



کالیبراسیون سه بعدی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف در حوزه آبخیز گرگان رود

محبوبه حاجی بیگلو، واحدبردی شیخ، هادی معماریان، چوقی بایرام کمکی

دریافت: ۱۹ اسفند ۱۳۹۸ / پذیرش: ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۱۵ تیر ۱۳۹۹

چکیده

آبخیز گرگان رود با کاربرد آنالیز سه بعدی پنتیوس-ملینوس در کالیبراسیون تغییرات کاربری اراضی با استفاده از سه شاخص ارزیابی اختلاف کمی (QD)، اختلاف مکانی (AD) و درجه شایستگی (FOM) به عنوان شاخص های جدید در ارزیابی صحت مدل زنجیره مارکوف است.

مواد و روش ها به منظور پیش بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف در حوزه آبخیز گرگان رود، از تصاویر سنجنده مشاهده گر زمینی OLI و TM ماهواره لندست ۸ و ۵ مربوط به سایت USGS استفاده شد. هفت کلاس کاربری اراضی شامل کلاس اراضی جنگلی با شماره کد کاربری ۱، کلاس اراضی زراعی با شماره کد کاربری ۲، کلاس اراضی مرتعی (مخلوط درختچه زار/ مرتع/ زراعت) با شماره کد کاربری ۳، کلاس منابع آبی با شماره کد کاربری ۴، کلاس اراضی بایر (بایر/ مرتع/ زراعت) با شماره کد کاربری ۵، کلاس مناطق مسکونی و صنعتی با شماره کد کاربری ۶، کلاس بستر رودخانه با شماره کد کاربری ۷ برای حوزه آبخیز گرگان رود تفکیک گردید. به منظور طبقه بندی تصاویر ماهواره ای لندست ۵ و ۸ به منظور استخراج کلاس های کاربری اراضی حوزه آبخیز گرگان رود از روش طبقه بندی شیء گرا و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. مقیاس سگمنت سازی در این الگوریتم با مقیاس ۵۰ واحد (SL50) به منظور طبقه بندی تصاویر ماهواره سال های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ انتخاب شد. ارزیابی صحت الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در طبقه بندی

پیشینه و هدف تغییرات در کاربری/پوشش اراضی به عنوان یکی از موضوعات مهم در مدیریت منابع طبیعی، توسعه پایدار و تغییرات زیست محیطی در مقیاس محلی، ملی، منطقه ای و جهانی مطرح است. تبدیل کاربری ها به یکدیگر و تغییر کاربری های مجاز به غیرمجاز از قبیل تبدیل اراضی زراعی به مناطق مسکونی و یا اراضی مرتعی به دیمزارهای کم بازده و فرسایش یافته به عنوان موضوعات مهم در منابع طبیعی همواره مطرح است. شناسایی الگوهای تغییرات کاربری اراضی و پیش بینی تغییرات در آینده به منظور انجام برنامه ریزی مناسب در جهت بهره برداری بهینه از کاربری ها در مدیریت منابع طبیعی نیاز به مدل سازی تغییرات مکانی و زمانی LU/LC را آشکار می سازد. هدف از تحقیق ارزیابی کارایی مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف (CA-Markov model) در شبیه سازی و پیش بینی تغییرات زمانی و مکانی LU/LC در حوزه

محبوبه حاجی بیگلو^۱، واحدبردی شیخ^۲، هادی معماریان^۳، چوقی بایرام کمکی^۴

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران
۲. دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران
۳. دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۴. استادیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: hajibigloo@gmail.com

۸۹/۹۲ درصد، نشان از کارایی بالای مدل زنجیره مارکوف در فرآیند شبیه‌سازی بود. بعد از اجرای تحلیل زنجیره مارکوف بر روی نقشه کاربری اراضی به دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، یک ماتریس احتمال انتقال و ماتریس مساحت انتقال یافته ایجاد شد. در پیش‌بینی‌های انجام شده توسط مدل زنجیره مارکوف از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۳۵ عمده تغییرات مربوط به کاهش وسعت اراضی جنگلی و بایر به ترتیب به میزان ۱۶۹۶۶ و ۶۹۶۱ هکتار است و در مقابل این کاهش کاربری، افزایش وسعت اراضی زراعی، مرتعی و مسکونی به میزان ۲۰۳۹۷، ۳۹۱۳ و ۳۸۲۵ هکتار مشاهده خواهد شد.

نتیجه‌گیری آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از ابزار LCM برای دوره سی ساله ۲۰۱۷ - ۱۹۸۷ در حوزه آبخیز گرگان‌رود نشان داد که کاربری جنگل، زراعت و نواحی مسکونی در طی این دوره در این منطقه تغییرات چشمگیری داشته است. نتایج حاصل از پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در طی هجده سال آینده با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف نشان داد که در طی سالیان آتی با پدیده جنگل‌زدایی شدید در این حوزه روبه‌رو خواهیم بود. بررسی نتایج حاصل از اجرای مدل شبکه‌سازی کاربری آینده با استفاده از تخمینگر انتقال مارکوف نشان داد که می‌توان تغییرات کاربری آینده را با توجه به شرایط محیطی موجود پیش‌بینی کرد که نشان‌دهنده این است که در حوزه آبخیز گرگان‌رود در طی هجده سال آینده زراعت به شدت در این منطقه افزایش خواهد داشت. لذا باید با مدیریت بلندمدت و جامع، منابع آب و خاک حفظ کرد و تا حد امکان مانع از تخریب این منابع ارزشمند شد. سه شاخص QD، AD و FOM در آنالیز سه‌بعدی نقش مهمی در بیان میزان صحت و کالیبراسیون طبقه‌بندی کاربری اراضی و پیش‌بینی کاربری اراضی داشت. نتایج تغییرات کاربری اراضی مطالعه شده با استفاده از ابزار LCM و مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف در طی دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۳۵ بیانگر تخریب بیش از ۲۴۳۰۹ هکتار از اراضی جنگلی و ۳۱۹۲۱ هکتار از اراضی مرتعی و افزایش زراعت در حوزه به مساحت ۶۲۴۲۱ هکتار است که بیانگر دخالت‌های انسانی و جنگل‌تراشی‌های پیش رو در این حوزه است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، ابزار LCM، مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف، آنالیز سه‌بعدی پنتیوس-ملینوس

شیء‌گرای تصاویر ماهواره‌ای بایان دقت کلی، ضریب کاپا، صحت کاربر، صحت تولید شده، خطای Commission و خطای Omission برای هر چهار دوره مطالعاتی انجام شده است. برای درک این که در طی دوره ۳۰ ساله مورد مطالعه، تغییرات ایجاد شده در منطقه چگونه بوده و کدام کلاس‌ها گسترش و کدام کلاس کاهش مساحت داشته‌اند، با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی شده با استفاده از نرم‌افزار IDRISI، تغییرات در محدوده کلاس‌ها آشکار و درصد تغییرات هر کلاس به دست آمد. مدل CA-Markov تغییرات گروه‌های مختلف از واحدهای LU/LC را بر اساس مفهوم همسایگی مکانی و ماتریس احتمال انتقال، پیش‌بینی می‌کند. یکی از الزامات برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با مدل CA-Markov تهیه نقشه‌های تناسب اراضی است تا تغییرات مکانی به وسیله قوانین احتمال از طریق فیلتر نقشه‌های تناسب برای هر کاربری کنترل شود. اعتبارسنجی مدل مارکوف با استفاده از آنالیز سه‌بعدی پنتیوس و ملینوس با سه شاخص درجه شایستگی و اختلاف‌های کمی اختلاف‌های مکانی انجام شد.

نتایج و بحث الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی کاربری اراضی به روش شیء‌گرا نشان داد که بیشترین میزان خطای اضافه و خطای حذف به ترتیب با ۱۹/۱۲ و ۱۸/۵۵ درصد در اراضی مرتعی و اراضی زراعی در نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۹ مشاهده گردید. پایین‌ترین صحت تولیدکننده به میزان ۷۱/۴۹ درصد مربوط به کلاس کاربری اراضی مرتعی در نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۹ و پایین‌ترین صحت کاربر به میزان ۷۱/۴۵ درصد مربوط به کلاس کاربری اراضی زراعی در نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۷ است. در دوره ۳۰ ساله از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ بر اساس نتایج به دست آمده، بیش‌ترین تغییر مثبت مربوط به افزایش کاربری اراضی زراعی و در تغییرات منفی مربوط به کاهش کاربری اراضی جنگلی و مرتعی در طول دوره مورد نظر است. بیش‌ترین کاهش اراضی جنگلی با ۸/۴ درصد در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۰، بیش‌ترین افزایش اراضی زراعی با ۳/۵ درصد در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۷، بیش‌ترین کاهش اراضی مرتعی با ۹ درصد در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹، بیش‌ترین افزایش اراضی بایر با ۶/۴ درصد در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹ و بیش‌ترین افزایش اراضی مسکونی و صنعتی با ۸/۰ درصد در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۷ رخ داده است. بعد از اعتبارسنجی تغییرات کاربری اراضی پیش‌بینی شده در مدل زنجیره مارکوف، بر اساس تحلیل ۵ حالت موجود در آنالیز سه‌بعدی پنتیوس و ملینوس، مدل زنجیره مارکوف با پیش‌بینی صحیح شبیه‌سازی

مقدمه

تغییرات در کاربری/پوشش اراضی (LU/LC) به عنوان یکی از موضوعات مهم در مدیریت منابع طبیعی، توسعه پایدار و تغییرات زیست محیطی در مقیاس محلی، ملی، منطقه‌ای و جهانی مطرح است (۱۱ و ۲۵). تبدیل کاربری‌ها به یکدیگر و تغییر کاربری‌های مجاز به غیرمجاز از قبیل تبدیل اراضی زراعی به مناطق مسکونی و یا اراضی مرتعی به دیم‌زارهای کم‌بازده و فرسایش یافته به عنوان موضوعات مهم در منابع طبیعی همواره مطرح می‌باشد. ایجاد مکان‌های تولیدکننده گردوغبار، جنگل تراشی و ایجاد مکان‌های مستعد فرسایش به عنوان محرک‌های اصلی مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در کشورهای در حال توسعه در حال حاضر است (۱۵ و ۳۱). تکنیک‌های سنجش‌ازدور (RS) به همراه سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی نقش مؤثری در تجزیه و تحلیل LU/LC هر یک از کلاس‌های کاربری خواهد داشت، به گونه‌ای که با پردازش مناسب تصاویر و افزایش صحت طبقه‌بندی و انتخاب مناسب باندها می‌توان به نتایج مناسبی در امر مدیریت سرزمین و پیش‌بینی تغییرات آینده دست یافت (۳۰). در واقع نقش اصلی کاربرد GIS و الگوریتم‌های مختلف پیش‌پردازش تصاویر در بحث سنجش‌ازدور با مشاهدات زمینی در مقیاس جهانی، منطقه‌ای و محلی که به صورت روزانه برداشت اطلاعات انجام می‌شود و این برداشت‌ها اطلاعات جامع و دقیقی را برای تجزیه و تحلیل تغییرات انجام شده در طی دوره‌های مختلف فراهم می‌کند (۹). شناسایی الگوهای تغییرات کاربری اراضی و پیش‌بینی تغییرات در آینده به منظور انجام برنامه‌ریزی مناسب در جهت بهره‌برداری بهینه از کاربری‌ها در مدیریت منابع طبیعی نیاز به مدل‌سازی تغییرات مکانی و زمانی LU/LC را آشکار می‌سازد (۲ و ۸). به منظور تجزیه و تحلیل الگوهای LU/LC، مدل‌های مختلفی به منظور توزیع پراکنش مکانی و زمانی این تغییرات وجود دارد که قادر به شبیه‌سازی واقعه محور تغییرات و پیش‌بینی آن به صورت سلولی است تا بتوان فرآیند بهینه‌سازی را بر اساس پویایی تغییرات انجام داد. از قبیل مدل‌سازی خطی

تعمیم یافته (Generalized linear modeling) در محیط GIS برای مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی (۱۲)، رگرسیون چند متغیره در مدل‌سازی رشد و توسعه مناطق مسکونی و شهری (۳۷)، شبکه عصبی مصنوعی (Neural network model) (۳)، مدل‌های ریاضی (CLUE-S models) (۳۵)، مدل‌های عامل محور (Multi agent base model) (۲۶)، مدل‌های سلولی (Cellular automaton model) (۱۲)، مدل‌های سیستم خبره (Expert system model) (۳۲) و مدل‌های تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف (CA-Markov model) (۱ و ۲۷) در پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل مکانی تغییرات کاربری اراضی. در حال حاضر پرکاربردترین مدل‌ها در پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری LU/LC، مدل سلولی، مدل مارکوف، مدل عامل محور و ترکیبی از مدل‌های سلولی و مارکوف بنام مدل سلول اتومای زنجیره مارکوف است (۱۱ و ۲۱).

مدل سلول اتومای زنجیره مارکوف مدلی مبتنی بر احتمال و یک شبیه‌ساز قوی در امر پیش‌بینی تغییرات LU/LC در مقایسه با سایر مدل‌های شبیه‌سازی است. این مدل در مدیریت، برنامه‌ریزی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی تغییرات مکانی استفاده می‌شود (۵ و ۶). مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی کارایی مدل CA-Markov در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و استخراج میزان تغییرات واحدهای کاربری/پوشش اراضی در طی ۳۷ دوره‌های مختلف با استفاده از ابزار LCM در مناطق مختلف جهان انجام شده است که در ادامه به آن اشاره شده است.

منصور و همکاران (۱۹) در تحقیق خود در شهر نزوا در استان الدخلیه کشور عمان با استفاده از مدل CA-Markov میزان تغییرات کاربری اراضی به منظور برآورد میزان فشار وارد شده بر منابع طبیعی را مطالعه نمودند. آن‌ها در مطالعه خود از تصاویر ماهواره‌ای لندست سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ استفاده نمودند. در تهیه نقشه‌های تناسب اراضی برای توسعه شهر پارامترهای تراکم جمعیت، نزدیکی به مراکز شهری و مجاورت با جاده‌های اصلی در نظر گرفته شد. نتایج پیش‌بینی بیانگر قابلیت مدل CA-Markov در برنامه‌ریزی

همکاران (۲۹) با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای خودکار مارکوف (CA-Markov) روند تغییرات کاربری اراضی در حوزه آبخیز صفارود رامسر را بررسی نمودند. صحت مدل زنجیره‌ای مارکوف با استفاده از شاخص کاپا ۰/۸۷ برآورد گردید و نتایج نشان داد در فاصله زمانی ۲۰۲۸-۲۰۱۴ اراضی جنگلی و مراتع به ترتیب ۴/۹۲ و ۱/۷ درصد کاهش داشته است. در تحقیقی دیگر توسط محمدی و همکاران (۲۱) پیش‌بینی تغییرات کاربری/پوشش اراضی و ارتباط آن با خشک‌سالی در یکی از زیر حوزه‌های آبخیز رودخانه زاینده‌رود انجام شد. اعتبارسنجی مدل CA-Markov با استفاده از شاخص‌های $K_{location}$ ، K_{no} ، $K_{standard}$ به ترتیب برابر ۰/۷۱، ۰/۷۸ و ۰/۸۶ استخراج شد که بیانگر دقت خوب نقشه شبیه‌سازی شده با مدل مذکور است. در اغلب مطالعات اشاره شده در بالا با مدل زنجیره مارکوف، ارزیابی صحت مدل با دقت کلی (Overall accuracy)، ضریب کاپا (Kappa coefficient)، صحت کاربر (User accuracy)، صحت تولیدشده (Producer accuracy)، خطای Commission و خطای Omission انجام شده است و از شاخص‌های جدید ارزیابی صحت استفاده نشده است.

لذا در تحقیق حاضر، با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیر مارکوف اقدام به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات LU/LC در حوزه آبخیز گرگان‌رود واقع در استان گلستان با استفاده از آنالیز سه‌بعدی پنتیوس-ملینوس گردید. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی کارایی مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیر مارکوف در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی LU/LC در حوزه آبخیز گرگان‌رود با کاربرد آنالیز سه‌بعدی پنتیوس-ملینوس در کالیبراسیون تغییرات کاربری اراضی با استفاده از سه شاخص ارزیابی اختلاف کمی (Quantity Disagreement)، اختلاف مکانی (Allocation Disagreement) و درجه شایستگی (Figure of Merit) به‌عنوان شاخص‌های جدید در ارزیابی صحت مدل زنجیره مارکوف است.

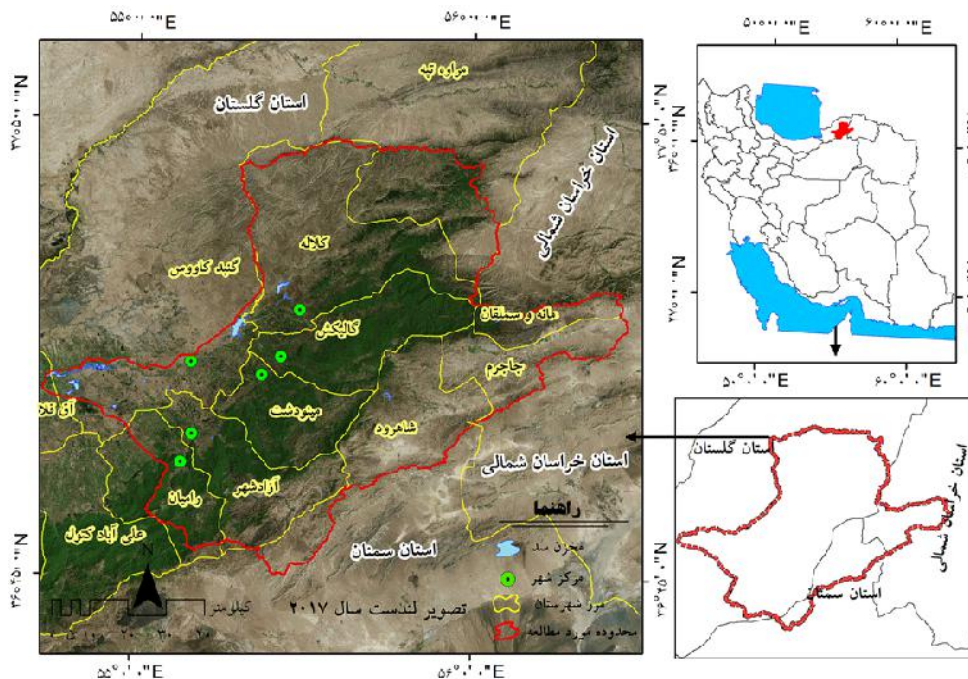
توسعه شهری آینده است. در تحقیقی دیگر توسط مونتالی و همکاران (۲۲) از یک رویکرد یکپارچه ترکیبی از سنجش‌از‌دور و GIS برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در منطقه ددزا (Dedza) در مالوی (Malawi) بهره گرفتند. اعتبارسنجی مدل CA-Markov با استفاده از شاخص‌های $K_{location}$ ، K_{no} ، $K_{standard}$ به ترتیب برابر ۰/۹۷، ۰/۹۵ و ۰/۹۷ استخراج شد که بیانگر دقت بالای نقشه شبیه‌سازی شده با مدل مذکور است. پیش‌بینی‌های آینده نشان داد که تا سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۳۵ بر اساس ماتریس احتمال انتقال، زمین‌های کشاورزی و زمین‌های بایر و مناطق ساخته شده دارای روند افزایشی و اراضی جنگلی و تالاب‌ها دارای روند کاهشی است و این روند توسعه پیش‌بینی شده توسط مدل می‌تواند در برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار و مدیریت پایدار منابع طبیعی نقش مؤثری داشته باشد. وارگا و همکاران (۳۴) با استفاده از شاخص درجه شایستگی (Figure of Merit) اقدام به کالیبراسیون نتایج مدل اتومای سلولی مارکوف نمودند. آن‌ها ۴ سطح متفاوت از این شاخص را در مطالعه خود که در شمال شرق مجارستان انجام شده بود، بررسی نمودند. نتایج بیانگر سطوح خطای کمتر نقشه‌های شبیه‌سازی شده نسبت به نقشه‌های پیش‌بینی شده است. مدل اتومای سلولی مارکوف نشان داد که کاربری زراعت و تالاب دارای کمترین FOM نسبت به سایر کاربری‌ها است. مطالعه نشان داد که بیشتر خطای موجود در مدل‌سازی مربوط به مدل CA نسبت به مارکوف است. در مطالعه‌ای که توسط کیلی و همکاران (۱۴) در حوزه رودخانه ویرا (Vieira) در مونتس کلاروس برزیل انجام شد، عملکرد مدل CA-Markov در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی به‌منظور شرایط مستعد برای پدیده بیابان‌زایی بررسی شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی بیانگر عملکرد متوسط مدل CA در مدل‌سازی است و بیشتر خطاها مربوط به توزیع مکانی کلاس‌های کاربری است. اما مدل تلفیقی سلول اتومای خودکار مارکوف (CA-Markov) شرایط مستعدتری در تخمین مساحت کلاس‌های کاربری نسبت به واقعیت منطقه نشان داد و دارای ضریب کاپای بالای ۹۳ درصد بود. صالحی و

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز گرگان رود در استان گلستان و بخشی از استان خراسان شمالی و استان سمنان در مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 44' 49''$ تا $37^{\circ} 47' 11''$ عرض شمالی و $54^{\circ} 43' 33''$ تا $56^{\circ} 27' 20''$ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). گرگان رود یکی از مهم ترین رودخانه های استان گلستان به شمار می رود و در تمامی دشت گرگان جریان داشته و آن را به دو قسمت تقسیم می کند. سطح حوضه آبخیز آن به مساحت 10250

کیلومترمربع است. مساحت حوزه آبخیز گرگان رود $7915/5$ کیلومترمربع، ارتفاع متوسط حوزه 1529 متر و متوسط بارندگی سالانه حوزه 523 میلی متر است. جهت جریان رودخانه گرگان رود و سرشاخه های آن از شمال شرقی به جنوب غربی است که از ارتفاعات جنگل گلستان، کوه های گلی داغ، آلا داغ و قلعه ماران سرچشمه می گیرد. کاربری اراضی غالب موجود در حوزه آبخیز گرگان رود از نوع جنگل های هیرکانی، مراتع، زراعت دیم و اراضی کشاورزی آبی است.



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز گرگان رود در ایران و استان گلستان

Fig. 1. Location of Gorganrood watershed in Iran and Golestan province

داده های مورد استفاده

در این تحقیق به منظور پیش بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف در حوزه آبخیز گرگان رود، از تصاویر سنجنده مشاهده گر زمینی

OLI و TM ماهواره لندست ۵ و ۸ مربوط به سایت زمین شناسی ایالات متحده آمریکا وابسته به سایت ناسا USGS استفاده شد. مشخصات تصاویر ماهواره ای استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق

Table 1. The data used in this study

نوع ماهواره/سنجنده	تاریخ اخذ تصویر	قدرت تفکیک مکانی	باندهای مورد استفاده	شماره گذر/ردیف ماهواره	آزیموت
Dataset	Date	Resolution	Used bands	Path/Row	Azimuth
لندست ۵ / Landsat5 TM	۱۹۸۷/۰۶/۱۰	۳۰	۲-۳-۴-۵-۷	۱۶۲/۳۴	۱۱۸/۱۲
لندست ۵ / Landsat5 TM	۲۰۰۰/۰۷/۲۰	۳۰	۲-۳-۴-۵-۷	۱۶۲/۳۴	۱۱۹/۰۵
لندست ۵ / Landsat5 TM	۲۰۰۹/۰۷/۲۱	۳۰	۲-۳-۴-۵-۷	۱۶۲/۳۴	۱۲۱/۲۳
لندست ۸ / Landsat8 OLI	۲۰۱۷/۰۸/۲۵	۱۵	۳-۴-۵-۶-۷	۱۶۲/۳۴	۱۲۱/۶۳

ابزار مدل‌سازی تغییرات سرزمین

ابزار مدل‌سازی تغییرات زمین (LCM) یک مدل یکپارچه برای تجزیه و تحلیل کاربری زمین و تغییرات پوشش آن و برای سنجش آن است. LCM ارزیابی تغییرات پوشش اراضی بین دو زمان متفاوت، محاسبه تغییرات و نمایش نتایج با نمودار و نقشه‌های مختلف است (۲). برای درک این‌که در طی دوره ۳۰ ساله مورد مطالعه، تغییرات ایجاد شده در منطقه چگونه بوده و کدام کلاس‌ها گسترش و کدام کلاس کاهش مساحت داشته‌اند، با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی شده با استفاده از نرم‌افزار ادیسی IDRSI، تغییرات در محدوده کلاس‌ها آشکار و درصد تغییرات هر کلاس به دست می‌آید.

مدل زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف یک فرآیند ریاضی تصادفی در یک توالی زمانی محدود است و وضعیت آینده آن با حالت‌های فعلی در ارتباط است (۱۶). از آنجاکه تغییرات کاربری اراضی در آینده توسط کاربری‌های موجود در زمان حال تعیین می‌شود، تغییرات کاربری را می‌توان با مدل زنجیره مارکوف به صورت سلسله مراتبی و در طی دوره‌های مختلف استخراج نمود. تغییرات کاربری در آینده با استفاده از رابطه ۱ در مدل زنجیره مارکوف پیش‌بینی می‌شود.

$$S_{(t+1)} = P \times S_t \quad [1]$$

که در این رابطه؛ S_t و $S_{(t+1)}$ بیانگر کاربری اراضی در زمان t و $t+1$ ، ماتریس انتقال (۱۶). برای روشن شدن مفهوم کلی فرآیند مارکوف می‌توان گفت که اگر زمان را در این

هفت کلاس کاربری اراضی شامل کلاس اراضی جنگلی با شماره کد کاربری ۱، کلاس اراضی زراعی با شماره کد کاربری ۲، کلاس اراضی مرتعی (مخلوط درختچه زار/ مرتع/ زراعت) با شماره کد کاربری ۳، کلاس منابع آبی با شماره کد کاربری ۴، کلاس اراضی بایر (بایر/ مرتع/ زراعت) با شماره کد کاربری ۵، کلاس مناطق مسکونی و صنعتی با شماره کد کاربری ۶، کلاس بستر رودخانه با شماره کد کاربری ۷ برای حوزه آبخیز گرگان‌رود تفکیک گردید.

طبقه‌بندی شیء‌گرایی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

در این تحقیق به منظور طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ به منظور استخراج کلاس‌های کاربری اراضی حوزه آبخیز گرگان‌رود از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine) استفاده شد. مقیاس سگمنت‌سازی در این الگوریتم با مقیاس ۵۰ واحد (SL50) به منظور طبقه‌بندی تصاویر ماهواره سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ انتخاب شد (۱۳). ارزیابی صحت الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی شیء‌گرایی تصاویر ماهواره‌ای با بیان دقت کلی (Overall accuracy)، ضریب کاپا (Kappa coefficient)، صحت کاربر (User accuracy)، صحت تولید شده (Producer accuracy)، خطای Commission و خطای Omission برای هر چهار دوره مطالعاتی انجام شده است.

خروجی مدل نیز شامل احتمال تبدیل وضعیت، ماتریس مساحت‌های تبدیل شده (Transition areas matrix) هر طبقه و سپس تصاویر احتمالات شرطی (Conditional probability) برای تبدیل کاربری‌های مختلف به یکدیگر است.

در این تحقیق برای ورودی‌های اولیه مدل مارکوف از تصاویر طبقه‌بندی شده سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ به‌عنوان نقشه‌های پوشش، برای تهیه ماتریس تبدیل وضعیت استفاده شد. ماتریس تبدیل وضعیت برای سه دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۰، ۲۰۱۷-۲۰۰۹-۲۰۰۰ و ۲۰۱۷-۲۰۰۹-۱۹۸۷ تهیه شد. ماتریس تبدیل وضعیت با استفاده از نقشه‌های پوشش زمین به‌دست‌آمده برای هر دوره، ماتریس تبدیل وضعیت کلاس‌های پوشش زمین بین هر دو دوره زمانی محاسبه شد. برای دوره اول از نقشه‌های پوشش سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۰ ماتریس تبدیل وضعیت اول و از نقشه‌های پوشش سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۹ ماتریس تبدیل وضعیت دوم، برای دوره دوم از نقشه‌های پوشش سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ ماتریس تبدیل وضعیت اول و از نقشه‌های پوشش سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ ماتریس تبدیل وضعیت دوم، محاسبه گردید. این ماتریس‌ها حاوی اطلاعات درصد تبدیل هر کلاس به سایر کلاس‌ها می‌باشند.

مدل سلول خودکار

CA یک سیستم دینامیک و گسسته در مکان و زمان است که بر روی یک شبکه منظم از سلول‌ها عمل می‌کند. در این سیستم مقدار یا حالت هر سلول در طول زمان در قالب تابعی از مقادیر سلول‌های همسایه و مقدار خود سلول تغییر می‌کند. چیزی که در این مدل حائز اهمیت است این است که این تغییرات در قالب زمان و مکان فقط به شکل محلی تغییر می‌کند و فقط سلول‌های مجاور هستند که در این تغییرات دخیل می‌باشند. هر CA دارای پنج المان اصلی شبکه منظم سلولی، مجموعه مقادیر ممکن برای هر سلول، همسایگی،

فرآیند به سه دوره گذشته، حال و آینده تقسیم کنیم، آینده این فرآیند بستگی به مسیری که در گذشته طی کرده است، ندارد و تنها به موقعیت آن در زمان حال وابسته است. زنجیره‌های مارکوف همگن حالت خاصی از زنجیره‌های مارکوف است که در آن احتمال گذار سیستم از حالت به حالت دیگر مستقل از مرحله آن باشد. به بیان ریاضی زنجیره مارکوف در صورتی همگن است که به ازای تمام مقادیر i, j و n رابطه ۲ برقرار باشد:

$$P[X_{n+1} = j | X_n = i] = P[X_1 = j | X_0 = i] = P_{ij} \quad [2]$$

بنابراین در یک زنجیره مارکوف همگن P_{ij} معرف احتمال تغییر حالت سیستم از i به j است.

ماتریس احتمال (گذر) در یک زنجیره مارکوف

در فرآیند مارکوف برای پیش‌بینی وضعیت آینده نیاز به یک ماتریس احتمال (ماتریس گذر) داریم تا احتمال تغییرات کاربری با ضرب در این ماتریس به تغییرات کاربری در آینده تبدیل شود. ماتریس گذر، ماتریسی است که عنصر تشکیل‌دهنده آن در سطر i و ستون j مقدار P_{ij} یا همان احتمال تغییر حالت سیستم از i به j است. اگر فرض کنیم که تعداد حالت‌های سیستم M باشد، ماتریس گذر به صورت رابطه ۳ است.

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1M} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{M1} & p_{M2} & \dots & p_{MM} \end{bmatrix} \quad (0 \leq p_{ij} < 1 \text{ and } \sum_{j=1}^M p_{ij} = 1, (i, j = 1, 2, \dots, M)) \quad [3]$$

تمام عناصر این ماتریس غیر منفی است، همچنین مجموع عناصر هر سطر برابر با یک است اما مجموع عناصر یک ستون الزاماً یک نیست. با توجه به نامتناهی بودن تعداد حالت‌های سیستم، ابعاد ماتریس نیز می‌تواند نامتناهی باشد.

آنالیز زنجیره مارکوف برای دو منظور تهیه می‌گردد، ماتریس اول جهت کالیبراسیون و ماتریس دوم به منظور شبیه‌سازی تغییرات احتمالی رخ داده در آینده انجام می‌گیرد،

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با مدل CA-Markov تهیه نقشه‌های تناسب اراضی است تا تغییرات مکانی به‌وسیله قوانین احتمال از طریق فیلتر نقشه‌های تناسب برای هر کاربری کنترل شود.

تناسب کاربری اراضی به روش ارزیابی چند معیاره

به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در آینده با استفاده از مدل CA-Markov نیاز به تعیین نقشه‌های تناسب اراضی برای هر یک از واحدهای کاربری اراضی تعریف‌شده در منطقه است. در این مرحله برای ایجاد نقشه‌های تناسب مکانی برای هرکدام از واحدهای کاربری/پوشش زمین (LU/LC) از روش ارزیابی چند معیاره مکانی استفاده‌شده است. مدل ارزیابی چند معیاره استفاده‌شده در این تحقیق مدل ترکیب خطی وزنی (WLC; Weighted linear combination) است که از رابطه ۴ به دست محاسبه گردید (۴).

$$t_{si,j} = \sum_{m=1}^M t_{xi,j} \times W_m \times C_m \quad [4]$$

در این رابطه؛ $t_{si,j}$ بیانگر شاخص تناسب برای سلول i,j در زمان t ، $t_{xi,j}$ نمره معیارها برای سلول i,j در زمان t ، W_m بیانگر وزن داده شده به هر یک از معیارها و C_m ارزش بولین مقادیر ثابت توسعه یافته.

در این راستا اولین اقدام تعیین معیارهای دخیل و ایجاد نقشه‌های معیار در تناسب مکانی هرکدام از کاربری‌ها است. معیارهای مؤثر در تناسب مکانی کاربری‌ها بر اساس سه تابع تناسب (Fuzzy)، فاصله (Distance) و تراکم (Density) مدنظر قرار گرفته است. این معیارها مشتمل بر ۱۹ لایه اطلاعاتی شامل ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب، رخنمون سنگی، رخساره‌های فرسایشی، منابع آب زیرزمینی، جاده‌ها، پراکنش آبادی‌ها، آبراهه‌های اصلی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، شدت فرسایش، نفوذپذیری، منحنی‌های هم باران، پراکنش شهرها، منحنی‌های هم‌دما، بافت خاک، گروه‌های هیدرولوژیکی و گسل است. در این مدل، فاکتورها به روش فازی وزن دهی مجدد می‌شوند. اهمیت بین فاکتورها نیز با استفاده از فرآیند

قوانین انتقال و فضای زمانی است. در این تحقیق از المان همسایگی برای طبقه‌بندی واحدهای کاربری اراضی با مدل سلول خودکار استفاده‌شده است (۷).

مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف

مدل زنجیره مارکوف به‌تنهایی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پیوسته کاربری اراضی مناسب نیست، زیرا در این مدل‌سازی، توزیع مکانی مربوط به هر یک از واحدهای کاربری به‌منظور تعیین مکان‌های پیش‌بینی‌شده در آینده در نظر گرفته نمی‌شود (۱۰). مدل زنجیره مارکوف و مدل سلول خودکار هر دو در واقع مدل دینامیک گسسته در زمان و موقعیت‌اند. مشکل ذاتی زنجیره مارکوف این است که اطلاعات و موقعیت مکانی را در نظر نمی‌گیرد. احتمال تبدیل ممکن است روی هر گره پایه با صحت و دقت همراه باشد، اما فقط دانش و آگاهی از توزیع مکانی تصادفی درون هر گروه کاربری اراضی است و به عبارتی مؤلفه مکانی در خروجی مدل وجود ندارد. به همین سبب از مدل برای اضافه کردن مشخصه مکانی به مدل استفاده می‌شود (۳۶). مدل سلول اتومای زنجیره مارکوف ترکیبی از مدل زنجیره مارکوف و مدل سلول خودکار است تا علاوه بر ساختارهای مکانی، جهت جغرافیایی تغییرات هر یک از واحدهای LULC هم در نظر گرفته شود. در مدل CA-Markov، پروسه زنجیره مارکوف تغییرات زمانی را در میان کلاس کاربری/پوشش زمین بر اساس احتمالات تبدیل کنترل می‌کند، درحالی‌که تغییرات مکانی به‌وسیله قوانین محلی تعیین‌شده از طریق فیلتر مکانی CA یا همان نقشه‌های تناسب برای هر کاربری کنترل می‌شود. مدل CA-Markov، ترکیبی از مدل سلول خودکار، مدل زنجیره مارکوف، ارزیابی چندمعیاره، تخصیص چندمعیاره زمین و پیش‌بینی کاربری اراضی به‌منظور تجزیه و تحلیل مکانی تغییرات به همراه جهت هر یک از این تغییرات با آنالیز زنجیره مارکوف است (۱۷). مدل CA-Markov تغییرات گروه‌های مختلف از واحدهای LULC را بر اساس مفهوم همسایگی مکانی و ماتریس احتمال انتقال، پیش‌بینی می‌کند. یکی از الزامات برای

بر اساس آنالیز سه بعدی پنتیوس و ملیوس توضیح داده خواهد شد (۳۴). با محاسبه مؤلفه های FOM، اختلاف های کمی و اختلاف های مکانی و کل اختلاف (Total disagreement) محاسبه می شود (۱۸). اختلاف کمی بیانگر حالتی است که تعداد سلول های یک طبقه در نقشه شبیه سازی شده با تعداد سلول های همان طبقه در نقشه پایه متفاوت است. اختلاف مکانی بیانگر حالتی است که مکان یک کلاس کاربری در نقشه شبیه سازی شده با مکان همان کلاس کاربری در نقشه پایه متفاوت باشد (۲۳ و ۲۴). رابطه ۵ بیان کننده اختلاف کمی که در واقع اختلاف بین تعداد سلول های شبیه سازی شده صحیح (Gain) و تعداد سلول های به اشتباه شبیه سازی (Loss) است. رابطه ۶ بیان کننده اختلاف مکانی که در واقع دو برابر حداقل مکان سلول های به اشتباه شبیه سازی شده (Loss) و سلول های شبیه سازی شده صحیح (Gain) است. به طور کلی اختلاف کمی معادل قدر مطلق اختلاف خطای Omission و خطای Commission و اختلاف مکانی معادل دو برابر حداقل خطای Commission و خطای Omission بر اساس جدول ماتریس خطای حاصل شده از مقایسه دو نقشه شبیه سازی شده و نقشه مرجع است. رابطه ۷ بیان کننده کل اختلاف که در واقع جمع اختلاف کمی و اختلاف مکانی است.

$$\text{Quantity Disagreement} = |\text{Gain} - \text{Loss}| \quad [5]$$

$$\text{Allocation Disagreement} = 2 \text{ minimum } (\text{Loss}, \text{Gain}) \quad [6]$$

$$\text{Total Disagreement} = \text{Quantity Disagreement} + \text{Allocation Disagreement} \quad [7]$$

FOM بیانگر تلاقی شبیه سازی شده تغییرات مشاهده شده و شبیه سازی تغییرات، تقسیم بر اتحاد تغییرات مشاهده شده و شبیه سازی شده تغییرات است و از دامنه صفر تا ۱۰۰ است که صفر یعنی هیچ همپوشانی بین تغییرات واقعی و پیش بینی شده وجود ندارد و ۱۰۰ درصد یعنی همپوشانی کامل بین تغییرات واقعی و پیش بینی شده وجود دارد (رابطه ۸) (۳۱ و ۳۴).

تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تعیین گردیده است. در روش AHP، معیارها ابتدا به صورت کیفی بوده و بعد با بهره گیری از جدول ساعتی به صورت کمی ارائه می شوند. در این فرآیند نسبت ناسازگاری (Consistency ratio) تعیین می شود و اگر میزان آن کمتر از ۰/۱ باشد، دلالت بر سطح قابل قبول سازگاری مقایسه های دویه دو دارد (۳۳). از مزایای ممتاز این تکنیک، بهره گیری از آن در تصمیم گیری چندمعیاره است و همچنین از یک مبنای تئوریک قوی برخوردار بوده و بر اساس اصول بدیهی تصمیم گیری بنا نهاده شده است (۲۸). عوامل مؤثر در هر یک از واحدهای کاربری اراضی در مدل AHP به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه و بر اساس مدل مذکور امتیازدهی شده است که وزن نهایی مربوط به هر کاربری در مدل AHP در جدول ۵ در بخش نتایج ارائه گردیده است. نتیجه این فرآیند، ایجاد نقشه تناسب مکانی برای هر یک از کلاس های کاربری به جز کاربری رودخانه و منابع آبی (جزء مقادیر ثابت در پیش بینی در نظر گرفته شده است). در محدوده بین صفر تا ۲۵۵ بود که صفر نشانگر نواحی عدم مناسبت برای کاربری مربوطه و ۲۵۵ نشانگر نواحی کاملاً مناسب برای کاربری مربوطه است.

اعتبارسنجی مدل مارکوف با استفاده از آنالیز سه بعدی

پنتیوس و ملیوس

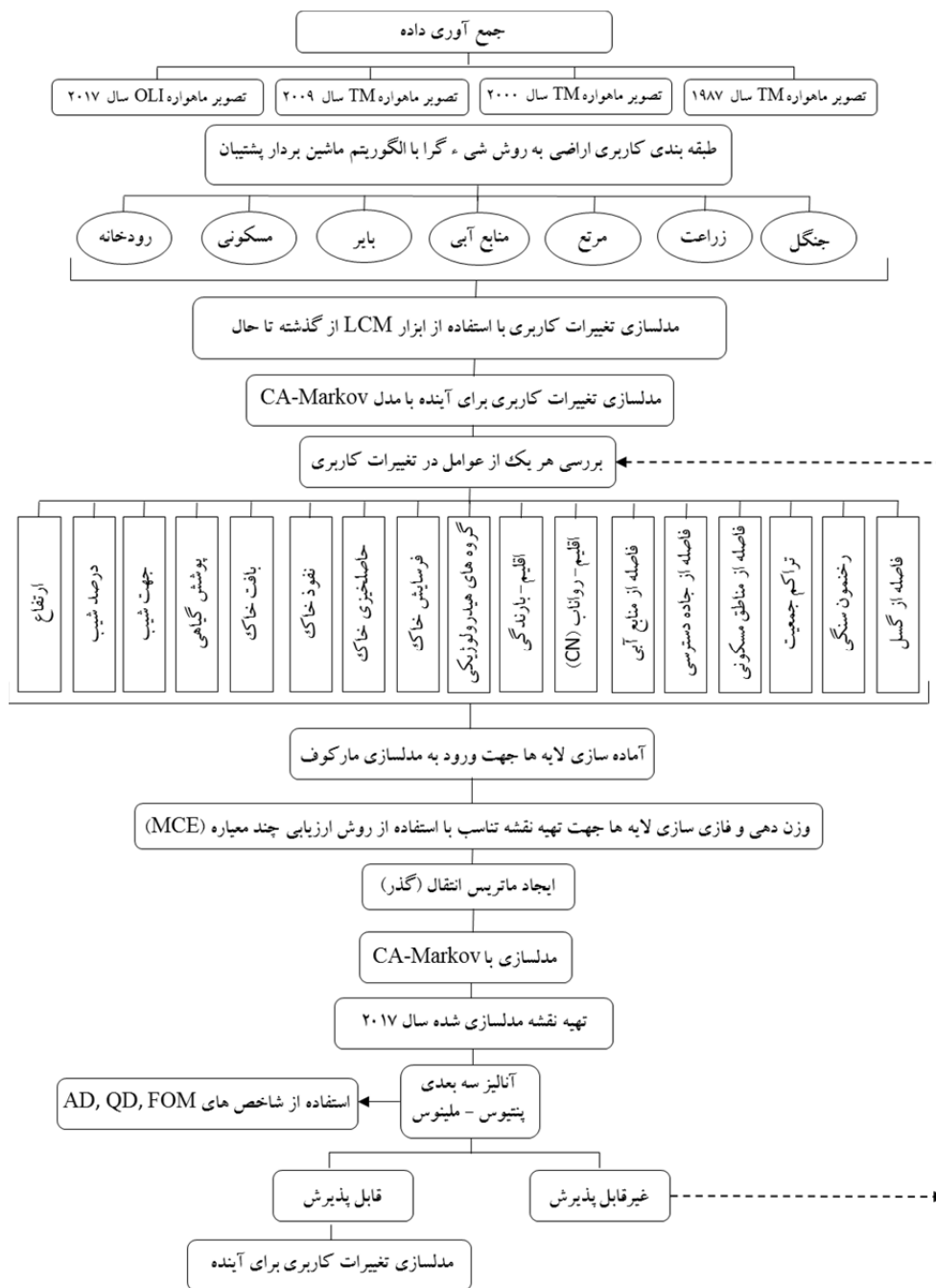
درجه شایستگی (Figure of Merit) یک معیار مناسب در اعتبارسنجی مدل با استفاده از مقایسه سه نقشه است. FOM در واقع شاخصی است که اختلاف های کمی (Quantity disagreement) و اختلاف های مکانی (Allocation disagreement) را باهم ترکیب می کند. FOM قابلیت بیان میزان اختلاف ها را به صورت مجزا ندارد، به عنوان مثال نمی تواند بیان کند که چه مقدار از تغییرات شبیه سازی شده با تغییرات موجود در نقشه مرجع همخوانی دارد و همچنین این شاخص نمی تواند میزان اختلاف های کمی و اختلاف های مکانی را باهم مقایسه کند. لذا در این تحقیق نحوه محاسبه و تفسیر هر یک از مؤلفه های FOM بر اساس مقادیر QD و AD

بیانگر این است که کاربری از آخرین سال مشاهده‌ای به سال مرجع تغییر کرده و عمل شبیه‌سازی به‌درستی این تغییر را پیش‌بینی کرده است. A-B-A بیانگر این است که کاربری از آخرین سال مشاهده‌ای به سال مرجع تغییر کرده ولی عمل شبیه‌سازی به‌اشتباه کاربری سال شبیه‌سازی شده را بدون تغییر پیش‌بینی کرده است. در نهایت میزان مساحت هر یک از این حالات وارد ماکرو اکسلی پنتیوس - ملینوس می‌شود و مقدار خطای مکانی (AD)، خطای کمی (QD) و درجه شایستگی (FOM) را محاسبه و اعتبارسنجی سه‌بعدی را به‌صورت نمودار و نقشه در اختیار کاربر قرار می‌دهد (۲۳ و ۳۴).

در شکل ۲ مراحل انجام تحقیق نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، پنج مرحله، طبقه‌بندی کاربری اراضی، مدل‌سازی تغییرات کاربری با استفاده از ابزار LCM، تهیه نقشه‌های تناسب با استفاده از روش ارزیابی چندمعیاره (MCE)، پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی آینده با مدل CA-Markov و آنالیز سه‌بعدی پنتیوس و ملینوس در فرآیند کالیبراسیون انجام شد.

$$FOM = B / (A + B + C + D) \quad [8]$$

در این رابطه؛ A منطقه‌ای از خطا با توجه به تغییر مشاهده‌شده در شبیه‌سازی است که به‌عنوان منطقه پایدار است، B منطقه‌ای درست با توجه به تغییر مشاهده‌شده در شبیه‌سازی است که به‌عنوان منطقه تغییر است، C منطقه‌ای از خطا به علت تغییر مشاهده‌شده در شبیه‌سازی به‌عنوان تغییر به طبقه اشتباه است و D منطقه‌ای از خطا که با توجه به پایداری مشاهده‌شده به‌عنوان تغییر قلمداد شده است (۲۳ و ۲۴). در اعتبارسنجی سه‌بعدی پنتیوس و ملینوس پنج حالت وجود دارد که A، B و C سه کاربری متفاوت در سه دوره، کاربری آخرین سال مشاهده‌ای، سال مرجع و سال شبیه‌سازی شده است. A-A-A بیانگر این است که کاربری در سه دوره آخرین سال مشاهده‌ای، سال مرجع و سال شبیه‌سازی شده مشابه است. A-B بیانگر این است که کاربری در آخرین سال مشاهده‌ای و سال مرجع یکسان است اما عمل شبیه‌سازی شده به‌اشتباه کاربری را تغییر داده است. A-B-C بیانگر این است که کاربری در آخرین سال مشاهده‌ای به سال مرجع تغییر کرده است و شبیه‌سازی این تغییر را به‌اشتباه پیش‌بینی کرده است. A-B-B



شکل ۲. نمودار جریانی مراحل مختلف انجام پژوهش

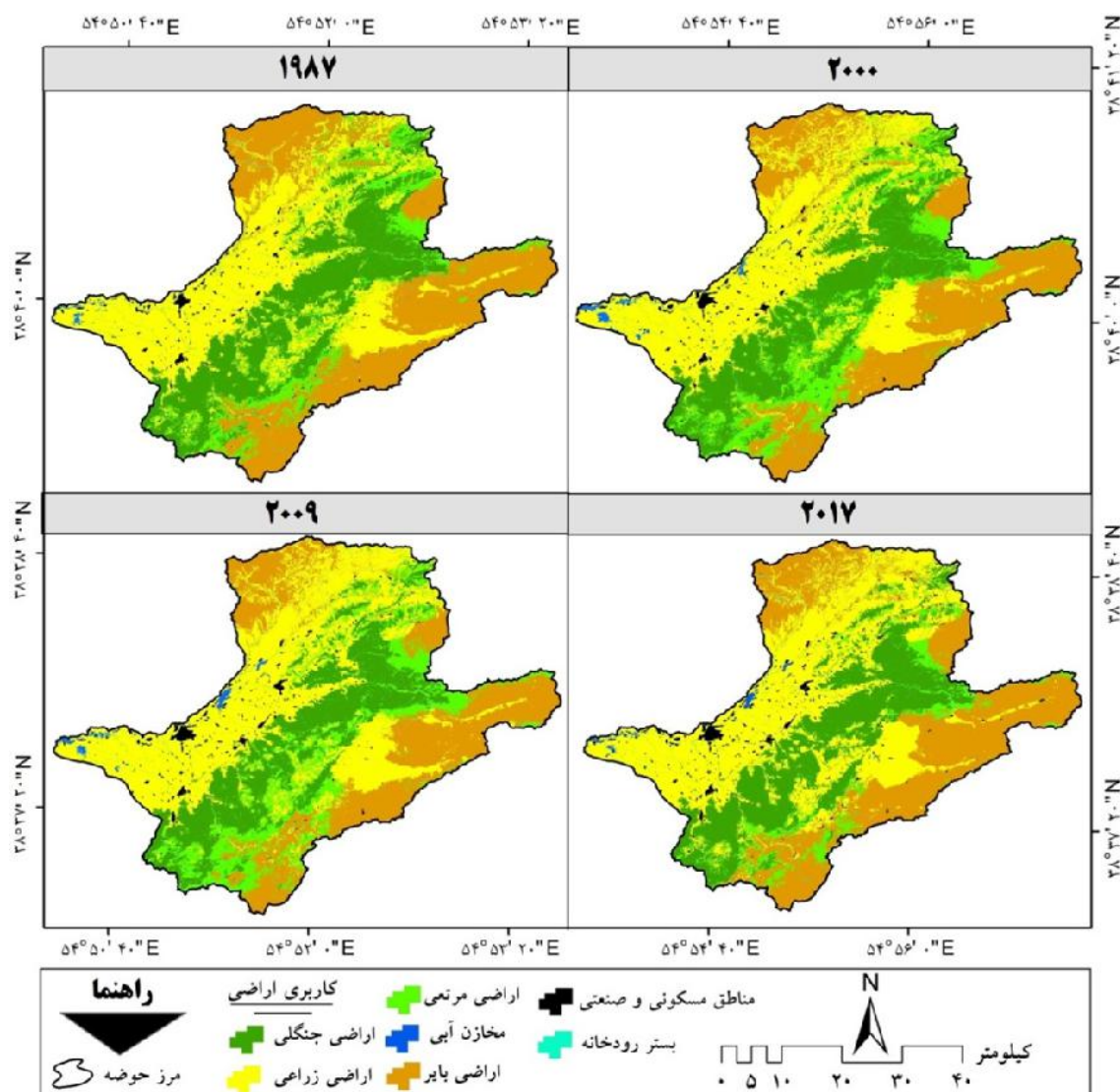
Fig 2. Diagram of different stages of research

استفاده شد. در شکل ۳ نتایج حاصل از کلاسه بندی کاربری اراضی بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با مقیاس SL50 برای چهار دوره مطالعاتی ۱۹۸۷، ۲۰۰۰، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ نشان داده شده است.

نتایج

طبقه بندی تصاویر

در این تحقیق به منظور آشکارسازی و طبقه بندی کلاس های کاربری اراضی در طی دوره مطالعاتی ۱۹۸۷-۲۰۱۷ از طبقه بندی شیء گرای با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان



شکل ۳. کلاسه‌بندی کاربری اراضی بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در طول دوره مطالعاتی

Fig 3. Land use classification based on support vector machine algorithm during the study period

ارزیابی صحت طبقه‌بندی

در جدول ۲ پارامترهای ارزیابی صحت شامل دقت کلی، صحت کاربری، صحت تولیدکننده، ضریب کاپا برای هر کلاس کاربری اراضی بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با مقیاس SL50 برای کل دوره‌های مطالعاتی آورده شده است. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی کاربری اراضی به روش شیء‌گرا بیشترین میزان خطای اضافه و خطای حذف به ترتیب با ۱۹/۱۲ و ۱۸/۵۵

درصد در اراضی مرتعی و اراضی زراعی در نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۹ است. پایین‌ترین صحت تولیدکننده به میزان ۷۱/۴۹ درصد مربوط به کلاس کاربری اراضی مرتعی در نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۹ و پایین‌ترین صحت کاربری به میزان ۷۱/۴۵ درصد مربوط به کلاس کاربری اراضی زراعی در نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۷ است. بر اساس این جدول دقت کلی و ضریب کاپا در هر چهار دوره، بالای ۸۵ درصد و قابل قبول است.

جدول ۲. پارامترهای خطا و صحت برای هر یک از کاربری‌ها بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در روش طبقه‌بندی شیء گرا

Table 2. Error and accuracy parameters for each land use based on the support vector machine algorithm in the object-oriented classification method

Land use classes طبقات کاربری اراضی							Error parameters پارامترهای خطا
۲۰۱۷							
اراضی زراعی Croplands	اراضی بایر Barren Land	اراضی جنگلی Forestlands	مناطق مسکونی Residential	اراضی مرتعی Rangeland	مخازن آبی Water	رودخانه River	کاربری اراضی Land use
۱۲/۸۸	۱۷/۵۷	۲/۵۵	۱/۵۹	۱۴/۸۷	۶/۹۰	۲/۴۵	خطای اضافه (%) Commission error
۱۰/۷۸	۱۹/۱۲	۰/۵۶	۱۰/۳۱	۱۱/۵۶	۲/۱۳	۳/۵۴	خطای حذف (%) Omission error
۸۷/۲۲	۷۶/۲۲	۹۹/۴۴	۸۳/۸۷	۸۳/۸۸	۸۹/۶۹	۹۱/۲۵	صحت تولیدکننده (%) Producer accuracy
۷۱/۴۵	۸۷/۱۲	۹۵/۱۳	۷۳/۱۰	۷۲/۴۳	۹۹/۴۱	۹۵/۲۷	صحت کاربر (%) User accuracy
۹۲/۶۵							دقت کلی (%) Overall accuracy
۰/۹۱							ضریب کاپا Kappa coefficient
۲۰۰۹							
۱۸/۵۵	۱۲/۸۸	۴/۸۷	۶/۹۰	۱۷/۵۷	۰/۵۹	۱/۲۵	خطای اضافه (%) Commission error
۸/۷۸	۱۰/۷۸	۰/۵۶	۸/۱۳	۱۹/۱۲	۶/۳۱	۴/۲۸	خطای حذف (%) Omission error
۸۷/۵۶	۹۲/۸۱	۹۷/۴۲	۷۱/۴۹	۸۱/۴۷	۹۸/۸۳	۹۰/۵۶	صحت تولیدکننده (%) Producer accuracy
۸۶/۶۸	۷۵/۶۴	۹۸/۱۹	۸۱/۲۶	۸۰/۶۴	۹۲/۷۸	۹۳/۴۱	صحت کاربر (%) User accuracy
۹۲/۲۶							دقت کلی (%) Overall accuracy
۰/۸۹							ضریب کاپا Kappa coefficient
۲۰۰۰							
۶/۶۸	۳/۹۴	۲/۳۴	۷/۲۴	۹/۵۶	۸/۵۹	۸/۶۵	خطای اضافه (%) Commission error
۵/۲۴	۱/۷۰	۰/۴۲	۸/۵۸	۴/۶۸	۰/۶۷	۷/۳۷	خطای حذف (%) Omission error
۸۹/۷۶	۹۸/۳۰	۹۹/۵۸	۸۴/۶۵	۸۵/۳۲	۹۹/۳۳	۸۹/۶۵	صحت تولیدکننده (%) Producer accuracy
۸۹/۳۲	۹۶/۰۶	۹۷/۶۶	۸۶/۷۶	۹۰/۴۴	۹۱/۴۱	۸۸/۶۵	صحت کاربر (%) User accuracy
۹۵/۱۲							دقت کلی (%) Overall accuracy
۰/۹۳							ضریب کاپا Kappa coefficient
۱۹۸۷							
۸/۷۸	۳/۴۸	۲/۳۲	۸/۵۷	۱۰/۰۴	۱۵/۴۵	۱۰/۳۲	خطای اضافه (%) Commission error
۵/۵۰	۴/۷۹	۰/۳۰	۸/۲۴	۱۲/۶۳	۱۲/۸۶	۹/۴۷	خطای حذف (%) Omission error
۹۴/۵۰	۹۵/۲۱	۹۹/۷۰	۸۸/۷۶	۸۷/۳۷	۷۴/۱۴	۸۲/۳۵	صحت تولیدکننده (%) Producer accuracy
۹۱/۲۲	۹۶/۵۲	۹۷/۶۸	۹۱/۴۳	۸۹/۹۶	۸۴/۵۵	۸۵/۴۱	صحت کاربر (%) User accuracy
۹۲/۱۹							دقت کلی (%) Overall accuracy
۰/۸۸							ضریب کاپا Kappa coefficient

تغییرات کاربری اراضی با ابزار LCM

پس از تهیه نقشه کاربری اراضی بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در روش طبقه‌بندی شیء گرا برای ۴ دوره

مطالعاتی، مساحت کلاس‌های کاربری از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ استخراج شد تا تبدیل و تغییرات آن‌ها از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ مشخص شود که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

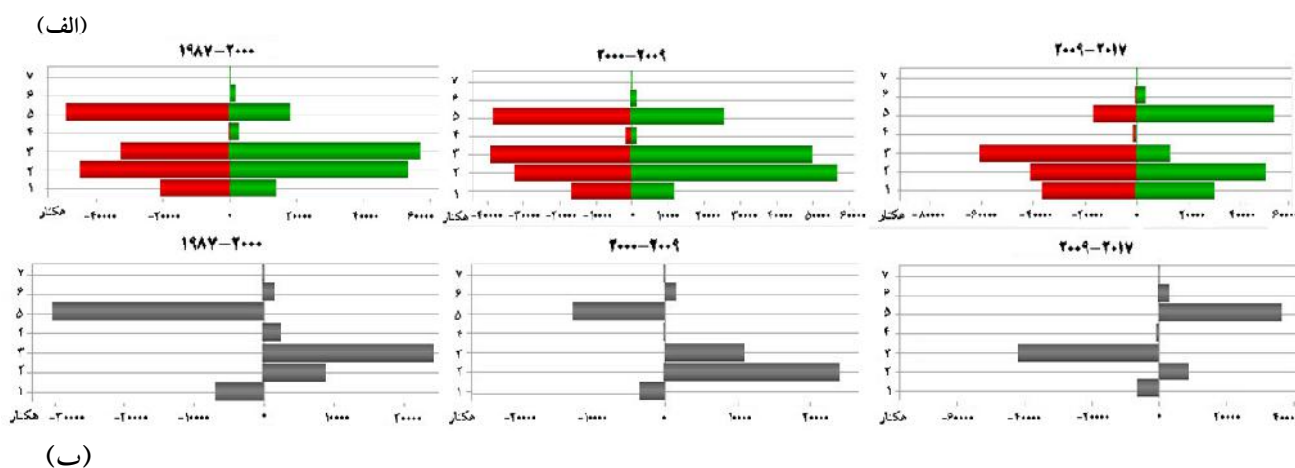
جدول ۳. مساحت کلاس‌های کاربری اراضی استخراج شده با استفاده از ابزار LCM در طی سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۸۷

Table 3. Area of land use classes extracted using LCM tools during 2017-2017

۱۹۸۷		۲۰۰۰		۲۰۰۹		۲۰۱۷		کاربری اراضی Land use
مساحت (۱۰۰۰ هکتار)	مساحت (%)	مساحت (۱۰۰۰ هکتار)	مساحت (%)	مساحت (۱۰۰۰ هکتار)	مساحت (%)	مساحت (۱۰۰۰ هکتار)	مساحت (%)	
۱۸۹/۵	۲۳/۹	۱۸۶/۵	۲۳/۶	۱۸۴/۱	۲۳/۳	۱۸۲/۱	۲۳/۰	Forestlands اراضی جنگلی
۲۷۰/۹	۳۴/۲	۲۷۹/۸	۳۵/۴	۳۰۴/۱	۳۸/۴	۳۱۳/۰	۳۹/۵	Croplands اراضی زراعی
۸۲/۵	۱۰/۴	۱۰۲/۹	۱۳/۰	۹۲/۳	۱۱/۷	۴۶/۷	۵/۹	Rangeland اراضی مرتعی
۱/۵	۰/۲	۴/۰	۰/۵	۳/۸	۰/۵	۳/۰	۰/۴	Water مخازن آبی
۲۳۱/۱	۲۹/۲	۲۰۰/۷	۲۵/۴	۱۸۸/۱	۲۳/۸	۲۲۴/۵	۲۸/۴	Barrenland اراضی بایر
۸/۰	۱/۰	۹/۷	۱/۲	۱۱/۳	۱/۴	۱۴/۴	۱/۸	Residential مناطق مسکونی
۸/۱	۱/۰	۷/۹	۱/۰	۷/۸	۱/۰	۷/۸	۱/۰	River رودخانه

۴۵۲۶۹ هکتار کاهش یافته است و اراضی زراعی، بایر و مسکونی به ترتیب به مقدار ۸۸۹۸، ۳۶۴۳۱ و ۳۱۰۶ هکتار افزایش یافته است. در دوره ۳۰ ساله از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، بیشترین تغییر مثبت مربوط به افزایش کاربری اراضی زراعی و در تغییرات منفی مربوط به کاهش کاربری اراضی جنگلی و مرتعی در طول دوره موردنظر است. بیشترین کاهش اراضی جنگلی با ۴/۸ درصد در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۰، بیشترین افزایش اراضی زراعی با ۵/۳ درصد در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۷، بیشترین کاهش اراضی مرتعی با ۹ درصد در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹، بیشترین افزایش اراضی بایر با ۴/۶ درصد در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹ و بیشترین افزایش اراضی مسکونی و صنعتی با ۰/۸ درصد در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۷ رخ داده است.

نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی تهیه شده (شکل ۴) جهت مدل‌سازی و پایش تغییرات کاربری اراضی وارد نرم‌افزار ادریسی شد تا تغییرات کاربری‌ها در سال‌های مورد مطالعه مدل‌سازی گردد. نمودار این مدل تغییرات کل (افزایش و کاهش) و خالص ایجاد شده در شکل ۴ نشان داده شده است. تغییرات خالص کاربری‌ها در شکل ۴ نشان می‌دهد در سال ۱۹۸۷ به ۲۰۰۰ اراضی جنگلی و بایر به ترتیب به مقدار ۲۹۵۶ و ۳۰۳۹۹ هکتار کاهش یافته است و اراضی زراعی، مرتعی و مسکونی به ترتیب به مقدار ۸۹۴۴، ۲۰۳۹۵ و ۱۶۶۹ هکتار افزایش یافته است. در سال ۲۰۰۰ به ۲۰۰۹ اراضی جنگلی و بایر به ترتیب به مقدار ۲۴۲۵ و ۱۲۶۳۵ هکتار کاهش یافته است و اراضی زراعی، مرتعی و مسکونی به ترتیب به مقدار ۲۴۲۳۱، ۱۰۶۰۰ و ۱۶۵۸ هکتار افزایش یافته است. در سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۷ اراضی جنگلی و مرتعی به ترتیب به مقدار ۱۹۶۹ و



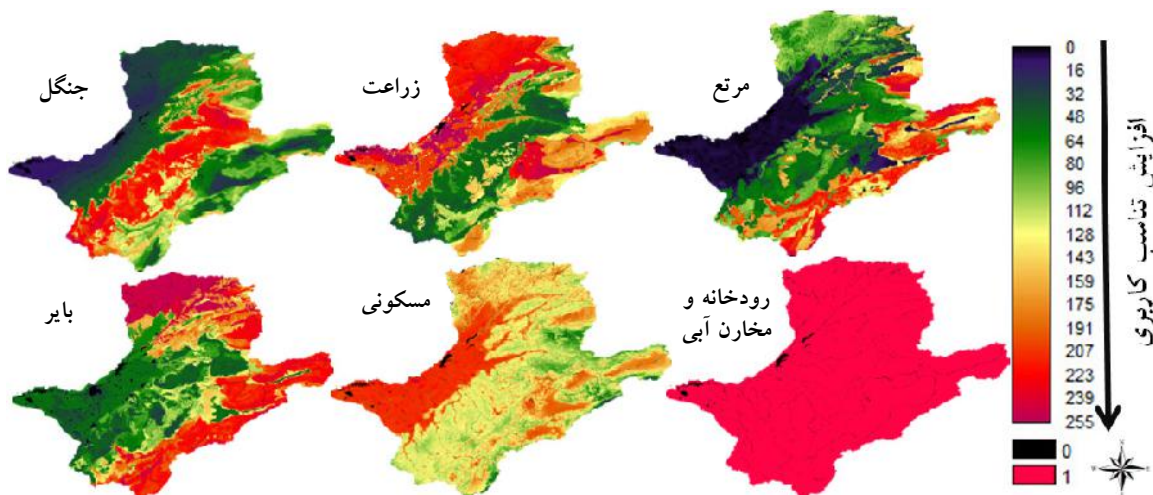
شکل ۴. تغییرات کلاس‌های کاربری اراضی در قالب افزایش و کاهش (الف) و تغییرات خالص (ب) با استفاده از ابزار LCM (۱: اراضی جنگلی، ۲: اراضی زراعی، ۳: اراضی مرتعی، ۴: مخازن آبی، ۵: اراضی بایر، ۶: مناطق مسکونی، ۷: رودخانه)

Fig 4. Land use change in the form of gain and losses (a) and net change (b) using the LCM tool (1: Forestlands, 2: Croplands, 3: Rangelands, 4: Water, 5: Barrenland, 6: Residential, 7: River)

است. بعد از انجام مقایسه زوجی هریک از پارامترهای مؤثر در تناسب کاربری‌ها، نقشه تناسب کاربری تهیه شد. در شکل ۵ نقشه‌های تناسب تهیه‌شده به روش ارزیابی چند معیاره (MCE) برای هر واحد کاربری اراضی نشان داده شده است.

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با مدل مارکوف

به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov در مدل اقدام به مقایسه زوجی هر یک از فاکتورهای مؤثر در تناسب کاربری‌ها شد که وزن نهایی مربوط به هر کاربری در مدل AHP در جدول ۴ ارائه شده



شکل ۵. تناسب اراضی هر یک از واحدهای کاربری اراضی بر اساس روش ارزیابی چند معیاره (MCE) در مدل مارکوف

Fig 5. Land suitability of each land use based on the multi-criteria assessment method (MCE) in Markov model

جدول ۴. وزن نهایی هر یک از کاربری‌های مورد بررسی در ارزیابی چندمعیاره در مدل AHP

Table 4. Final weight of the land use classes in multi-criteria evaluation in AHP model

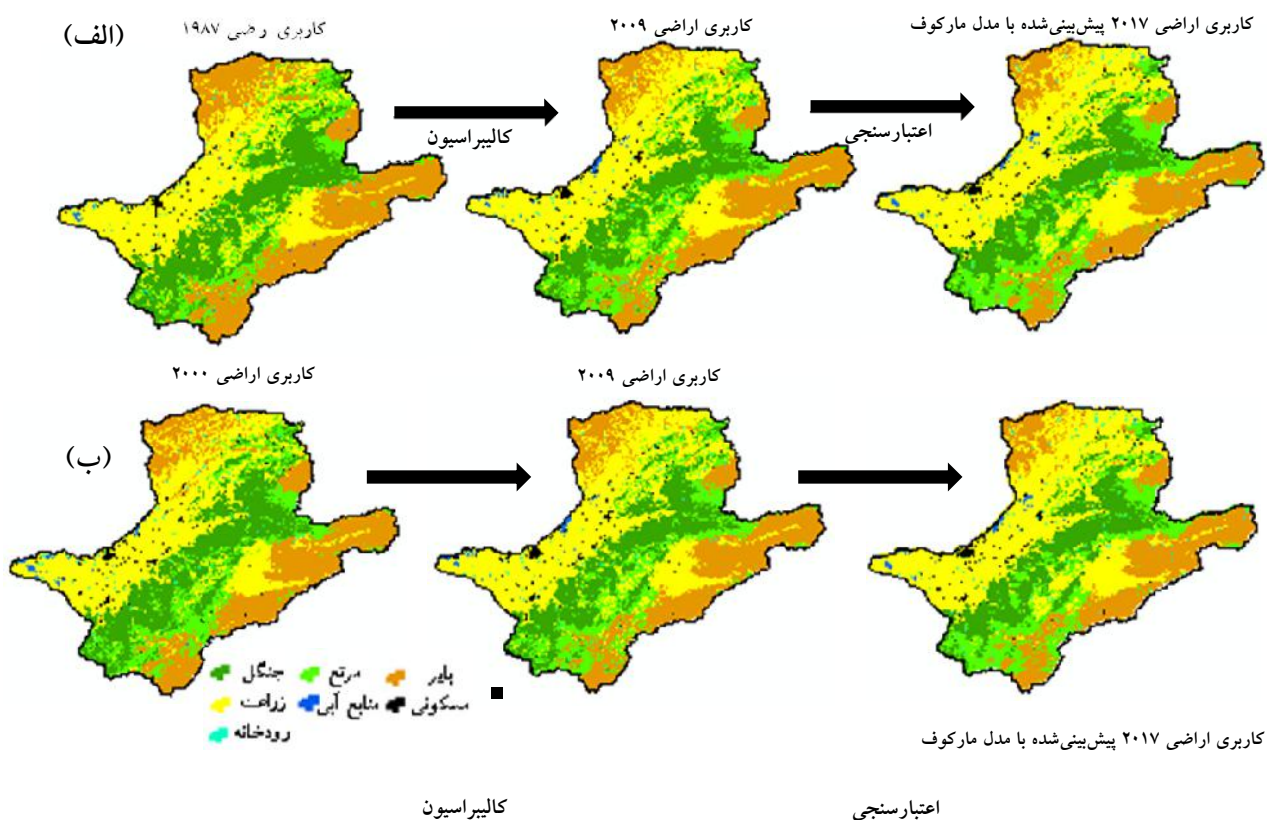
وزن	مسکونی	وزن	بایر	وزن	مرتع	وزن	زارعت	وزن	جنگل
Weight	Residential	Weight	Barrenland	Weight	Rangelands	Weight	Croplands	Weight	Forestlands
۰/۳۱۸۰	شیب Slope	۰/۱۳۰۹	فرسایش خاک Soil erosion	۱	گروه هیدرولوژیکی Hydrologic group	۰/۱۹۴۶	حاصلخیزی خاک Soil fertility	۰/۰۷۲۸	بافت خاک Soil texture
۰/۰۸۵۹	فاصله از شهر Distance from city	۰/۰۷۷۹	گروه هیدرولوژیکی Hydrologic group	۰/۵	شیب Slope	۰/۱۳۳۶	بافت خاک Soil texture	۰/۰۳۶۸	گروه هیدرولوژیکی Hydrologic group
۰/۰۲۸۵	فاصله از گسل Distance from Fault	۰/۰۳۲۱	رخنمون سنگی Rock outcrop	۳	تناسب مرتع Range suitability	۰/۰۵۰۹	رخنمون سنگی Rock outcrop	۰/۰۳۰۰	رخنمون سنگی Rock outcrop
۰/۰۴۱۶	فاصله از رودخانه Distance from river	۰/۰۴۹۳	شیب slope	۰/۲۵	فاصله از جاده Distance from road	۰/۰۹۱۷	شیب slope	۰/۱۸۴۹	بارندگی Pricipitation
۰/۲۱۴۳	فاصله از جاده Distance from road	۰/۲۴۸۸	زمین‌شناسی Geology	۰/۳۳	فاصله از روستا Distance from village	۰/۰۵۲۴	ارتفاع Height	۰/۰۳۹۹	شیب slope
۰/۰۵۹۹	فاصله از روستا Distance from village	۰/۴۶۱۰	تناسب بایر Barren suitability	۰/۰۵	نسبت سازگاری Consistency ratio	۰/۳۳۴۸	تناسب کشاورزی Crop suitability	۰/۱۶۰۷	ارتفاع Height
۰/۱۴۹۹	تراکم جمعیت شهری Urban population density	۰/۰۲	نسبت سازگاری Consistency ratio			۰/۰۱۸۰	فاصله از رودخانه Distance from river	۰/۳۳۴۲	تناسب جنگل Forest suitability
۰/۱۰۱۹	تراکم جمعیت روستایی Urban population density					۰/۰۲۴۷	فاصله از جاده Distance from road	۰/۱۴۰۸	زمین‌شناسی Geology
۰/۰۲	نسبت سازگاری Consistency ratio					۰/۰۳۵۵	فاصله از روستا Distance from village	۰/۰۴	نسبت سازگاری Consistency ratio
						۰/۰۶۳۸	فاصله از منابع آبی Distance from water resource		
						۰/۰۳	نسبت سازگاری Consistency ratio		

حاصل از تغییرات کاربری اراضی برای دوره‌های مطالعاتی، سه وضعیت بررسی شد. در وضعیت اول، دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۰-۱۹۸۷، در وضعیت دوم، دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹-۲۰۰۰ و در

در تحقیق حاضر برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش تلفیق زنجیره‌های مارکوف و سلول‌های خودکار، پس از بررسی صحت و اطمینان از درستی نتایج

وضعیت سوم، دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹-۱۹۸۷ در نظر گرفته شد. در این مرحله با استفاده از ماتریس تبدیل، وضعیت هر یک از دوره‌ها بررسی شد. وضعیت اول به دلیل پایین بودن مقادیر کاپا و خطای استاندارد به ترتیب (۰/۸۵ و ۰/۸۴) از فرآیند مدل‌سازی زنجیره مارکوف حذف گردید و دو وضعیت دوم و سوم بررسی شد. در وضعیت دوم، با استفاده از ماتریس تبدیل، سال ۲۰۰۹-۲۰۰۰ به عنوان دوره کالیبراسیون، سال ۲۰۱۷-۲۰۰۹ به عنوان دوره اعتبارسنجی انتخاب شد و برای سال

۲۰۱۷ تغییرات پوشش زمین پیش‌بینی شد. در وضعیت سوم، با استفاده از ماتریس تبدیل، سال ۱۹۸۷-۲۰۰۹ به عنوان دوره کالیبراسیون، سال ۲۰۱۷-۲۰۰۹ به عنوان دوره اعتبارسنجی انتخاب شد و برای سال ۲۰۱۷ تغییرات پوشش زمین پیش‌بینی شد. در وضعیت دوم، با استفاده از ماتریس تبدیل، سال ۲۰۰۹-۲۰۰۰ به عنوان دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی برای هر دو وضعیت نشان داده شده است.



شکل ۶. کالیبراسیون و اعتبارسنجی در دو حالت در مدل مارکوف (الف: دوره ۱۹۸۷-۲۰۰۹-۲۰۱۷، ب: دوره ۲۰۰۰-۲۰۰۹-۲۰۱۷)

Fig 6. Calibration and validation in two modes in Markov model (A: 1987-2009-2017, B: 2000-2009-2017)

سه بعدی پنتیوس- ملیوس بررسی شد که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس جدول ۵، وضعیت (ب) با انتخاب سال ۲۰۰۹-۲۰۰۰ به عنوان دوره کالیبراسیون، سال ۲۰۱۷-۲۰۰۹ به عنوان دوره اعتبارسنجی بر اساس آنالیز سه بعدی پنتیوس- ملیوس دارای کمترین مقادیر QD و AD (به ترتیب

آنالیز سه بعدی پنتیوس- ملیوس تغییرات کاربری اراضی با مدل مارکوف

نتایج به دست آمده از پیش‌بینی برای کاربری اراضی سال ۲۰۱۷ برای هر دو وضعیت (الف) و (ب) با داده‌های واقعی کاربری اراضی طبقه‌بندی شده سال ۲۰۱۷، با استفاده از آنالیز

پذیرش ماتریس احتمال انتقال تولیدشده برای نقشه پیش‌بینی کاربری برای دوره زمانی بعدی انتخاب شد. برابر ۳/۷۵ و ۵/۲۳، بیشترین مقدار FOM (۸/۵۲)، بیشترین مقدار کاپا (۸۹/۱۱) است. در فرآیند مدل‌سازی ترکیب زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار، دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹-۲۰۰۰ با

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی برای هر واحد کلاس کاربری اراضی و کل کاربری اراضی در مدل زنجیره مارکوف

Table 5. Validation results for each unit of land use class and total land use in Markov chain model

ضریب ضربه	درجه شایستگی (FOM)	اختلاف مکانی (AD)	اختلاف کمی (QD)	ضریب افزایشی (Gain)	ضریب ثابت (Persistence)	ضریب کاهشی (Loss)	کاربری اراضی (LULC)
	۷۷/۵۴	۳/۰۵	۲/۹۶	۲/۲۰	۱۹/۵۵	۳/۴۶	Forestlands اراضی جنگلی
	۶۸/۰۴	۳/۶۲	۲/۴۶	۴/۲۶	۲۹/۸۰	۹/۷۳	Croplands اراضی زراعی
	۵۲/۹۹	۳/۱۳	۱/۴۰	۱/۸۳	۱/۷۰	۴/۲۰	Rangelands اراضی مرتعی
۷۷/۸۸	۸۷/۶۵	۰/۵۷	۱/۵۸	۰/۶۸	۰/۳۸	۰/۴۵	Water مخازن آبی
	۶۹/۵۱	۱/۹۰	۵/۷۰	۹/۳۵	۲۶/۲۱	۲/۱۵	Barrelands اراضی بایر
	۵۳/۳۳	۱/۸۱	۱/۲۰	۲/۶۹	۱/۰۶	۰/۷۸	Residential مناطق مسکونی
	۸۸/۳۷	۱/۱۴	۲/۱۴	۰/۷۸	۰/۹۹	۰/۸۵	River رودخانه
	۵/۱۵	۱۰/۱۱	۸/۶۴	۱۱/۵۷	۲۵/۸۷	۱۲/۵۲	Total کل
	۸۵/۷۸	۱/۹۴	۱/۶۷	۲/۸۵	۲۰/۶۳	۲/۳۸	Forestlands اراضی جنگلی
	۷۸/۳۷	۱/۳۷	۱/۲۵	۳/۵۰	۳۳/۷۲	۱/۸۱	Croplands اراضی زراعی
	۶۳/۹۴	۲/۸۲	۱/۳۵	۱/۵۶	۱۵/۷۱	۲/۱۸	Rangelands اراضی مرتعی
۸۹/۱۱	۹۱/۴۵	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۰۱	۱/۳۸	۰/۲۷	Water مخازن آبی
	۶۷/۸۴	۱/۷۱	۱/۴۱	۴/۰۸	۲۶/۰۳	۲/۳۳	Barrelands اراضی بایر
	۶۵/۵۸	۰/۵۴	۱/۵۳	۲/۰۴	۱۱/۵۰	۰/۳۴	Residential مناطق مسکونی
	۹۳/۴۵	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۰۱۴	River رودخانه
	۸/۵۲	۵/۲۳	۳/۷۵	۸/۷۳	۸۹/۸۶	۹/۱۶	Total کل

۱۹۸۷-۲۰۰۰-۲۰۱۷

۲۰۰۰-۲۰۰۹-۲۰۱۷

(A-B-A) و (A-A-B) و شبیه‌سازی تغییر به صورت ثابت ماندن (A-B-A) به ترتیب برابر ۱/۴۱ درصد و ۵/۳۹ درصد است. لذا در فرآیند مارکوف، مقادیر تداوم صحیح شبیه‌سازی شده معادل ۸۹/۹۴ درصد از کل تغییرات کاربری است. مدل مارکوف قادر به شبیه‌سازی صحیح تغییرات (A-A-B) به میزان ۲/۲۰ درصد بود. در فرآیند مارکوف تغییرات شبیه‌سازی شده و مشاهده شده بر اساس شاخص‌های پنتیوس- ملیوس معادل ۴/۶۸ و ۸/۶۵ درصد محاسبه گردید.

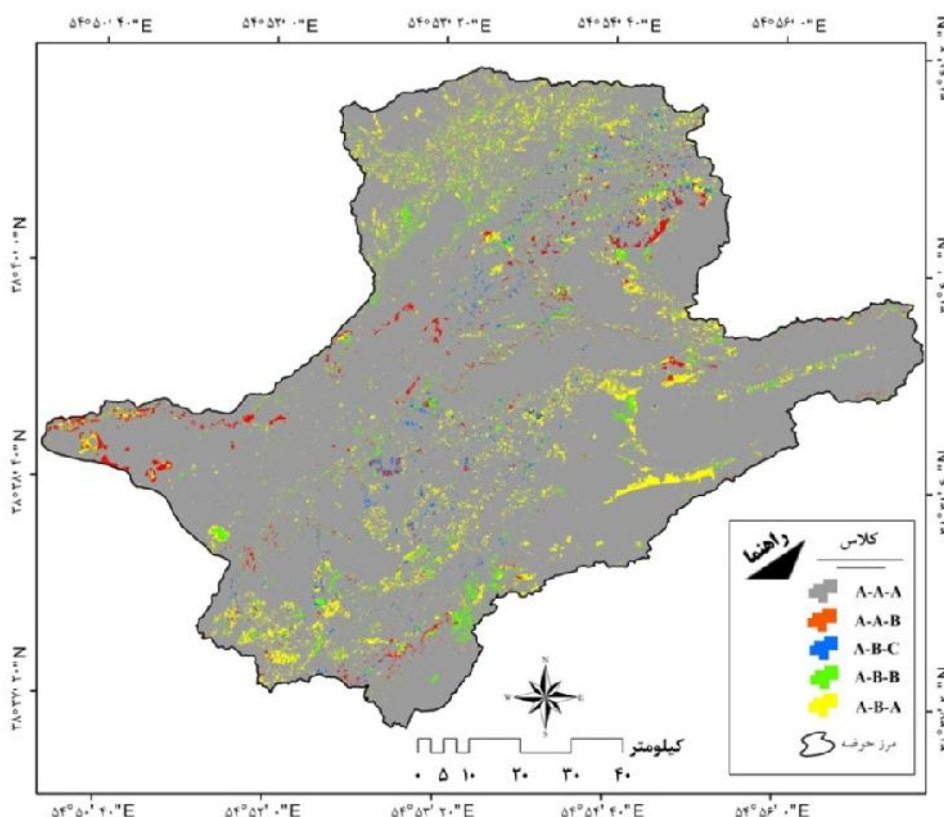
نتایج حاصل از آنالیز سه بعدی پنتیوس- ملیوس در اعتبارسنجی فرآیند مارکوف به منظور پیش‌بینی کاربری اراضی دوره بعدی (سال ۲۰۳۵) در فرآیند مدل‌سازی زنجیره مارکوف در جدول ۶ نشان داده شده است. در این مرحله پنج حالت A-A، A-A-B، A-B-C، A-B-B و A-B-A برای سه نقشه سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۷ پیش‌بینی شده بررسی شد که نتایج آن در جدول ۶ ارائه گردیده است. بر اساس جدول ۶ و شکل ۷ مقادیر تغییر در شبیه‌سازی شده

جدول ۶. نتایج آنالیز سه بعدی پنتیوس- ملیوس در اعتبارسنجی فرآیند مارکوف در دوره ۲۰۰۰-۲۰۰۹-۲۰۱۷

Table 6. Results of three-dimensional analysis of Pentius-Melius in validation the Markov process in the period 2000-2009-2000

درصد	Component	حالت
۸۹/۹۴	Persistence simulated correctly (A-A-A)	تداوم صحیح شبیه سازی (A-A-A)
۱/۴۱	Persistence simulated as change (A-A-B)	تغییر در شبیه سازی شده (A-A-B)
۱/۰۶	Change simulated as change to wrong category (A-B-C)	شبیه سازی تغییر کاربری به اشتباه (A-B-C)
۲/۲۰	Change simulated correctly (A-B-B)	تغییر به درستی شبیه سازی شده (A-B-B)
۵/۳۹	Change simulated as persistence (A-B-A)	شبیه سازی تغییر به صورت ثابت ماندن (A-B-A)
۱۰۰	Total	جمع
۴/۶۸	Simulated change	تغییرات شبیه سازی شده
۸/۶۵	Observed change	تغییرات مشاهده شده

در شکل ۷ مقادیر پنج حالت A-A-A، A-A-B، A-B-C، A-B-B و A-B-A در آنالیز سه بعدی پنتیوس و ملیوس برای سه نقشه سال های ۲۰۰۹، ۲۰۱۷، شبیه سازی شده و ۲۰۱۷ پیش بینی شده نشان داده شده است.



شکل ۷. پنج حالت A-A-A، A-A-B، A-B-C، A-B-B و A-B-A در آنالیز سه بعدی پنتیوس و ملیوس در اعتبارسنجی مدل مارکوف
Fig 7. Five modes A-A-A, A-A-B, A-B-C, A-B-B, and A-B-A in the three-dimensional analysis of Pentium and Melinos in Markov model validation.

کاربری اراضی دوره اول و ستون نشان‌دهنده کاربری اراضی در دوره دوم است. در جداول ۷ و ۸ احتمال اینکه هر نوع کاربری اراضی در هر موقعیت مکانی در آینده پیدا شود را بیان می‌کند. در این تحقیق به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، از جدول مساحت انتقال یافته و تصویر پیش‌بینی سال ۲۰۱۷ استفاده شد. در شکل ۹ نقشه پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۱۷ با استفاده از مدل تلفیقی سلول خودکار و زنجیره مارکوف نشان داده شده است.

بعد از اعتبارسنجی تغییرات کاربری اراضی پیش‌بینی شده در مدل زنجیره مارکوف، بر اساس تحلیل ۵ حالت موجود در آنالیز سه‌بعدی پنتیوس و ملینوس، مدل زنجیره مارکوف با پیش‌بینی صحیح شبیه‌سازی ۸۹/۹۲ درصد، نشان از کارایی بالای مدل زنجیره مارکوف در فرآیند شبیه‌سازی بود. بعد از اجرای تحلیل زنجیره مارکوف بر روی نقشه کاربری اراضی به دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، یک ماتریس احتمال انتقال (جدول ۷) و ماتریس مساحت انتقال یافته (جدول ۸) ایجاد شد. در هر دو جدول زیر، ردیف نشان‌دهنده

جدول ۷. ماتریس احتمال انتقال دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹-۲۰۰۰

Table 7. Transfer probability matrix period 2000-2009-2017

رودخانه River	مناطق مسکونی Residential	اراضی بایر Barrelands	مخازن آبی Water	اراضی مرتعی Rangelands	اراضی زراعی Croplands	اراضی جنگلی Forestlands	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۴۷	۰/۰۳۸۱	۰/۸۳۷۱	اراضی جنگلی Forestlands
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۴۵۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۳۹۲	۰/۸۹۴۳	۰/۰۱۰۵	اراضی زراعی Croplands
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۷	۰/۰۹۸۱	۰/۰۰۰۰	۰/۶۶۲۰	۰/۱۹۱۸	۰/۰۴۷۴	اراضی مرتعی Rangelands
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۶۱۴۹	۰/۰۰۰۰	۰/۳۸۵۱	۰/۰۰۰۰	مخازن آبی Water
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۸۲۶۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۶۲۸	۰/۱۱۰۱	۰/۰۰۰۲	اراضی بایر Barrelands
۰/۰۰۰۰	۰/۹۸۲۷	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۷	۰/۰۱۴۸	۰/۰۰۰۳	مناطق مسکونی Residential
۰/۹۹۰۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۰۰	رودخانه River

جدول ۸. ماتریس مساحت انتقال یافته دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۹-۲۰۰۰

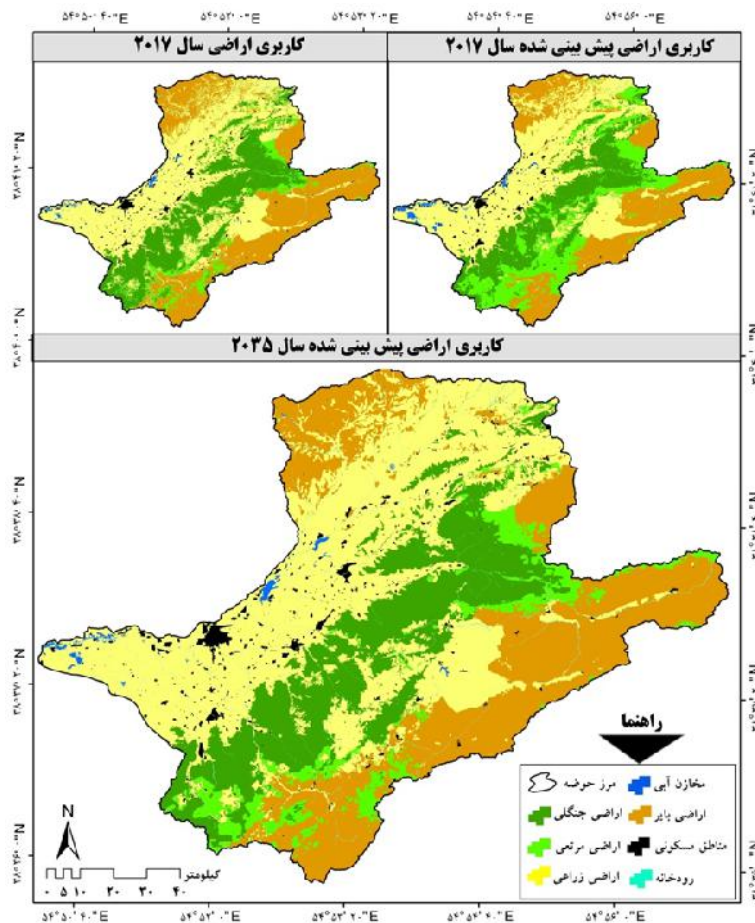
Table 8. Transfer area matrix period 2000-2009-2017

رودخانه River	مناطق مسکونی Residential	اراضی بایر Barrelands	مخازن آبی Water	اراضی مرتعی Rangelands	اراضی زراعی Croplands	اراضی جنگلی Forestlands	
۰	۱۸۵	۰	۰	۲۱۹۳۵۵	۶۶۹۶۹	۱۴۷۲۲۳۱	اراضی جنگلی Forestlands
۰	۱۸۵۰۵	۱۵۳۷۳۵	۱۶۵۳۹	۱۳۲۱۶۳	۳۰۱۳۶۵۷	۳۵۲۴۹	اراضی زراعی Croplands
۰	۹۷۳	۱۲۸۱۰۱	۰	۸۶۴۰۴۷	۲۵۰۲۹۸	۶۱۸۵۴	اراضی مرتعی Rangelands
۰	۰	۰	۲۵۸۸۷	۰	۱۶۲۱۳	۰	مخازن آبی Water
۰	۴۸	۱۷۱۹۱۷۳	۰	۱۳۰۵۴۶	۲۲۸۹۹۸	۳۲۸	اراضی بایر Barrelands
۰	۱۲۳۶۴۷	۲۰۰	۰	۸۵	۱۸۵۸	۳۷	مناطق مسکونی Residential
۸۶۱۵۷	۰	۰	۹۴	۰	۶۹۴	۰	رودخانه River

به منظور پیش بینی تغییرات کاربری اراضی سال ۲۰۳۵ اجرا شد (شکل ۸).

مطابق شکل ۸ از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۳۵ عمده تغییرات مربوط به کاهش و وسعت اراضی جنگلی و بایر به ترتیب به میزان ۱۶۹۶۶ و ۶۹۶۱ هکتار است و در مقابل این کاهش کاربری، افزایش وسعت اراضی زراعی، مرتعی و مسکونی به میزان ۲۰۳۹۷، ۳۹۱۳ و ۳۸۲۵ هکتار مشاهده خواهد شد. تغییرات چشمگیر افزایش وسعت اراضی زراعی و کاهش وسعت اراضی جنگلی در این دوره پیش بینی می شود. این تغییرات بیانگر روند تغییرات اراضی جنگلی به سمت اراضی مرتعی و زراعی و تغییرات اراضی بایر به سمت اراضی زراعی، مرتعی و مسکونی است.

ضریب کاپای حاصل از ماتریس خطا بین نقشه به دست آمده از مدل سازی مارکوف و نقشه کاربری اراضی به دست آمده از تصویر لندست سال ۲۰۱۷، ۹۱/۱۵ درصد به دست آمد. برای ایجاد سناریوی تغییرات کاربری اراضی آینده در سال ۲۰۳۵، بر اساس تغییرات رخ داده در دوره دوم، مدل مارکوف بر روی نقشه های کاربری اراضی سال های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ اجرا شد. در فرآیند مدل سازی تلفیقی سلول خودکار و زنجیره مارکوف، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۷ حاصل از مدل سازی مارکوف با نقشه کاربری اراضی به دست آمده از تصویر لندست سال ۲۰۱۷ از طبقه بندی شیء گرا بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به عنوان نقشه مرجع و با استفاده از ماتریس مساحت انتقال یافته دوره ۲۰۱۷ - ۲۰۰۹ - ۲۰۰۰



شکل ۸. نقشه پیش بینی تغییرات کاربری اراضی سال ۲۰۳۵ با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف

Figure 8. Map of the predicting land use changes for 2035 using the Cellular Automata- Markov Chain Model

بحث و نتیجه گیری

معماریان و همکاران (۲۰)، پنتیوس و ملینوس (۲۳)، پنتیوس و همکاران (۲۴)، و وارگا و همکاران (۳۴) همخوانی داشت. نتایج تغییرات کاربری اراضی مطالعه شده با استفاده از ابزار LCM و مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف در طی دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۳۵ بیانگر تخریب بیش از ۲۴۳۰۹ هکتار از اراضی جنگلی و ۳۱۹۲۱ هکتار از اراضی مرتعی و افزایش زراعت در حوزه به مساحت ۶۲۴۲۱ هکتار است که بیانگر دخالت‌های انسانی و جنگل‌تراشی‌های پیش رو در این حوزه است.

References

1. Al-sharif AAA, Pradhan B. 2014. Monitoring and predicting land use change in Tripoli Metropolitan City using an integrated Markov chain and cellular automata models in GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(10): 4291-4301. doi:10.1007/s12517-013-1119-7.
2. Anand J, Gosain AK, Khosa R. 2018. Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. *Science of The Total Environment*, 644: 503-519. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.01.
3. Araya YH, Cabral P. 2010. Analysis and modeling of urban land cover change in Setúbal and Sesimbra, Portugal. *Remote Sensing*, 2(6): 1549-1563. doi:https://doi.org/10.3390/rs2061549.
4. Arsanjani JJ, Helbich M, Kainz W, Darvishi Bolorani A. 2013. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 265-275. doi:https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.014.
5. Askarizadeh D, Arzani H, Jafary M, Bazrafshan J, Prentice I. 2018. Surveying of the past, present and future of vegetation changes in the central Alborz ranges in relation to climate change. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9(32): 1-18. (In Persian)
6. Beygi Heidarlou H, Banj Shafiei A, Erfanian M, Tayyebi A, Alijanpour A. 2019. Effects of preservation policy on land use changes in Iranian Northern Zagros forests. *Land Use Policy*, 81: 76-90. doi:https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.036.
7. Clancy D, Tanner JE, McWilliam S, Spencer M. 2010. Quantifying parameter uncertainty in a coral

آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از ابزار LCM برای دوره سی‌ساله ۲۰۱۷ - ۱۹۸۷ در حوزه آبخیز گرگان‌رود نشان داد که کاربری جنگل، زراعت و نواحی مسکونی در طی این دوره در این منطقه تغییرات چشمگیری داشته است. نتایج حاصل از پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در طی هجده سال آینده با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف نیز در ادامه تغییرات آشکار شده با ابزار LCM نشانگر این واقعیت است که در طی سالیان آتی با پدیده جنگل‌زدایی شدید در این حوزه روبه‌رو خواهیم بود. بررسی نتایج حاصل از اجرای مدل شبکه‌سازی کاربری آینده با استفاده از تخمینگر انتقال مارکوف نشان داد که می‌توان تغییرات کاربری آینده را با توجه به شرایط محیطی موجود پیش‌بینی کرد که نشان‌دهنده این است که در حوزه آبخیز گرگان‌رود در طی هجده سال آینده زراعت به شدت در این منطقه افزایش خواهد داشت لذا باید با مدیریت بلندمدت و جامع، منابع آب‌و خاک حفظ کرد و تا حد امکان مانع از تخریب این منابع ارزشمند شد.

نتایج این تحقیق در بخش مدل‌سازی بیانگر کارایی مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف در شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی حوزه‌های آبخیز به‌روش تحلیل سه‌بعدی به‌منظور مدیریت منابع طبیعی است که با نتایج حاصل از تحقیقات انجام‌شده توسط بیگی حیدرلو و همکاران (۶)، کیلی و همکاران (۱۴)، منصور و همکاران (۱۹)، محمدی و همکاران (۲۱)، مونتالی و همکاران (۲۲) و صالحی و همکاران (۲۹) مبنی بر کارایی مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف در پیش‌بینی تغییرات به‌منظور برنامه‌ریزی در امر توسعه پایدار و جلوگیری از تخریب منابع طبیعی همخوانی دارد.

سه شاخص QD، AD و FOM نقش مهمی در بیان میزان صحت طبقه‌بندی کاربری اراضی و پیش‌بینی کاربری اراضی داشت که با نتایج حاصل از تحقیقات انجام‌شده در زمینه ارزیابی صحت با شاخص‌های QD، AD و FOM توسط

- reef model using Metropolis-Coupled Markov Chain Monte Carlo. *Ecological Modelling*, 221(10): 1337-1347. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.02.001.
8. Dezhkam S, Jabbarian Amiri B, Darvishsefat AA, Sakieh Y. 2017. Performance evaluation of land change simulation models using landscape metrics. *Geocarto international*, 32(6): 655-677. doi:https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1167967.
 9. Esch T, Asamer H, Bachofer F, Balhar J, Boettcher M, Boissier E, d'Angelo P, Gevaert CM, Hirner A, Jupova K. 2020. Digital world meets urban planet—new prospects for evidence-based urban studies arising from joint exploitation of big earth data, information technology and shared knowledge. *International journal of digital earth*, 13(1): 136-157. doi:https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1548655.
 10. Ghorbannia K, Mirsanjari M, Armin M. 2017. Forecasting of forest land changes in the Chalooosrood watershed. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(2): 79-91. (In Persian)
 11. Ghosh P, Mukhopadhyay A, Chanda A, Mondal P, Akhand A, Mukherjee S, Nayak SK, Ghosh S, Mitra D, Ghosh T, Hazra S. 2017. Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling- A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 5: 64-77. doi:https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.01.005.
 12. Guan D, Li H, Inohae T, Su W, Nagaie T, Hokao K. 2011. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling*, 222(20): 3761-3772. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.09.009.
 13. Hajbigloo M, Sheikh V, Memarian H, Bairam Komaki C. 2020. Determination of quantity and allocation disagreement indices in selection of appropriate algorithm for land use classification in pixel and objected base in Gorgarood river basin. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(4): 1-20. (In Persian)
 14. Kelly dOB, Alvares Soares Ribeiro CA, Marcatti GE, Lorenzon AS, Martins de Castro NL, Domingues GF, Romário de Carvalho J, Rosa dos Santos A. 2018. Markov chains and cellular automata to predict environments subject to desertification. *Journal of Environmental Management*, 225: 160-167. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.064.
 15. Khalifa MA. 2015. Evolution of informal settlements upgrading strategies in Egypt: From negligence to participatory development. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(4): 1151-1159. doi:https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.04.008.
 16. Ku C-A. 2016. Incorporating spatial regression model into cellular automata for simulating land use change. *Applied Geography*, 69: 1-9. doi:https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.02.005.
 17. Kumar KS, Kumari KP, Bhaskar PU. 2016. Application of Markov Chain & Cellular Automata based model for prediction of Urban transitions. In: 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE, pp 4007-4012. doi:https://doi.org/4010.1109/ICEEOT.2016.7755466.
 18. Liu Y, Feng Y, Pontius RG. 2014. Spatially-explicit simulation of urban growth through self-adaptive genetic algorithm and cellular automata modelling. *Land*, 3(3): 719-738. doi:https://doi.org/10.3390/land3030719.
 19. Mansour S, Al-Belushi M, Al-Awadhi T. 2020. Monitoring land use and land cover changes in the mountainous cities of Oman using GIS and CA-Markov modelling techniques. *Land Use Policy*, 91: 104414. doi:https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104414.
 20. Memarian H, Balasundram SK, Talib JB, Sung CTB, Sood AM, Abbaspour K. 2012. Validation of CA-Markov for simulation of land use and cover change in the Langat Basin, Malaysia. *Journal of Geographic Information System*, 4(6): 542-554. doi:https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46059.
 21. Mohammadi S, Habashi K, Pourmanafi S. 2018. Monitoring and prediction land use/land cover changes and its relation to drought (Case study: sub-basin Parsel B2, Zayandeh Rood watershed). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9(1): 24-39. (In Persian)
 22. Munthali MG, Mustak S, Adeola A, Botai J, Singh SK, Davis N. 2020. Modelling land use and land cover dynamics of Dedza district of Malawi using hybrid Cellular Automata and Markov model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17: 100276. doi:https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100276.
 23. Pontius Jr RG, Millones M. 2011. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15): 4407-4429. doi:https://doi.org/10.1080/01431161.2011.55292.
 24. Pontius Jr RG, Peethambaram S, Castella J-C. 2011. Comparison of three maps at multiple resolutions: a case study of land change simulation in Cho Don District, Vietnam. *Annals of the Association of American Geographers*, 101(1): 45-62. doi:https://doi.org/10.1080/00045608.2010.51774.
 25. Prestele R, Alexander P, Rounsevell MD, Arneth

- A, Calvin K, Doelman J, Eitelberg DA, Engström K, Fujimori S, Hasegawa T. 2016. Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global-scale model comparison. *Global change biology*, 22(12): 3967-3983. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.13337>.
26. Ralha CG, Abreu CG, Coelho CGC, Zaghetto A, Macchiavello B, Machado RB. 2013. A multi-agent model system for land-use change simulation. *Environmental Modelling & Software*, 42: 30-46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.12.003>.
 27. Rimal B, Zhang L, Keshtkar H, Haack BN, Rijal S, Zhang P. 2018. Land use/land cover dynamics and modeling of urban land expansion by the integration of cellular automata and markov chain. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(4): 154. doi:<https://doi.org/10.3390/ijgi7040154>.
 28. Saaty TL. 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1): 9-26.
 29. Salehi N, Ekhtesasi M, Talebi A. 2019. Predicting locational trend of land use changes using CA-Markov model (Case study: Safarod Ramsar watershed). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(1): 106-120. (In Persian)
 30. Singh SK, Mustak S, Srivastava PK, Szabó S, Islam T. 2015. Predicting Spatial and Decadal LULC Changes Through Cellular Automata Markov Chain Models Using Earth Observation Datasets and Geo-information. *Environmental Processes*, 2(1): 61-78. doi:<https://doi.org/10.1007/s40710-015-0062-x>.
 31. Solomon N, Hishe H, Annang T, Pabi O, Asante IK, Birhane E. 2018. Forest cover change, key drivers and community perception in Wujig Mahgo Waren forest of northern Ethiopia. *Land*, 7(1): 32. doi:<https://doi.org/10.3390/land7010032>.
 32. Stefanov WL, Ramsey MS, Christensen PR. 2001. Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment*, 77(2): 173-185. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00204-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00204-8).
 33. Tajbakhsh M, Memarian H, Shahrokhi Y. 2016. Analyzing and modeling urban sprawl and land use changes in a developing city using a CA-Markovian approach. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2(4): 397-410. doi:<https://doi.org/10.22034/GJESM.2016.02.04.009>.
 34. Varga OG, Pontius RG, Singh SK, Szabó S. 2019. Intensity Analysis and the Figure of Merit's components for assessment of a Cellular Automata – Markov simulation model. *Ecological Indicators*, 101: 933-942. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.057>.
 35. Verburg PH, Soepboer W, Veldkamp A, Limpiada R, Espaldon V, Mastura SSA. 2002. Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model. *Environmental Management*, 30(3): 391-405. doi:10.1007/s00267-002-2630-x.
 36. Yu H, Jia H. 2017. Simulating the spatial dynamics of urban growth with an integrated modeling approach: A case study of Foshan, China. *Ecological Modelling*, 353: 107-116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.04.005>.
 37. Zang S, Huang X. 2006. An aggregated multivariate regression land-use model and its application to land-use change processes in the Daqing region (northeast China). *Ecological Modelling*, 193(3): 503-516. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.08.026>.