN + Bias [14]$
NDSI	Normalized Difference Salinity index	$(Red - NIR) / (Red + NIR) [15]$

پس از محاسبه شاخص‌های مربوطه، تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) به منظور تعیین اهمیت نسبی متغیرها و تولید نقشه‌های RSEI در نرم‌افزار ArcGIS 10.7 به کار گرفته شد. PCA به عنوان یک تکنیک کلیدی برای کاهش ابعاد داده‌های چندگانه عمل می‌کند و می‌تواند به کاهش اثر هم‌خطی میان متغیرها کمک کند. این فرآیند به ارزیابی سریع و دقیق کیفیت اکولوژیکی مناطق کمک می‌کند. به دلیل تفاوت دامنه مقادیر در شاخص‌های مختلف، نرمال‌سازی تمامی شاخص‌ها پیش از اعمال PCA ضروری است تا مقادیر بین ۰ تا ۱ قرار گیرند. در نقشه IRSEI، هر چه مقدار پیکسل به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده وضعیت بهتری از نظر محیط زیستی است و مقادیر نزدیک‌تر به ۰ بیانگر وضعیت نامناسب‌تری هستند. همچنین، مقادیر IRSEI به پنج کلاس با فاصله‌های ۰/۲ تقسیم‌بندی می‌شوند که به ترتیب به عنوان بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب نامگذاری می‌شوند. این تقسیم‌بندی به ما این امکان را می‌دهد که کیفیت محیط زیستی منطقه را با جزئیات بیشتری بررسی قرار گیرد و نمایی واضح‌تر از وضعیت محیط زیست ارائه گردد.

همبستگی فضایی

به منظور بررسی همبستگی فضایی بین توزیع عناصر مختلف در منطقه، از خودهمبستگی فضایی محلی برای توصیف تراکم کلی در منطقه و از شاخص جهانی موران برای توصیف درجه همبستگی استفاده شده است. محاسبه آن به صورت رابطه ۲ است:

$$I_g = \frac{N \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \mu)(x_j - \mu)}{(\sum_i \sum_j w_{ij}) \sum_i (x_i - \mu)^2} \quad \text{رابطه ۲:}$$

که در آن x_i, x_j, μ, N به ترتیب وزن نرمال شده، مقدار IRSEI پیکسل i ، مقدار IRSEI پیکسل j ، میانگین RSEI منطقه مورد مطالعه، و تعداد کل پیکسل ها را نشان می دهد. شاخص موران برای جایگاه های کاملاً همبسته +۱، اما برای جایگاه های که همبستگی ندارد -۱ است [16]. از آنجایی که I_g نمی تواند نقاط گرم و سرد را تشخیص دهد، برای محاسبه این مقادیر از همبستگی فضایی محلی که مخفف شاخص تحلیل موقعیت مکانی (LISA) است طبق رابطه ۳ استفاده شد:

$$I_1 = \frac{x_i - \mu}{\sum_i (x_i - \mu)^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \mu) \quad \text{رابطه ۳:}$$

که خروجی ها شامل: خوشه بندی با ارزش بالا (HH)، خوشه بندی با ارزش پایین (LL)، خوشه بندی بالا و پایین (HL)، خوشه بندی کم و زیاد (LH) و بدون همبستگی (NN) بود.

۳. نتایج

مدل PCA

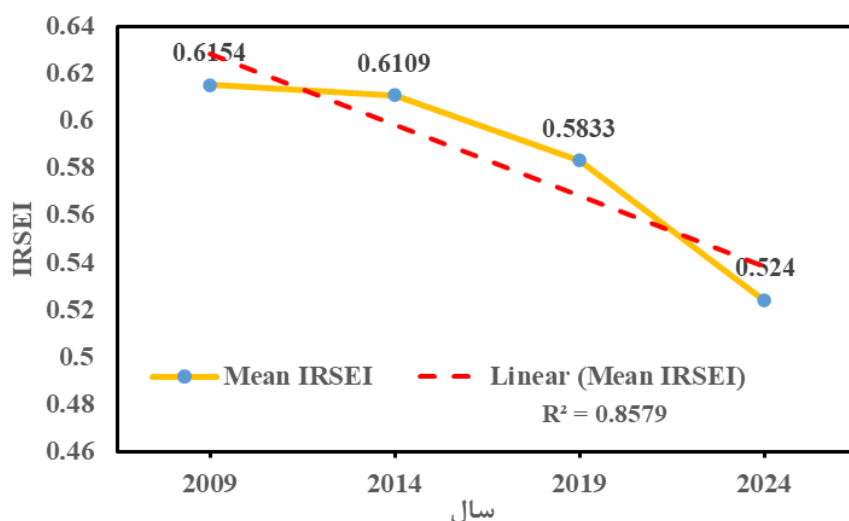
جدول ۲ میزان مشارکت اولین مؤلفه اصلی (PC1) تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) به پنج شاخص و بارگذاری هر شاخص طی ۴ دوره زمانی ۲۰۰۹، ۲۰۱۴، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۴ را نشان می دهد و مقدار ویژه PCA در تمامی سال ها بیش از ۷۰٪ بوده است. بنابراین، انتخاب PC1 به عنوان مؤلفه اصلی شاخص جامع اکولوژیکی منطقی و مؤثر است. طبق جدول ۱، شاخص های KNDVI و LSM دارای تاثیر مثبت و شاخص های LST، NDBSI و NDSI دارای تاثیر منفی بر روی شاخص IRSEI دارند. علائم اجزا با وضعیت واقعی مطابقت دارد و نشان می دهد که بارهای به دست آمده توسط PCA می توانند به درستی جهت تاثیر هر شاخص را بر کیفیت محیط زیستی منعکس کنند.

جدول ۲. وزن شاخص ها با استفاده از روش PCA و اولین مولفه PC1.

Covariance(%)	NDSI	NDBSI	LST	LSM	KNDVI	سال
۸۴/۶۴	-۰/۴۵۵۰	-۰/۴۶۶۳	-۰/۴۳۳۸	۰/۴۱۷۶	۰/۴۶۱۳	۲۰۰۹
۷۹/۱۴	-۰/۴۶۸۰	-۰/۴۸۵۹	-۰/۴۲۲۳	۰/۳۷۰۶	۰/۴۷۸۶	۲۰۱۴
۷۳/۳۷	-۰/۴۷۸۵	-۰/۵۰۰۵	-۰/۳۶۹۵	۰/۳۷۹۳	۰/۴۸۹۸	۲۰۱۹
۷۷/۷۱	-۰/۴۷۲۲	-۰/۴۸۵۲	-۰/۴۲۲۶	۰/۳۵۷۲	۰/۴۸۵۰	۲۰۲۴

تجزیه و تحلیل IRSEI

بررسی میانگین کیفیت محیط زیستی منطقه در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت محیط زیستی منطقه از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۲۴ روند کاهشی شدید داشته بطوری که از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۴ کیفیت محیط زیستی از ۰/۶۱۵۴ به ۰/۶۱۰۹ رسیده است که کاهش جزئی ۰/۶۱ درصدی را نشان می‌دهد. کیفیت محیط زیستی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ به ۰/۵۸۳۳ رسیده که کاهش ۴/۵۱ درصدی داشته و در سال ۲۰۲۴ کاهش ۱۰/۱۶ درصدی داشته است. همچنین این میزان در سال ۲۰۲۴ نسبت به سال ۲۰۰۹ کاهش ۱۴/۸۵ درصدی داشته که نشان از کاهش شدید کیفیت محیط زیستی می‌باشد.



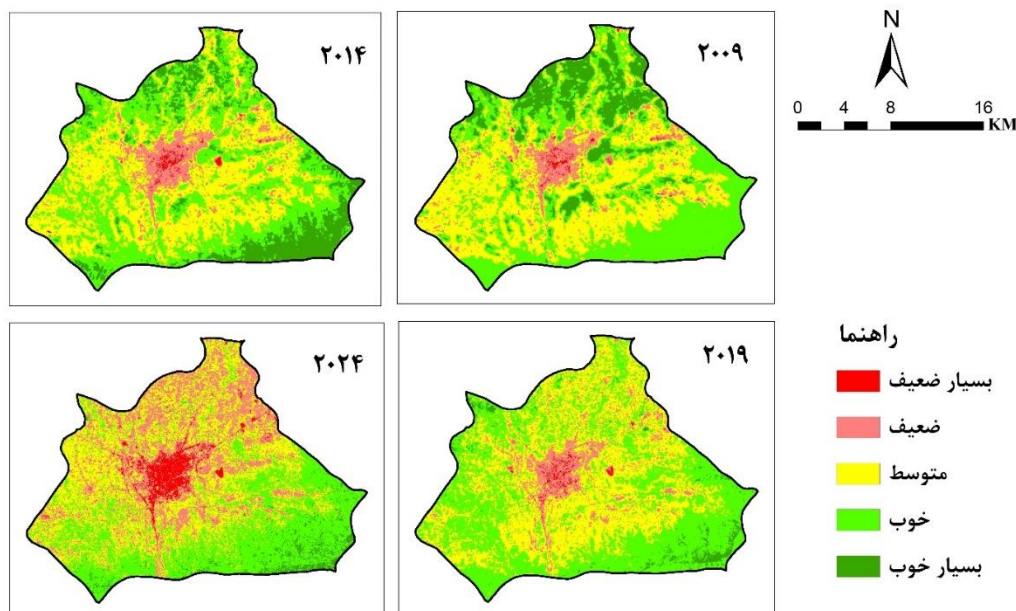
شکل ۲. میانگین شاخص کیفیت محیط زیستی شهرستان قائمشهر طی ۴ دوره زمانی.

پس از طبقه بندی نقشه‌های کیفیت محیط زیستی منطقه به ۴ طبقه بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب، مساحت طبقات مختلف در سال‌های مورد بررسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۴ مقدار مساحت‌های طبقات خیلی ضعیف، ضعیف و بسیار خوب به ترتیب افزایش جزئی ۰/۱۴، ۰/۷۷ و ۰/۱۵ درصد و طبقات متوسط و خوب کاهش جزئی ۰/۶۲ و ۰/۴۴ درصدی داشته‌اند. بررسی مساحت طبقات انتقال یافته از سال ۲۰۱۴ به سال ۲۰۱۹ نشان می‌دهد که بجز طبقه بسیار خوب، سایر طبقات افزایشی بوده که یکی از دلایل مهم کاهش کیفیت محیط زیستی در سال ۲۰۱۹، کاهش شدید طبقه بسیار خوب به میزان ۱۰/۸۵ درصد بوده است. تبدیل طبقات مختلف در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که طبقات خیلی ضعیف و ضعیف نسبت سال ۲۰۱۹ به ترتیب افزایش چشمگیر ۳/۰۳ و ۱۵/۰۸ درصد داشته است. همچنین طبقات متوسط و خوب نیز کاهش شدید ۷/۷۲ و ۱۱/۵۴ درصدی داشته است. درحالت کلی کیفیت محیط زیست منطقه از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۲۴ دچار افت شدید شده است (جدول ۳).

جدول ۳. مساحت (هکتار) و درصد (%) طبقات مختلف کیفیت محیط زیستی شهرستان قائمشهر.

۲۰۲۴		۲۰۱۹		۲۰۱۴		۲۰۰۹		سال
درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	طبقات کیفیت اکولوژیکی
۳/۶۷	۱۳۸۴/۰۲	۰/۶۴	۲۴۴/۷۱	۰/۶۳	۲۴۰/۵۷	۰/۴۹	۱۸۷/۸۳	خیلی ضعیف
۲۳/۷۳	۸۹۳۸/۹۸	۸/۶۵	۳۲۵۸/۶۳	۸/۱۳	۳۰۶۴/۰۵	۷/۳۶	۲۷۷۳/۰۸	ضعیف
۳۵/۷۵	۱۳۴۶۸/۰۵	۴۳/۴۷	۱۶۳۷۵/۳۲	۳۹/۳۵	۱۴۸۲۳/۶۳	۳۹/۹۷	۱۵۰۵۶/۱۹	متوسط
۳۳/۳۳	۱۲۵۵۵/۹۹	۴۴/۸۷	۱۶۹۰۱/۹۱	۳۸/۶۷	۱۴۵۶۶/۸۶	۳۹/۱۱	۱۴۷۳۳/۳۶	خوب
۳/۴۹	۱۳۱۷/۲۴	۲/۳۴	۸۸۳/۷۱	۱۳/۱۹	۴۹۶۹/۱۷	۱۳/۰۴	۴۹۱۳/۸۲	بسیار خوب

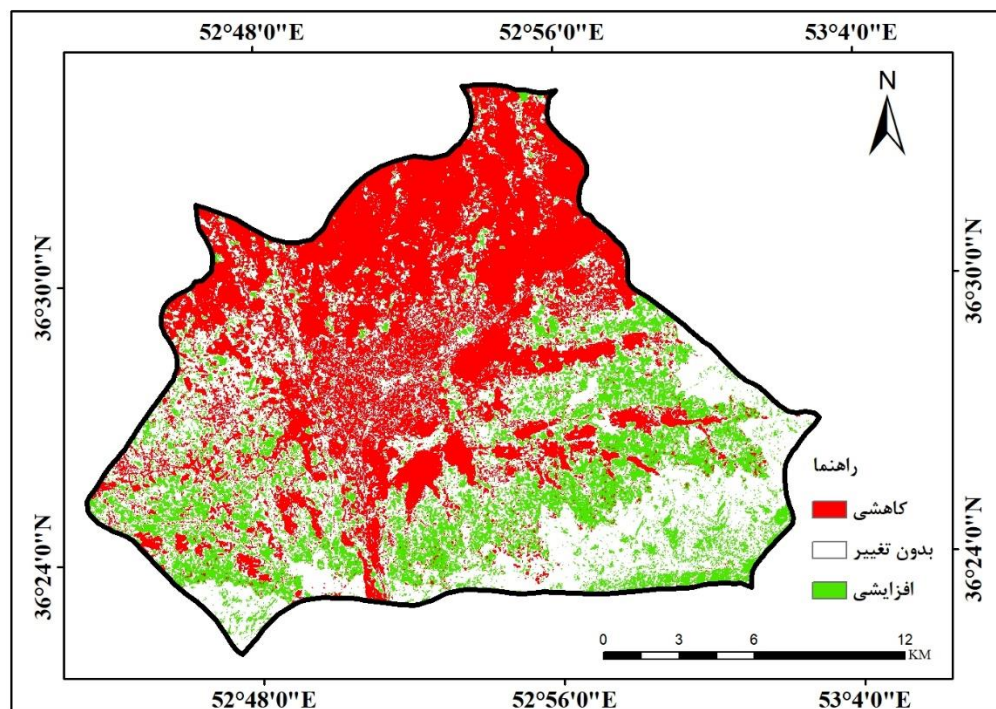
نمایش گرافیکی طبقات مختلف کیفیت محیط زیستی منطقه در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۳ مشخص است، طبقات بسیار خوب و خوب در شمال و جنوب شرق منطقه در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۴ گسترش فراوانی داشتند که در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ این طبقات به طبقات خوب و متوسط و ضعیف و بسیار ضعیف تبدیل شدند. همچنین در مرکز نقشه که شهر قائمشهر قرار دارد، با افزایش میزان ساخت و ساز و فشار انسانی بر منطقه، طبقه بسیار ضعیف دچار افزایش شدیدی شده است.



شکل ۳. نمایش گرافیکی طبقات مختلف کیفیت محیط زیستی شهرستان قائمشهر طی ۴ دوره زمانی.

به منظور بررسی شرایط بهتر کیفیت محیط زیستی منطقه، تبدیل طبقات از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). بررسی شرایط نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۴ نسبت به سال ۲۰۰۹، بخش‌های شمالی و مرکز شهرستان تغییرات زیادی از نظر کیفیت محیط زیستی شده است و بخش‌هایی از جنوب و جنوب شرق دارای شرایط بدوت تغییر و افزایش کیفیت محیط زیست شده است. همچنین مساحت انتقال یافته از سال ۲۰۰۹ به سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که

۱۵۵۸۴/۸۵ هکتار بدون تغییر باقی مانده است و مقدار ۶۸۳۹/۸۱ هکتار دارای افزایش کیفیت محیط زیست بوده و مقدار ۱۵۲۳۹/۶۱ دارای کاهش کیفیت محیط زیست شده است (جدول ۴).



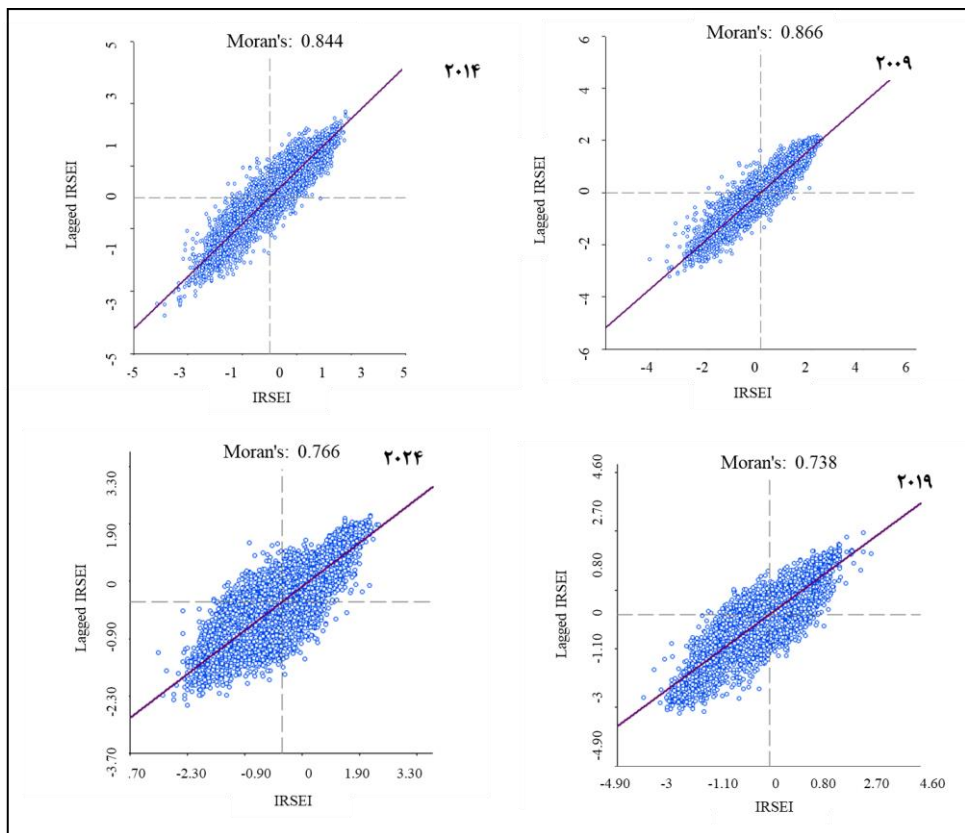
شکل ۴. نمایش گرافیکی تغییرات کیفیت محیط زیستی شهرستان قائمشهر طی سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۲۴.

جدول ۴. تغییرات تبدیل طبقات کیفیت محیط زیستی منطقه طی سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۲۴.

مساحت (هکتار)	طبقات تغییر
۱۵۵۸۴/۸۵	بدون تغییر
۱۵۲۳۹/۶۱	کاهشی
۶۸۳۹/۸۱	افزایشی

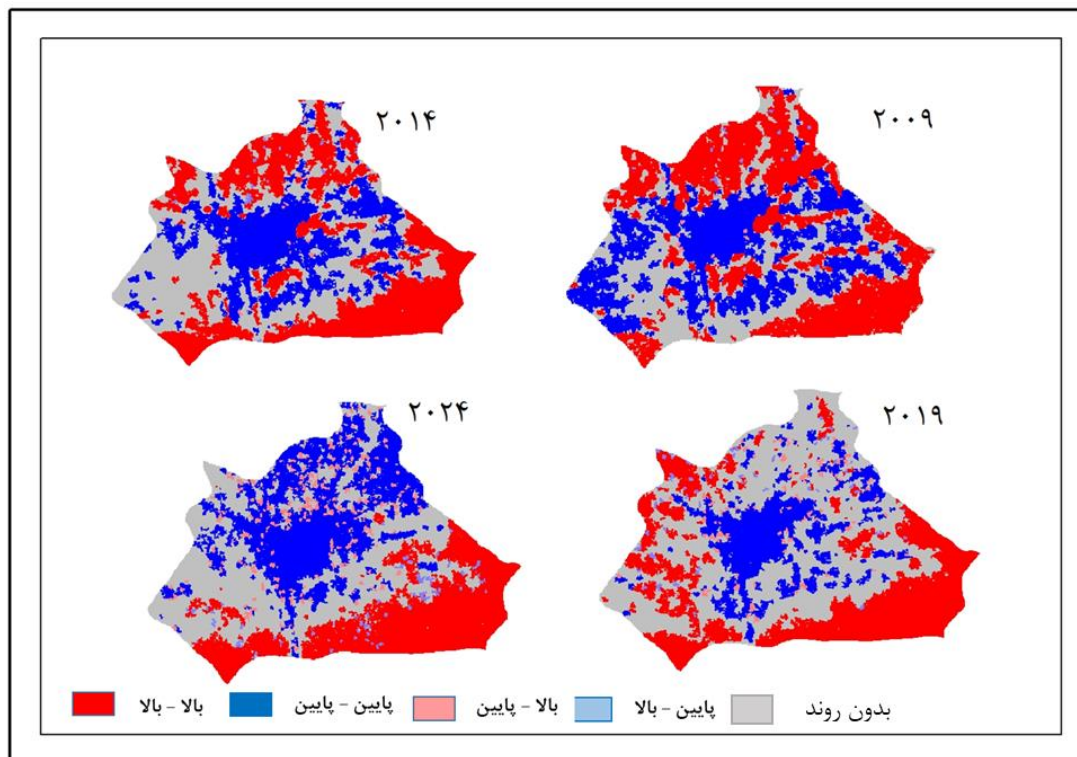
تجزیه و تحلیل همبستگی فضایی

نتایج شاخص جهانی Moran's I کیفیت محیط زیستی در شکل ۵ نشان داده، می‌توان مشاهده کرد که در طول دوره مورد مطالعه، شاخص های Moran's I جهانی در تمانی سال‌های مورد بررسی از ۰/۷۳ بودند. این نشان می‌دهد که بین سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۲۴ همبستگی فضایی مثبت و معنی‌داری بین کیفیت محیطی زیستی در شهرستان قائمشهر وجود دارد. در سال ۲۰۰۹، مقدار شاخص موران بالاترین (۰/۸۶) بود که نشان داد IRSEI از نظر فضایی بسیار خوشه‌بندی شده بود. در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۴، ارزش موران کاهش یافت که نشان می‌دهد IRSEI از نظر فضایی به میزان کمتری خوشه‌بندی می‌شود و تکه‌های اکولوژیکی به تدریج تکه تکه می‌شوند.



شکل ۵. نمایش گرافیکی شاخص جهانی موران در کیفیت محیط زیستی شهرستان قائم‌شهر طی سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۰۹.

بررسی خودهمبستگی فضایی محلی در شکل ۶ نشان می‌دهد که مناطق با خودهمبستگی بالا (بالا-بالا)، در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۰۹ در قسمت‌های شمالی و جنوبی بوده که این خودهمبستگی در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۴ تنها در قسمت‌های جنوب شرق و بخش‌های جزئی در غرب وجود دارد. همچنین تکه تکه شدگی کیفیت محیط‌زیستی در سال ۲۰۱۹ بیشتر از سال ۲۰۲۴ است. مناطق با خودهمبستگی پایین (پایین - پایین)، در تمامی سال‌ها در مرکز قرار داشته و در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۴ افزایش چشمگیر داشته و این افزایش در سال ۲۰۲۴ علاوه بر مرکز در بخش‌های شمالی منطقه نیز افزایش پیدا کرده است.



شکل ۶. نمایش گرافیکی تغییرات خود همبستگی محلی کیفیت محیط زیستی شهرستان قائمشهر طی سال - های ۲۰۰۹-۲۰۲۴.

۴. نتیجه گیری

به منظور بررسی شرایط مکانی-زمانی کیفیت محیط زیست شهرستان قائمشهر از شاخص IRSEI حاصل از ۵ شاخص KNDVI, LSM, LST, NDBSI و NDSI استفاده شد. نتایج نشان داد که کیفیت محیط زیست منطقه از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۲۴ کاهش شدید داشته و میانگین این شاخص از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۲۴ کاهش ۱۴/۸۵ درصدی داشته است. همچنین میزان طبقات خیلی ضعیف، ضعیف و متوسط افزایشی و طبقات خوب و بسیار خوب کاهشی بوده است. نتایج خودهمبستگی نشان می‌دهد که میزان شاخص موران کاهشی بوده و میزان طبقه بالا-بالا در سال ۲۰۲۴ کاهشی و طبقه پایین - پایین افزایشی بوده است. نتایج نشان می‌دهد که مناطق دارای با ارتفاع بیشتر و کاربری‌های جنگل و کوهستانی، دارای کیفیت محیط زیست بالایی بوده و مناطق با کاربری شهری و ساخت و سازهای انسانی و فشار انسان بر محیط زیست، دارای کیفیت محیط زیست بسیار پایینی است. بارگذاری اجزای اصلی PC1, KNDVI, نشان دهنده سبزی، و WET، که رطوبت را نشان می‌دهد، دارای مقادیر مثبت هستند، که نشان می‌دهد که آنها به کیفیت محیط زیست کمک می‌کنند، در حالی که بارگذاری های LST، نشان دهنده گرما، و NDBSI، نشان دهنده خشکی و NDSI، نشان دهنده شوری خاک، دارای مقادیر منفی هستند. همانطور که قبلاً به آن اشاره شد، مقدار ویژه PC1 در تمامی سال‌های مورد بررسی بیش از ۷۰٪ است بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که PC1 بیشترین تنوع را در بین هر پنج شاخص نشان می‌دهد. بنابراین، PC1 برای نمایش پنج متغیر شاخص مناسب تر PC2 و PC3 به نظر می‌رسد [17]. باتوجه به شرایط منطقه و کاهش کیفیت محیط زیست منطقه به ویژه در مناطق مرکزی، احداث پارک و کاشت درختان در بخش‌های مختلف و نیز حفظ

جنگل و جلوگیری از تخریب محیط زیست، می‌تواند منجر افزایش کیفیت محیط زیست منطقه گردد.

۵. مراجع

1. Zhao, G. Q., Chen, L. W., Mu, J., Li, T. X., Li, J. P., Ma, Y. M., ... & Wang, Y. (2018). Discussion on construction of ecological environment quality evaluation system. *Meteor. Environ. Sci*, 41, 1-11.
2. Cao, C., Yang, G. L., Suo, X. H., Liu, T., An, X. W., & Hu, D. (2022). Analysis of ecological environment change in Fuxin City based on remote sensing ecological index. *J. Northwest For. Univ*, 37, 200-207.
3. Xianglin, J. I., Yueguan, Y. A. N., Wei, G. U. O., Yongjia, T. E. N. G., & Chuanwu, Z. H. A. O. (2023). Ecological environment assessment of Shanxi Province and planned mining area based on coupling Remote Sensing Ecological Index (RSEI) model. *Coal Geology & Exploration*, 51(3), 103-112.
4. Karbalaee Saleh, S., Amoushahi, S., & Gholipour, M. (2021). Spatiotemporal ecological quality assessment of metropolitan cities: A case study of central Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 193(5), 305.
- ۵- رنجبر، سعیده و کامیاب، حمیدرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی ناهمگونی مکانی در کیفیت بوم‌شناختی با استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*, ۹(۴): ۱۶۱-۱۴۵.
6. Xu, H., Wang, Y., Guan, H., Shi, T., & Hu, X. (2019). Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*, 11(20), 2345.
7. Duo, L., Wang, J., Zhong, Y., Jiang, C., Chen, Y., & Guo, X. (2024). Ecological environment quality assessment of coal mining cities based on GEE platform: A case study of Shuozhou, China. *International Journal of Coal Science & Technology*, 11(1), 75.
8. Ge, J., Qian, C., Zhang, C., Zhang, L., Song, W., Na, F., ... & Jiang, S. (2024). IRSEI-based monitoring of ecological quality and analysis of drivers in the Daling River Basin. *Scientific Reports*, 14(1), 14506.
9. Guo, H., Zhang, B., Bai, Y., & He, X. (2017, November). Ecological environment assessment based on remote sensing in Zhengzhou. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 94, No. 1, p. 012190). IOP Publishing.
10. Yue, H., Liu, Y., Li, Y., & Lu, Y. (2019). Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index. *Ieee Access*, 7, 51295-51311
11. Camps-Valls, G., Campos-Taberner, M., Moreno-Martínez, Á., Walther, S., Duveiller, G., Cescatti, A., ... & Running, S. W. (2021). A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere. *Science Advances*, 7(9), eabc7447.
12. Essa, W., Verbeiren, B., van der Kwast, J., Van de Voorde, T., & Batelaan, O. (2012). Evaluation of the DisTrad thermal sharpening methodology for urban areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 163-172.
13. Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423-431.

14. Chatterjee, R. S., Singh, N., Thapa, S., Sharma, D., & Kumar, D. (2017). Retrieval of land surface temperature (LST) from landsat TM6 and TIRS data by single channel radiative transfer algorithm using satellite and ground-based inputs. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 58, 264-277.
15. Khan, N. M., Rastokuev, V. V., Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1-3), 96-109.
16. Anselin, L., Syabri, I., & Kho, Y. (2006). GeoDa: An introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*, 38(1), 5-22.
17. Xu, H., & Deng, W. (2022). Rationality analysis of MRSEI and its difference with RSEI. *Remote Sensing Technology and Application*, 37(1), 1-7.