



پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات پوشش زمین در استان قم با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست

صفا خزائی^{۱*}، علی مهتدی^۲

دوبافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

چکیده

مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پوشش زمین ابزار کلیدی برای برنامه‌ریزی پلیدار و مدیریت منابع طبیعی است. این پژوهش با هدف تحلیل و پیش‌بینی تغییرات پوشش زمین در استان قم، از تصاویر ماهواره‌ای لندست در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ استفاده کرد و تغییرات را تا سال ۲۰۲۷ پیش‌بینی نمود. برای این منظور، شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی نرمال‌شده ($NDVI$) و ساخت‌وساز نرمال‌شده ($NDBI$) برای شناسایی تغییرات گیاهی و شهری محاسبه شدند. همچنین، روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای تحلیل تصاویر استفاده شد. مدل ترکیبی زنجیره مارکوف و سلول خودکار برای مدل‌سازی روندهای گذشته (۲۰۱۵-۲۰۲۳) و پیش‌بینی آینده (۲۰۲۷) استفاده شد و دقت آن با شاخص کلپا (میانگین ۰/۸۶) ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که مساحت پوشش گیاهی بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹

از ۸۲۲ به ۸۰۰ کیلومترمربع (کاهش ۲/۷ درصد) کاهش یافت، اما با اقدامات مدیریتی و بهبود شرایط اقلیمی، در سال ۲۰۲۳ به ۸۲۵ کیلومترمربع بازگشت. مناطق شهری از ۳۷/۷ به ۵۱ کیلومترمربع (رشد ۳۵ درصد) افزایش یافت، درحالی‌که مناطق بیابانی از ۱۰۶۶۵ به ۱۰۶۵۰ کیلومترمربع (کاهش ۰/۱۴ درصد) به طور ناچیز کاهش یافت. پیش‌بینی‌ها با فرض ادامه روند نشان می‌دهد که مساحت مناطق شهری تا سال ۲۰۲۷ به ۵۶/۱ کیلومترمربع (افزایش ۵/۱ کیلومترمربع نسبت به ۲۰۲۳) خواهد رسید. این یافته‌ها با ارائه الگوهای دقیق تغییرات، امکان اجرای طرح‌های احیای مراتع، اعمال سیاست‌های محدودکننده برای توسعه شهری پایدار و بهینه‌سازی مدیریت منابع آبی را فراهم می‌کنند، که برای حفظ تعادل اکولوژیکی در اقلیم خشک قم حیاتی است.

چکیده مبسوط

در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت و توسعه اقتصادی منجر به افزایش تقاضا برای منابع طبیعی و تغییرات گسترده در پوشش زمین شده است. این تغییرات نه تنها بر اکوسیستم‌های طبیعی اثر گذاشته؛ بلکه تهدیدات جدی برای امنیت غذایی، مدیریت منابع آبی و پایداری زیست‌محیطی ایجاد کرده‌اند. استان قم به‌عنوان یکی از

صفا خزائی^۱ (✉)، علی مهتدی^۲

۱. دانشیار، مرکز تحقیقات مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲. دانش آموخته سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، موسسه آموزش عالی حکمت قم، قم، ایران

Doi: 10.82447/girs.2025.1198808

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: skhazai@ihu.ac.ir

گیاهی منطقه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ کاهش یافته و حدود ۲.۷ درصد از مساحت خود را از دست داده است، اما در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ بهبود پیدا کرده و به حدود ۸۲۵ کیلومتر مربع رسیده است. پیش‌بینی می‌شود که این روند تثبیت شود و تغییرات پوشش گیاهی تا سال ۲۰۲۷ در همین حدود باقی بماند، که نشان‌دهنده ثبات و مدیریت مؤثر منابع طبیعی است؛ این ثبات می‌تواند ناشی از اقدامات مدیریتی مانند برنامه‌های حفاظت از منابع طبیعی، افزایش آگاهی عمومی نسبت به اهمیت محیط‌زیست، و اجرای سیاست‌های کشاورزی پایدار باشد.

علاوه بر این، مناطق بیابانی و کوهستانی تغییرات جزئی داشته و عمدتاً در حدود ۱۰,۶۶۵ تا ۱۰,۶۸۵ کیلومتر مربع باقی مانده‌اند. پیش‌بینی می‌شود که این مناطق تا سال ۲۰۲۷ کاهش جزئی حدود ۲۰ کیلومتر مربع، معادل ۰.۱۹ درصد، داشته باشند. این کاهش عمدتاً به دلیل گسترش مناطق شهری و تغییر کاربری اراضی به نفع توسعه شهری رخ می‌دهد. این روند نشان می‌دهد که بخشی از مناطق بیابانی به مناطق شهری تبدیل خواهد شد که می‌تواند پیامدهایی برای اکوسیستم‌های محلی و پایداری محیط‌زیست به همراه داشته باشد. شایان ذکر است، تغییرات در مناطق بیابانی می‌تواند منجر به تغییرات در الگوهای اقلیمی محلی، افزایش دمای سطحی زمین و کاهش توانایی منطقه در حفظ رطوبت شود. این موضوع می‌تواند اثرات دومینویی بر روی اکوسیستم‌های اطراف داشته باشد، مانند تغییر در زیستگاه‌های حیات وحش، کاهش کیفیت خاک و افزایش خطر فرسایش.

این پژوهش نشان داد که تغییرات پوشش زمین در استان قم علاوه بر تأثیر بر محیط‌زیست و کیفیت زندگی، پیامدهای عمیقی بر تنوع زیستی، چرخه‌های آب و خاک و کیفیت هوا دارند. افزایش چشمگیر مناطق شهری، معادل ۴۸.۸ درصد از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۷، و ثبات نسبی پوشش گیاهی از نتایج کلیدی این مطالعه است که بر ضرورت اقدامات مدیریتی مؤثر و سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه در راستای توسعه پایدار تأکید می‌کند.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی، پیش‌بینی، تغییرات پوشش زمین، زنجیره مارکوف

مناطق حساس از نظر تنوع زیستی و منابع طبیعی، نمونه‌ای مناسب برای مطالعه تغییرات پوشش زمین به شمار می‌رود.

مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پوشش زمین برای برنامه‌ریزی استفاده پایدار از زمین امری ضروری به شمار می‌رود. امروزه ترکیب مدل زنجیره مارکوف و اتوماتای سلولی (CA) به عنوان ابزاری قوی در مدل‌سازی تغییرات فضایی و زمانی، به ویژه در مطالعات سنجش از دور، به کار می‌رود. این روش، با استفاده از مدل‌های احتمالاتی، تغییرات در وضعیت‌های مختلف را بر اساس احتمالات انتقال بین این وضعیت‌ها مدل‌سازی می‌کند و به عنوان ابزاری کلیدی کاربردهای مختلفی در تحلیل تغییرات پوشش زمین مطرح می‌شود.

هدف این پژوهش، مدل‌سازی تغییرات پوشش زمین در استان قم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ و پیش‌بینی تغییرات تا سال ۲۰۲۷ می‌باشد. برای این منظور، از شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) و ساخت‌وساز نرمال‌شده (NDBI) و روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شده است. همچنین، با بهره‌گیری از ترکیب مدل زنجیره مارکوف و اتوماتای سلولی، روند تاریخی تغییرات پوشش زمین از ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ مدل‌سازی و برای سال ۲۰۲۷ پیش‌بینی تغییرات صورت گرفت. در این راستا، از نرم‌افزار ENVI برای استخراج شاخص‌های طیفی و طبقه بندی تصاویر ماهواره‌ای و همچنین از نرم‌افزار EDRISI Selva جهت اجرای الگوریتم زنجیره مارکوف و اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی تغییرات پوشش زمین استفاده شده است.

نتایج این تحقیق نشان داد که رشد شهری به عنوان یک روند غالب، تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند افزایش جمعیت، گسترش زیرساخت‌ها، مهاجرت، تغییر کاربری زمین و سیاست‌های مدیریتی قرار دارد. مساحت مناطق شهری بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ حدود ۱۳.۲۳ کیلومتر مربع معادل ۳۵ درصد افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود این روند تا سال ۲۰۲۷ ادامه یابد و به ۵۶.۱ کیلومتر مربع برسد که نسبت به سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده افزایش ۱۰ درصدی دیگر است؛ این میزان بیانگر روند مداوم گسترش شهری می‌باشد و نشان‌دهنده فشار فزاینده بر منابع طبیعی و ضرورت مدیریت هوشمندانه کاربری زمین است. همچنین نتایج نشان داد که، پوشش

مقدمه

اطلاعات جغرافیایی، افزایش مناطق مسکونی در استان قم را از ۱۳۰ به ۳۶۴ کیلومترمربع طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ گزارش کردند. ابراهیمی‌وند و همکاران (۵) با بهره‌گیری از تکنیک‌های سنجش‌ازدور، رشد ۶۱ درصدی محصولات باغی و ۳۴ درصدی محصولات زراعی را بین سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۸ نشان دادند. همچنین، روحانی و همکاران (۱۹) کاهش ۵۰ درصدی مراتع و افزایش مناطق شهری و کشاورزی را در بازه ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ گزارش کردند و بر لزوم استفاده از داده‌های دقیق‌تر تأکید داشتند.

این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین از چند جهت متمایز است: نخست، استفاده از تصاویر به‌روز لندست (۲۰۱۵-۲۰۲۳) با توان تفکیک بالا؛ دوم، بهره‌گیری از مدل ترکیبی زنجیره مارکوف و سلول خودکار؛ و سوم، ارائه پیش‌بینی‌های دقیق تا سال ۲۰۲۷ برای حمایت از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی. ضرورت این مطالعه در ارائه راهکارهای عملی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی در اقلیم خشک و شکننده قم نهفته است، جایی که محدودیت منابع آبی، گسترش بی‌رویه شهری و فشار بر اکوسیستم‌ها چالش‌های اصلی هستند.

روش‌شناسی

الف) منطقه مورد مطالعه

استان قم با وسعت ۱۱۲۳۸ کیلومتر مربع در کریدور مرکزی ایران بین مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۸ دقیقه طول جغرافیایی شرقی و ۳۴ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۱ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی واقع شده و از شمال به جلگه ورامین و شهری و از شرق به دریاچه نمک متصل است. بر اساس نمایه بارش استاندارد (SPI^1)، استان قم در شرایط خشکسالی شدید قرار دارد (۱۸). این ویژگی‌ها، همراه با نزدیکی به مراکز شهری، محدودیت منابع آبی و فشار توسعه زیرساخت‌ها، قم را به منطقه‌ای کلیدی برای مطالعه تغییرات

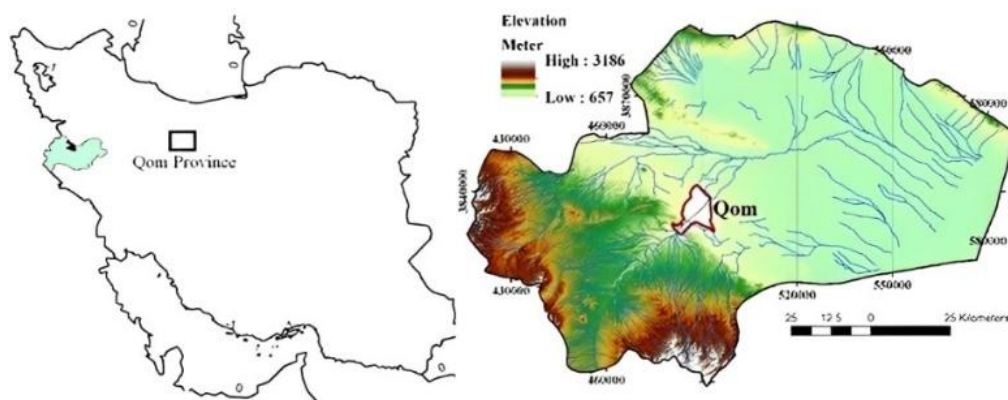
تغییرات پوشش زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر اکوسیستم‌ها و تعادل زیست‌محیطی، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این تغییرات به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند شهرسازی، کشاورزی، تخریب جنگل‌ها و استخراج منابع طبیعی، و تغییرات ناشی از عوامل طبیعی مانند زلزله، سیل و تغییرات اقلیمی (۷). در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت و توسعه اقتصادی تقاضا برای منابع طبیعی را به‌طور چشمگیری افزایش داده و منجر به تغییرات گسترده در کاربری اراضی شده است. این تغییرات نه تنها اکوسیستم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار داده‌اند، بلکه تهدیدات جدی برای امنیت غذایی، مدیریت منابع آبی و پایداری زیست‌محیطی ایجاد کرده‌اند (۱۰). تحلیل دقیق این تغییرات نیازمند ابزارهای پیشرفته‌ای است که بتوانند الگوهای فضایی و زمانی را با دقت بالا مدل‌سازی کنند.

فناوری‌های سنجش‌ازدور، به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای لندست، به همراه مدل‌های ریاضی و یادگیری ماشین، امکان تحلیل دقیق تغییرات پوشش زمین را فراهم کرده‌اند (۲۳). در این میان، ترکیب مدل زنجیره مارکوف و سلول خودکار به دلیل توانایی در شبیه‌سازی دینامیک‌های پیچیده فضایی-زمانی، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در مطالعات کاربری زمین و برنامه‌ریزی شهری شناخته شده است (۱۲). این مدل‌ها با استفاده از احتمالات انتقال و قوانین محلی، تغییرات پوشش زمین را با دقت بالا پیش‌بینی می‌کنند و در مدیریت منابع طبیعی، مانند حفاظت از جنگل‌ها و منابع آبی، کاربرد دارند (۱۶، ۲۳).

در سطح جهانی، تحقیقات گسترده‌ای با استفاده از زنجیره مارکوف و سلول خودکار برای مدل‌سازی تغییرات پوشش زمین انجام شده است (۱، ۴، ۸، ۱۱، ۲۱، ۲۲). در ایران نیز مطالعات متعددی در این حوزه صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، اسماعیلی و اشجعی (۶) با استفاده از زنجیره مارکوف و سیستم

¹ Standardized Precipitation Index

پوشش زمین به‌ویژه در زمینه کاهش پوشش گیاهی و گسترش بیابانی، تبدیل کرده‌اند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه: استان قم.

Fig 3. Location of the study area: Qom Province

انتخاب شدند (۹). تصاویر سنجنده OLI^۲ ماهواره لندست ۸ و ۹ با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و ۸ باند طیفی (جدول ۱) داده‌های مناسبی برای تحلیل ارائه دادند. از آنجاکه استان قم تحت پوشش دو مسیر ماهواره‌ای لندست قرار دارد، تصاویر دو مسیر مجزا تهیه و با فرایند موزاییک ترکیب شدند تا داده‌ها یکپارچه و بدون افت کیفیت باشند (شکل ۲).

ب) تصاویر ماهواره‌ای و پیش‌پردازش

برای تحلیل تغییرات پوشش زمین، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در تاریخ‌های ۷ اوت ۲۰۱۵ و ۱۱ اوت ۲۰۱۹ و لندست ۹ در تاریخ ۶ اوت ۲۰۲۳ انتخاب شدند. این تاریخ‌ها به دلیل کیفیت بالا، نبود پوشش ابری و امکان بررسی روندهای بلندمدت

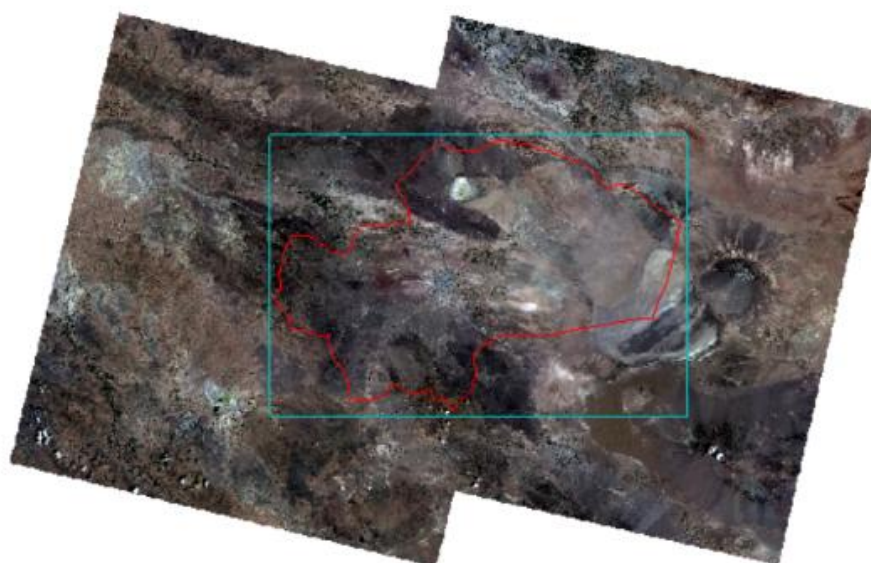
جدول ۱. باندهای طیفی سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ و ۹.

Table 1. Spectral bands of the Landsat8/9 OLI sensor

شماره باند	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۹
طول موج (میکرومتر)	۰/۴۳-۰/۴۵	۰/۴۵-۰/۵۱	۰/۵۳-۰/۵۹	۰/۶۴-۰/۶۷	۰/۸۵-۰/۸۸	۱/۵۷-۱/۶۵	۲/۱۱-۲/۲۹	۱/۳۶-۱/۳۸
توصیف باند	آب و سواحل	آبی	سبز	قرمز	فروسرخ نزدیک	فروسرخ موج کوتاه ۱	فروسرخ موج کوتاه ۲	سیروس ^۳

³ Cirrus

² Operational Land Imager



شکل ۲. موازیک تصاویر ماهواره لندست استان قم.

Fig 4. Mosaic of Landsat satellite images of Qom Province

و در نظر گرفتن اثر گازها در محاسبات انتقال تابش، شبیه سازی کند.

- تطبیق هیستوگرام: برای یکسان سازی روشنایی تصاویر در بازه های زمانی مختلف استفاده شد.
- اصلاحات اضافی: تصاویر با پوشش ابری جزئی یا اعوجاج زاویه دید با روش های چندزمانه اصلاح شدند.

پ) شاخص های طیفی

شاخص های طیفی $^{5}NDVI$ و $^{6}NDBI$ به عنوان ابزارهای اصلی برای تحلیل پوشش گیاهی و مناطق شهری انتخاب شدند. $NDVI$ (رابطه ۱) با استفاده از بازتاب طیفی باندهای قرمز (Red) و فروسرخ نزدیک (^{7}NIR) برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی محاسبه شد (۲۶). مقادیر مثبت $NDVI$ نشان دهنده پوشش گیاهی سالم و مقادیر نزدیک به صفر یا منفی

پیش پردازش تصاویر برای کاهش اثرات جوی و هندسی ضروری بود و شامل مراحل زیر بود (۹، ۲۴):

- زمین مرجع سازی: تصاویر با استفاده از نقاط کنترل زمینی (^{4}GCP) استخراج شده از نقشه های مرجع و داده های GPS به مختصات جغرافیایی صحیح تبدیل شدند.
- تصحیح رادیومتریک: برای حذف اثرات زاویه تابش خورشید و تغییرات حسگر، شدت تابش تصاویر تنظیم شد.
- تصحیح اتمسفری: مدل $6S$ برای حذف اثرات جذب و پراکندگی نور توسط جو به کار رفت. این مدل قادر است مشاهدات سطحی را با توجه به ارتفاع هدف، در نظر گرفتن محاسبات شرایط مرزی سطوح غیرلامبرتی

⁴ Ground Control Points

⁵ Normalized Difference Vegetation Index

⁶ Normalized Difference Built-up Index

⁷ Near Infrared

نشان‌دهنده مناطق بدون پوشش گیاهی هستند. NDBI (رابطه ۲) با استفاده از بازتاب طیفی باندهای فرسرخ موج‌کوتاه (SWIR^۸) و فرسرخ نزدیک (NIR) برای شناسایی مناطق ساخته‌شده و توسعه‌یافته محاسبه شد (۲۵). مقادیر بالای NDBI به مناطق شهری و مقادیر پایین به مناطق طبیعی اشاره دارند.

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad [1]$$

$$NDBI = \frac{SWIR-Red}{SWIR+Red} \quad [2]$$

نقشه‌های NDVI و NDBI در نرم‌افزار ArcGIS Pro تولید و سپس ترکیب شدند تا ارتباط بین تغییرات پوشش گیاهی و توسعه شهری تحلیل شود. این نقشه‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست فراهم کردند.

ت) طبقه‌بندی تصاویر

برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و شناسایی کلاس‌های پوشش زمین (مناطق شهری، پوشش گیاهی، بیابانی)، روش ماشین بردار پشتیبان (SVM^۹) با هسته شعاعی (RBF^{۱۰}) در نرم‌افزار ENVI به کار رفت (۳). این روش به دلیل توانایی بالا در جداسازی مرزهای غیرخطی بین کلاس‌ها و دقت برتر نسبت به

روش‌های سنتی مانند حداکثر احتمال انتخاب شد (۱۴، ۱۵). داده‌های آموزشی از منابع متعدد شامل نقشه‌های مرجع، تصاویر هوایی و مشاهدات میدانی جمع‌آوری شدند (جدول ۲). این داده‌ها به صورت نواحی مشخص (ROI^{۱۱}) برچسب‌گذاری شدند تا کلاس‌های مختلف با دقت بالا شناسایی شوند.

شایان ذکر است که در طبقه‌بندی تصاویر، واسنجی^{۱۲} به فرآیندی گفته می‌شود که در آن پارامترهای مدل طبقه‌بندی (مانند RBF) تنظیم می‌شوند تا با داده‌های مرجع مطابقت داشته باشند. اعتبارسنجی^{۱۳} نیز فرایندی است که به ارزیابی نهایی دقت مدل با استفاده از داده‌های مستقل از داده‌های واسنجی می‌پردازد. یکی از شاخص‌های متداول برای اعتبارسنجی یا ارزیابی دقت طبقه‌بندی، ضریب کاپا است که تأثیر احتمالات تصادفی را حذف می‌کند. در این تحقیق، اعتبارسنجی SVM برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر لندست در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۳ با ضریب کاپا انجام شد. ضریب کاپا، برای سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۳ به ترتیب مقادیر ۰/۸۷، ۰/۸۴ و ۰/۸۹ را نشان داد، که حاکی از دقت بالای مدل است (جدول ۳). این نتایج تأیید می‌کنند که SVM برای تحلیل تصاویر چندطیفی در مناطق خشک مانند قم کارآمد است (۱۵).

جدول ۲. انواع داده آموزشی.

Table 2. Types of training data

منبع داده	نوع داده	توضیحات
نقشه‌های مرجع	نقشه پوشش زمین	شامل مناطق شهری، اراضی کشاورزی، مراتع و بیابان‌ها
تصاویر هوایی	تصاویر هوایی منطقه قم	برای شناسایی نواحی پیچیده‌تر و تغییرات فصلی
داده‌های میدانی	مشاهدات میدانی	برای شناسایی نواحی با تغییرات فصلی یا ترکیبی
داده‌های ماهواره‌ای	تصاویر لندست	انتخاب نواحی مشخص برای آموزش الگوریتم‌ها

¹¹ Region Of Interest

¹² Calibration

¹³ Validation

⁸ Short-Wave Infrared

⁹ Support Vector Mechines

¹⁰ Radial Basis Function kernel

جدول ۳. میزان دقت بر اساس مقدار ضریب کاپا.

Table 3. Accuracy based on Kappa value

سال	ضریب کاپا
۲۰۱۵	۰/۸۵
۲۰۱۹	۰/۸۴
۲۰۲۳	۰/۸۹

ث) مدل سازی و پیش بینی

برای اعتبار سنجی، نقشه پیش بینی شده برای سال ۲۰۲۳ با داده های واقعی مقایسه شد و ضریب کاپا ۰/۸۵ به دست آمد، که نشان دهنده دقت بالای مدل است. این مدل برای پیش بینی تغییرات تا سال ۲۰۲۷ استفاده شد، با فرض ادامه روندهای کنونی و سیاست های مدیریتی مشابه.

ج) فلوچارت روش شناسی

شکل ۳ فلوچارت روش شناسی را ارائه می دهد. این فلوچارت به عنوان ابزاری بصری، جریان منطقی و یکپارچه مراحل تحقیق، از جمع آوری تصاویر لندست تا تولید نقشه پیش بینی کاربری زمین در استان قم برای سال ۲۰۲۷ را فراهم می کند

یافته های تحقیق

تحلیل نقشه های حاصل از شاخص های NDVI و NDBI و نتایج طبقه بندی تصاویر (شکل های ۴-۶ و جدول ۴)، الگوهای تغییرات پوشش زمین در استان قم طی سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ را مشخص کرد. مساحت پوشش گیاهی بین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ از ۸۲۲ به ۸۰۰ کیلومتر مربع (کاهش ۲/۷ درصد) کاهش یافت؛ که عمدتاً به خشک سالی های پیایی، کاهش منابع آبی، و فشار فعالیت های انسانی مانند کشاورزی ناپایدار و چرای بیش از حد در مناطق مرکزی و خشک تر نسبت داده می شود. این یافته با مطالعه روحانی و همکاران (۱۹) همخوانی دارد؛ ایشان کاهش ۵۰ درصدی مراتع قم را طی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ گزارش

برای مدل سازی و پیش بینی تغییرات پوشش زمین، مدل ترکیبی زنجیره مارکوف و سلول خودکار در نرم افزار EDRISI Selva اجرا شد (۱۲). زنجیره مارکوف با استفاده از ماتریس احتمال انتقال، تغییرات بین کلاس های پوشش زمین (شهری، گیاهی، بیابانی) را بر اساس داده های تاریخی ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ محاسبه کرد (۲۰). معادله زنجیره مارکوف به صورت رابطه زیر است (۱۲):

$$P(t+1) = P(t) \cdot T \quad [3]$$

در رابطه ۳، $P(t)$ توزیع کاربری زمین در زمان $(t, P(t+1))$ توزیع در زمان بعدی و T ماتریس احتمال انتقال است.

سلول خودکار با اعمال قوانین محلی (مانند تأثیر همسایگی و محدودیت های محیطی مثل شیب و ارتفاع) تغییرات فضایی را شبیه سازی کرد (۱۶). ماتریس احتمال انتقال از مقایسه نقشه های طبقه بندی شده ۲۰۱۵ و ۲۰۲۳ استخراج شد. قوانین محلی شامل موارد زیر بودند:

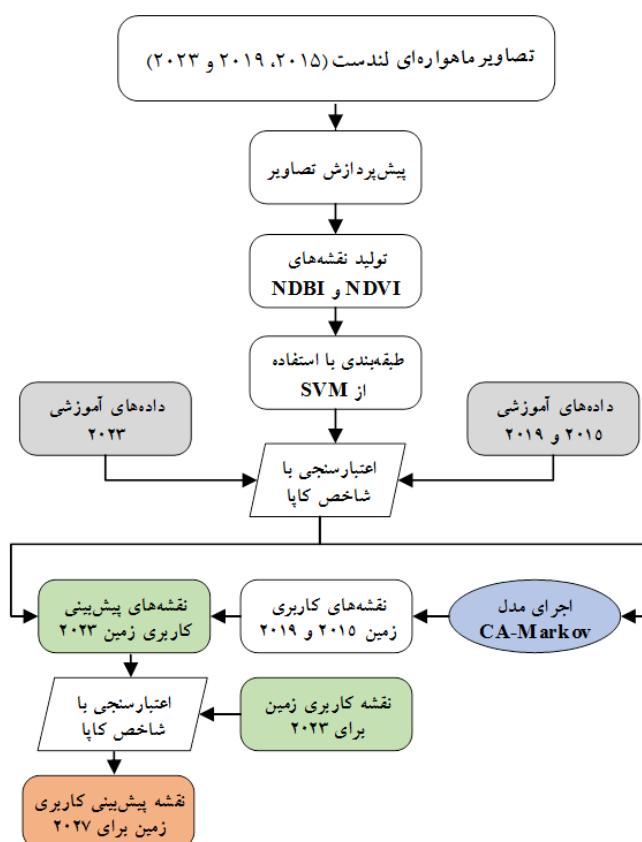
- همسایگی: تأثیر کلاس های مجاور بر تغییر هر سلول (مثلاً تبدیل سلول بیابانی به شهری در صورت تسلط سلول های شهری در اطراف).
- شرایط محیطی: محدودیت های طبیعی مانند شیب زمین که بر کاربری زمین تأثیر دارند.

نسبت داده می‌شود. مقایسه با مطالعه ابراهیمی‌وند و همکاران (۵) که رشد زیرساخت‌های شهری را در قم گزارش کردند، نشان می‌دهد این روند از دهه‌های گذشته ادامه دارد؛ اما شدت آن در بازه ۲۰۱۵-۲۰۲۳ به دلیل پروژه‌های صنعتی جدید بیشتر بوده است.

مساحت مناطق بیابانی از ۱۰۶۶۵ به ۱۰۶۵۰ کیلومتر مربع (کاهش ۰/۱۴ درصد) طی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ به طور ناچیز کاهش یافت که ممکن است نشان‌دهنده تبدیل تدریجی اراضی بیابانی به کاربری شهری در حاشیه شهرها باشد. این روند، مشابه یافته‌های مطالعه شلبی و تاتیشی (۲۱) در مناطق خشک مصر، می‌تواند به کاهش تنوع زیستی و افزایش دمای سطحی منجر شود، که در اقلیم شکننده قم پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی دارد.

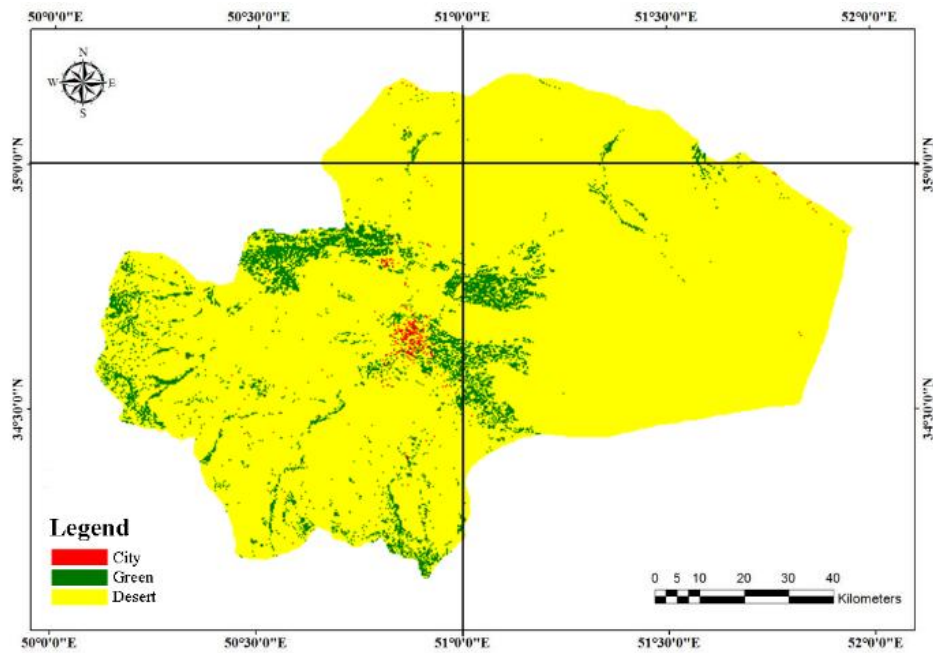
کردند و آن را به فشارهای اقلیمی و انسانی مرتبط دانستند. از ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، با بهبود بارندگی‌های فصلی و اجرای اقدامات مدیریتی نظیر آبیاری قطره‌ای و برنامه‌های حفاظت از مراتع، پوشش گیاهی به ۸۲۵ کیلومترمربع بازگشت، به‌ویژه در مناطق جنوبی با منابع آبی پایدارتر. این بهبود نسبت به مطالعه اسماعیلی و اشجعی (۶) که کاهش مداوم پوشش گیاهی را گزارش کردند، نشان‌دهنده تأثیر مثبت مداخلات اخیر است.

مناطق شهری از ۳۷.۷ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۵ به ۵۱ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۳ (رشد ۳۵ درصد) افزایش یافتند، که عمدتاً در حاشیه شهر قم و شهرک‌های صنعتی رخ داد. این گسترش که با افزایش سطوح غیرقابل نفوذ (بتن و آسفالت) در نقشه‌های NDBI مشهود بود، به رشد جمعیت، توسعه زیرساخت‌ها (جاده‌ها و کارخانه‌ها) و سیاست‌های توسعه شهری

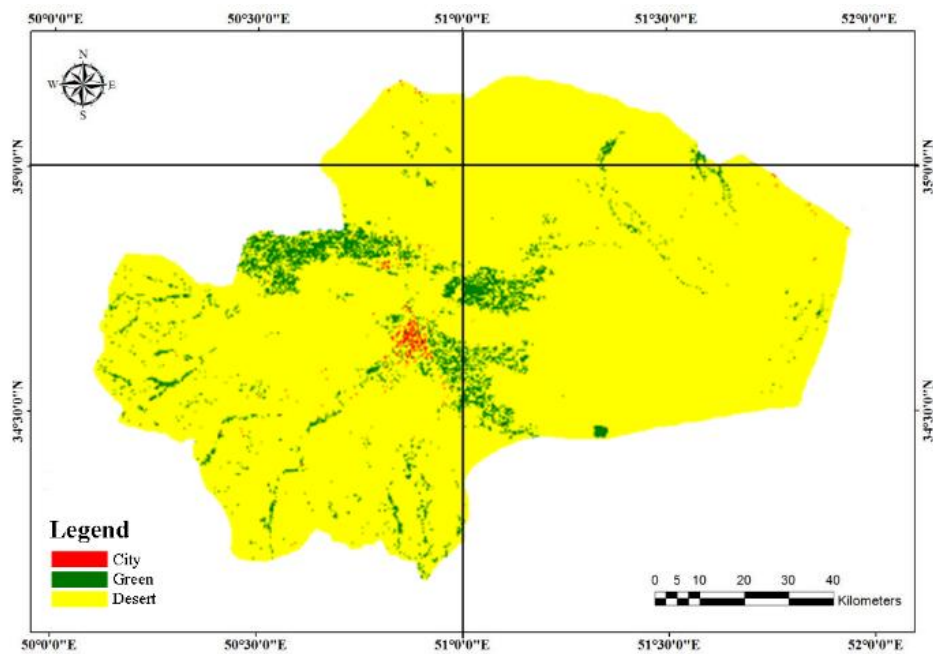


شکل ۳. فلوچارت روش تحقیق.

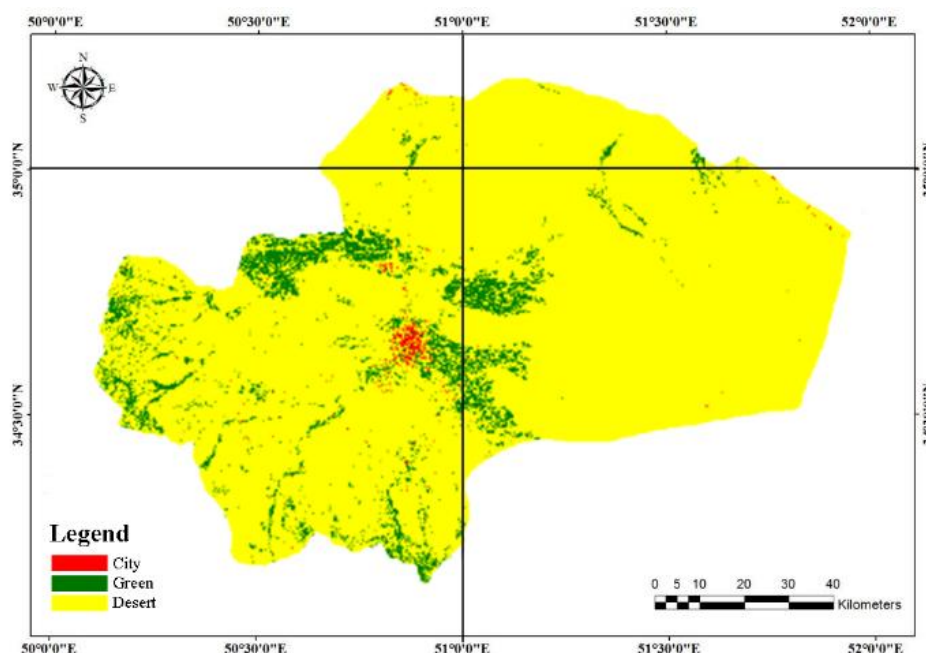
Fig 4. Methodology flowchart



شکل ۴. نقشه طبقه‌بندی سال ۲۰۱۵
Fig 5. Classification map for 2015



شکل ۵. نقشه طبقه‌بندی سال ۲۰۱۹
Fig 6. Classification map for 2019



شکل ۶. نقشه طبقه‌بندی سال ۲۰۲۳

Fig 7. Classification map for 2023

جدول ۴. مساحت مناطق مختلف در سال‌های مختلف (کیلومترمربع).

Table 4. Area of different regions over the years (km²)

پوشش	سال	۲۰۱۵	۲۰۱۹	۲۰۲۳
بیابانی و کوهستانی		۱۰۶۶۵	۱۰۶۸۵	۱۰۶۵۰
پوشش گیاهی		۸۲۲	۸۰۰	۸۲۵
پوشش شهری		۳۷.۷	۴۵.۲	۵۱.۰

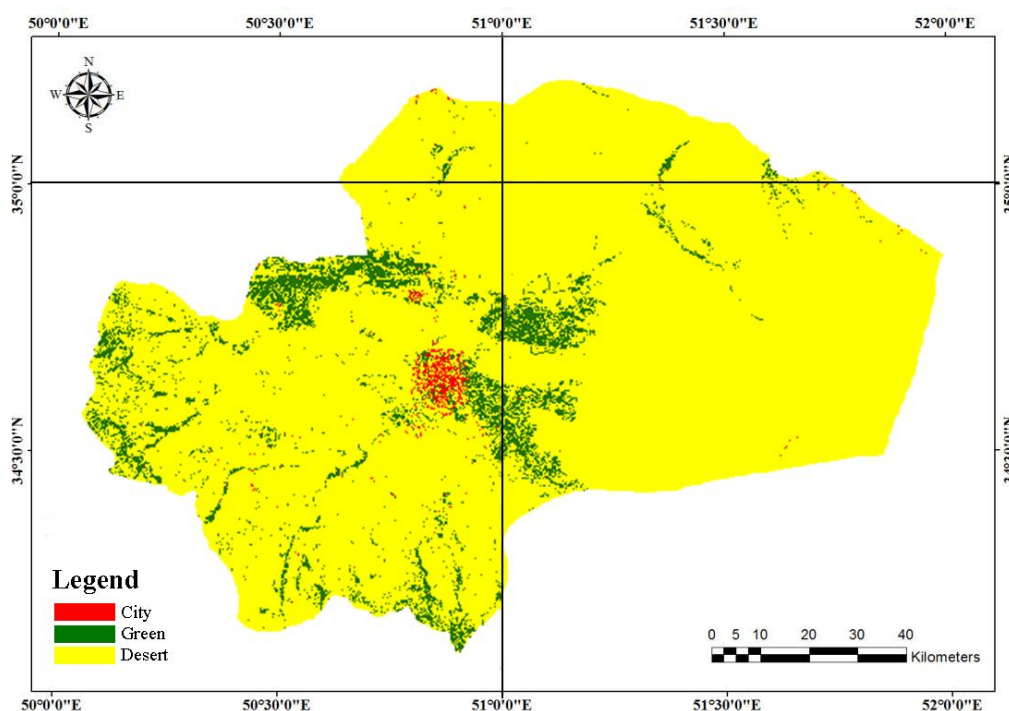
مناطق بیابانی با کاهش جزئی ۰/۰۵ درصد به ۱۰۶۴۵ کیلومترمربع خواهند رسید، که همچنان فشار توسعه شهری را بر اراضی طبیعی منعکس می‌کند. این پیش‌بینی‌ها با مطالعه دواناتام و سوبرایان (۴) در مناطق خشک هند همخوانی دارد، که افزایش مناطق شهری و ثبات نسبی پوشش گیاهی را تحت مدیریت مؤثر گزارش کردند. این نتایج بر ضرورت سیاست‌های محدودکننده برای کنترل توسعه و تقویت اقدامات حفاظتی تأکید دارند.

پیش‌بینی‌های مدل ترکیبی زنجیره مارکوف و سلول خودکار برای سال ۲۰۲۷ (جدول ۵ و شکل ۷) با فرض تداوم روندهای کنونی نشان می‌دهد که مساحت مناطق شهری با افزایش ۵/۱ کیلومترمربع نسبت به ۲۰۲۳، به ۵۶/۱ کیلومترمربع خواهد رسید، که عمدتاً ناشی از تبدیل اراضی بیابانی به کاربری شهری در حاشیه شهرها و مناطق صنعتی است. پوشش گیاهی، با فرض تداوم اقدامات مدیریتی مانند آبیاری کارآمد و حفاظت از مراتع، در حدود ۸۲۵/۲ کیلومترمربع پایدار خواهد ماند.

جدول ۵. پیش‌بینی مساحت کلاس‌ها (کیلومترمربع).

Table 5. Area prediction km²()

سال	مناطق بیابانی	پوشش گیاهی	مناطق شهری
۲۰۲۳	۱۰۶۵۰	۸۲۵/۰	۵۱/۰
۲۰۲۵	۱۰۶۴۷	۸۲۵/۱	۵۴/۰
۲۰۲۷	۱۰۶۴۵	۸۲۵/۲	۵۶/۱



شکل ۷. نقشه پیش‌بینی‌شده برای سال ۲۰۲۷.

Fig 12. Predicted map for the year 2027

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پوشش زمین در استان قم طی بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ و پیش‌بینی تا ۲۰۲۷ انجام شد. استفاده از شاخص‌های NDVI و NDBI و روش SVM امکان تحلیل دقیق تغییرات گیاهی و شهری را فراهم کرد. مدل ترکیبی زنجیره مارکوف (محاسبه احتمالات انتقال) و سلول خودکار (شبیه‌سازی الگوهای فضایی) با دقت طبقه‌بندی ۰.۸۷ تا ۰.۸۹ و روندهای تغییرات را با موفقیت شبیه‌سازی کرد.

نتایج نشان داد که مناطق شهری بین ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ با رشد ۳۵ درصد (از ۳۷/۷ به ۵۱ کیلومترمربع) تحت تأثیر رشد جمعیت، توسعه زیرساخت‌ها و سیاست‌های شهری گسترش یافتند و پیش‌بینی می‌شود تا ۲۰۲۷ به ۵۶/۱ کیلومترمربع برسند. پوشش گیاهی پس از کاهش ۲/۷ درصد (از ۸۲۲ به ۸۰۰) در ۲۰۱۵-۲۰۱۹، با اقدامات مدیریتی و بهبود بارش به ۸۲۵ در ۲۰۲۳ بازگشت و انتظار می‌رود تا ۲۰۲۷ ثابت بماند. مناطق بیابانی با کاهش جزئی (۱۰۶۶۵ به ۱۰۶۵۰) مواجه شدند و پیش‌بینی

برای کاهش این اثرات، پیشنهاد می‌شود احداث فضاهای سبز در مناطق شهری برای کاهش جزایر گرمایی، اجرای طرح‌های احیای مراتع با گونه‌های بومی مقاوم به خشکی، اعمال سیاست‌های محدودکننده برای کنترل توسعه شهری و استفاده از آبیاری قطره‌ای و بازچرخانی آب برای مدیریت منابع آبی محدود قم در اولویت قرار گیرند. این یافته‌ها ابزار ارزشمندی برای برنامه‌ریزی پایدار و حفظ تعادل اکولوژیکی در اقلیم خشک قم ارائه می‌دهند.

می‌شود تا ۲۰۲۷ به ۱۰۶۴۵ برسند، که عمدتاً ناشی از تبدیل به کاربری شهری است.

این تغییرات پیامدهای زیست‌محیطی و اقلیمی قابل‌توجهی دارند. گسترش مناطق شهری و کاهش اراضی بیابانی می‌تواند دمای سطحی را افزایش دهد، رطوبت خاک را کاهش دهد و الگوهای اقلیمی محلی را تغییر دهد، که خطر فرسایش خاک و کاهش تنوع زیستی را به دنبال دارد.

منابع مورد استفاده

1. Arowolo, A., & Deng, X. (2018). Land use/land cover change and statistical modelling of cultivated land change drivers in Nigeria. *Regional Environmental Change*, 18(4), 247-259. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1186-5>
2. Chen, J., Chen, J., Liao, A., et al. (2015). Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 7-27. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002>
3. Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
4. Devanatham, A., & Subbarayan, S. (2021). Assessment of land use and land cover change detection and prediction using remote sensing and CA Markov in the northern coastal districts of Tamil Nadu, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 1-15.
5. Ebrahimi Vand, A., Houshyari Pour, F., & Rajabi, H. (2023). Assessment of development trend and land use change in Qom province using remote sensing technology. *Water Resources Engineering Journal*, 16(57), 91-102. (In Persian). <https://doi.org/10.30495/wej.2023.5831>
6. Esmaeili, A., & Ashjaei, H. (2019). Land use change modeling through Markov chain by using of GIS and satellite imagery, case study: Ghom Province. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 9(31), 153-172. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/gaij.2019.4710>
7. Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., et al. (2018). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574. <http://doi.org/10.1126/science.1111772>
8. Gunarso, P., et al. (2013). Oil palm and land use change in Indonesia, Malaysia and Papua New Guinea. Reports from the Technical Panels of the 2nd Greenhouse Gas Working Group of the Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO), 29-64.
9. Jensen, J. R. (2007). Remote sensing of the environment: An earth resource perspective. Pearson Education.
10. Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., et al. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261-269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
11. Li, X., & Yeh, A. G. O. (2002). Urban simulation using neural networks and cellular automata for land use planning. *Landscape and Urban Planning*, 56(4), 451-464. http://doi.org/10.1007/978-3-642-56094-1_33
12. Li, X., Zhou, Y., Zhao, M., & Zhao, X. (2020). A harmonized global nighttime light dataset 1992-2018. *Scientific Data*, 7(168), 1-9. <https://doi.org/10.1038/S41597-020-0510-Y>
13. Liu, Y., Li, Y., Li, S., & Motesharrei, S. (2015). Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors. *Remote Sensing*, 7(10), 13233-13250. <https://doi.org/10.3390/rs71013233>
14. Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 39(9), 2784-2817. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>
15. Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(3), 247-259. <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>

16. Muller, M. R., & Middleton, J. (1994). A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. *Landscape Ecology*, 9(2), 151–157.
17. Pettorelli, N., Schulte to Bühne, H., Tulloch, A., et al. (2017). Satellite remote sensing of ecosystem functions: Opportunities, challenges and way forward. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2), 71–93. <https://doi.org/10.1002/r8se2.59>
18. Ranjpishe, M., Khosravi, H., & Karimpour Rayhan, M. (2018). Assessment of climatic drought indices and identification the best indicator (Case Study :Qom basin), 7th conference on Range and range management of Iran, 8-9 May (In Persian). <https://doi.org/10.22034/HYD.2024.62269.1746>
19. Rohani, N., Moradi Faraj, A., Mojaradi, B., Rajaei, T., & Jabbari, E. (2022). Investigation of land use change in Qom province along with climatic parameters using satellite remote sensing technology. *RS & GIS for Natural Resources*, 12(4), 28–46. (In Persian). sid.ir/paper/1032866/en
20. Ross, S. (2014). *Introduction to Probability Models* (11th ed.). Academic Press.
21. Shalaby, A., & Tateishi, R. (2007). Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*, 27(1), 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2006.09.004>
22. Soares-Filho, B. S., et al. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440(7083), 520-523. <http://doi.org/10.1038/nature04389>
23. Tian, Y., Chen, H., Song, Q., & Zheng, K. (2018). A novel index for impervious surface area mapping: Development and validation. *Remote Sensing*, 10(10), 1521. <https://doi.org/10.3390/rs10101521>
24. Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., et al. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>
25. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. <http://doi.org/10.1080/014311603004987>
26. Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., & Strahler, A. H. (2004). Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 10(6), 1133–1145. <http://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00784.x>



Prediction and Modeling of Land Cover Changes in Qom Province Using Landsat Satellite Imagery

Safa Khazaei^{1*}, Ali Mohtadi²

Received: 2023-02-17 / Accepted: 2025-05-24 / Published: 2025-12-27

Abstract

Modeling and predicting land cover changes are essential for sustainable land use planning and natural resource management. This study aimed to analyze and forecast land cover changes in Qom Province using Landsat satellite imagery from 2015 to 2023, with predictions extending to 2027. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Built-up Index (NDBI) were calculated to assess vegetation and urban changes, respectively. The Support Vector Machine (SVM) classification method was employed for image analysis. A hybrid Markov Chain and Cellular Automata model was used to model historical trends (2015-2023) and predict future changes (2027), validated with a confusion matrix and Kappa coefficient (average 0.86). Results revealed that vegetation cover decreased from 822

to 800 km² (2.7% reduction) between 2015 and 2019 but recovered to 825 km² by 2023 due to improved management and climatic conditions. Urban areas expanded from 37.7 to 51 km² (35% growth), while desert regions declined from 10665 to 10650 km² (0.14% reduction). Forecasts indicate that urban areas will reach 56.1 km² by 2027 (an increase of 5.1 km² from 2023). These findings, by providing precise change patterns, enable the implementation of rangeland restoration programs, policies for controlled urban expansion, and optimized water resource management, critical for ecological balance in Qom's arid climate.

Extended Abstract

In recent decades, rapid population and economic growth have led to increased use of natural resources and changes in land cover. These changes have not only affected natural ecosystems. They have created serious challenges for food security, water resource management, and environmental sustainability. As one of the sensitive areas in terms of biodiversity and natural resources, Qom Province

Safa Khazaei¹ (✉) Ali Mohtadi²

1. Associate Professor, Civil Engineering research center, Imam Hussein University, Tehran, Iran

2. MSc. of Remote Sensing and Geographical Information System, Hekmat Private University, Qom, Iran

DOI: 10.82447/girs.2025.1198808

e-mail: skhazai@ihu.ac.ir

is a suitable example for studying land surface changes.

Modeling and predicting land cover changes is a must for land use planning. The combination of Markov chain model and cellular automata (CA) is used as a powerful tool in modeling environmental and temporal changes, especially in remote sensing studies. This method, using probabilistic models, models changes in different states based on the transition probabilities between these states and is proposed as a key tool for applications in land cover change analysis.

The aim of this research is to model land cover changes in Qom province using Landsat satellite images in the period 2015 to 2023 and predict changes until 2027. For this purpose, normalized difference vegetation index (NDVI) and smoothed building index (NDBI) and support vector machine (SVM) classification method are used. Also, by using a combination of Markov chain models and cellular automata, the land color change trend from 2015 to 2023 was modeled and changes were predicted for 2027. In this regard, ENVI software is used to extract device indices and classify satellite images, and EDRISI Selva software is used to run Markov chain algorithm and cellular automata to simulate and model land cover changes.

The results of this study showed that urban growth, as a dominant trend, is affected by various factors such as population growth, infrastructure expansion, land use change and management policies. The urban area has increased by about 13.23 km², equivalent to 35%, between 2015 and

2023, and this trend is predicted to continue until 2027 and reach 56.1 km², which represents another 10% increase compared to 2023. This rate reflects the continuing trend of urban development and indicates the increasing pressure on natural resources and the necessity of smart land use management. The results also showed that the vegetation cover of the region decreased between 2015 and 2019, losing about 2.7 percent of its area, but recovered in 2019 to 2023, reaching about 825 square kilometers. This trend is predicted to stabilize and the change in vegetation color will remain at the same level until 2027, which indicates the stability and management of natural resources. This stability can be attributed to management such as natural resource protection programs, increased public information about the environment, and sustainable agricultural policies. In addition, desert and mountainous areas have undergone minor changes and remain at about 10,665 to 10,685 square kilometers. These areas are predicted to decrease by about 20 square kilometers, equivalent to 0.19 percent, by 2027. This decrease occurs due to the development of urban areas and the change of land use to urban development. This trend indicates that some desert areas are being converted to urban areas, which could have implications for local ecosystems and environmental sustainability. It is worth noting that changes in desert areas can lead to changes in local climate patterns, increasing land surface area and reducing the area in which moisture is retained. This can have a domino effect on surrounding ecosystems, such as changes in wildlife

habitats, decreasing soil quality and increasing erosion.

This study showed that land cover changes in Qom province, in addition to affecting the environment and quality of life, have environmental messages for biodiversity, soil and water cycles and air quality. The significant increase in urban areas, equivalent

to 48.8% from 2015 to 2027, and the sustainability of vegetation are among the key results of this study, which is based on the need for smart management principles and policies in sustainable development.

Keywords: Modeling, Land Cover Changes, Prediction, Markov Chain, Cellular Automata.

Please cite this article as: Khazaei, Safa, Mohtadi, Ali. (2025) . **Prediction and Modeling of Land Cover Changes in Qom Province Using Landsat Satellite Imagery.** *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 16(4): 68-83.