

مدلسازی تغییرات کاربری زمین با استفاده از مدل مارکوف-اتوماتای سلولی و تصمیم‌گیری چند معیاره در حوضه آبخیز تالار

محمد سعید میراخورلو^۱، مجید رحیم‌زادگان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
saeid.mirakhorlo@gmail.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
rahimzadegan@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۶، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۶)

چکیده

نقشه‌های کاربری زمین از لایه‌های اطلاعاتی بسیار مهم در برنامه‌ریزی مدیریت حوضه‌های آبخیز است. همچنین استفاده از روش‌های پیش‌بینی تغییرات کاربری می‌تواند در زمینه مدیریت و تصمیم‌سازی حوضه‌ها بسیار موثر باشد. در این راستا، هدف این پژوهش استفاده از روش ترکیبی مارکوف-اتوماتای سلولی به منظور پیش‌بینی نقشه کاربری زمین با استفاده از تصمیم‌گیری و ارزیابی چند معیاره در حوضه آبخیز تالار در شمال ایران است. به همین منظور، دو تصویر سنجنده Landsat 5 TM مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ و یک تصویر SENTINEL-2 MSI مربوط به ۲۰۱۶ و سایر لایه‌های اطلاعاتی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. ابتدا توسط تصاویر سنجنده TM نقشه‌های کاربری زمین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ تولید شد. همچنین، بر اساس اطلاعات موجود، لایه‌های مورد نیاز برای تولید لایه پتانسیل انتقال تهیه شد. برای تولید نقشه‌های کاربری زمین، یک سناریو برای پیش‌بینی تغییرات کاربری بر اساس افزایش زمین‌های بدون پوشش یا پوشش گیاهی کم، افزایش زمین‌های کشاورزی و همچنین افزایش زمین‌های مسکونی به کار گرفته شد. با اعمال تبدیلات فازی، استفاده از وزن‌دهی خطی و تصمیم‌گیری چندمعیاره نقشه‌های پتانسیل انتقال تولید شد. برای تولید ماتریس احتمال انتقال که نشان دهنده تعداد پیکسل‌ها و مساحت‌هایی است که در طول زمان تغییر می‌یابد، از زنجیره مارکوف بهره گرفته شد. در نهایت با استفاده از اتوماتای سلولی با استفاده از فیلتر همسایگی با تعداد ۵ پیکسل همسایه، نقشه‌های کاربری زمین برای سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۳۰ تولید شد. صحت سنجی لایه کاربری زمین تولید شده برای سال ۲۰۱۶ توسط تصویر طبقه‌بندی شده MSI انجام گردید و نشان دهنده عملکرد خوب مدل با کاپای ۰/۸۴ برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین بود. همچنین، نقشه کاربری زمین تولید شده برای سال ۲۰۳۰ نشان دهنده افزایش قابل توجه کلاس‌های کاربری زمین مسکونی و زمین بایر و کاهش کلاس کاربری جنگل متراکم و کم‌تراکم بود.

واژگان کلیدی: کاربری زمین، اتوماتای سلولی، زنجیره مارکوف، ارزیابی چند معیاره

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

اطلاعات آینده کاربری و پوشش زمین^۱ برای یک حوضه آبخیز و تأثیر آن بر منابع طبیعی یکی از مهمترین مسائل برای سیاست‌گذاری و مدیریت این نواحی است. تغییرات کاربری زمین در یک سامانه حوضه آبخیز باعث ایجاد اثرات بلندمدت در اکوسیستم آن می‌گردد [۱]. پوشش زمین، پوششی فیزیکی است که محدوده یک حوضه آبخیز را پوشش می‌دهد، در حالی کاربری زمین استفاده انسانی از محدوده حوضه آبخیز برای یک هدف مشخص مانند کشاورزی، جنگل‌داری یا توسعه شهری است [۲]. تغییرات در کاربری زمین تحت عوامل انسانی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر حوضه آبخیز بگذارد، در واقع تغییرات کاربری زمین تأثیرات محیط زیستی زیادی مانند از بین رفتن زیستگاه‌ها،^۲ اسیدی شدن^۳، بیابان‌زایی^۴، تغییر اقلیم و از بین رفتن تنوع گیاهی و جانوری^۵ در سامانه حوضه آبخیز را در پی دارد [۳].

مطالعات انجام شده روی تغییرات کاربری زمین را در یک طبقه‌بندی جامع می‌توان به سه دسته موضوع اصلی تحلیل پویایی فرآیندها،^۶ مشخص کردن عوامل تأثیرگذار^۷ و مقیاس مدل‌های تغییر کاربری بصورت جهانی و یا محلی طبقه‌بندی نمود [۴]. در سال‌های اخیر مدل‌های کاربردی زیادی برای پیش‌بینی و مشخص کردن تغییرات کاربری زمین به کار گرفته شده است [۵]. به طور کلی می‌توان مدل‌های پیش‌بینی و مشخص کردن تغییرات کاربری زمین را به سه دسته (۱) مدل‌های تجربی و آماری مانند مدل‌های زنجیره مارکوف^۸ و مدل‌های رگرسیونی، (۲) مدل‌های دینامیکی مانند مدل اتوماتای سلولی^۹ (CA)، مدل‌های عامل مبنای^{۱۰} و (۳) سامانه پویایی مانند مدل تبدیل کاربری زمین و اثرات آن (CLUE^{۱۱}) طبقه‌بندی نمود [۶].

کاربرد مدل اتوماتای سلولی برای مدل کردن سناریوهای دنیای واقعی به بیش از ۱۵ سال پیش باز

می‌گردد [۷] و این روش برای اهداف متفاوت و کاربری‌ها و پوشش زمین مختلف به کار گرفته شده است. مدل کردن تغییرات نواحی با پوشش علفزار حفاظت شده^{۱۲} توسط [۸]، [۹] با استفاده از CA صورت گرفته است. [۱۰] با استفاده از مدل پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین زنجیره مارکوف و CA در حوضه‌ای در تانزانیا تغییرات زمین‌های کشاورزی را با استفاده از ارزیابی چند معیاره بررسی کردند. نتایج آنها نشانگر کاهش زمین‌های کشاورزی به میزان ۸/۵ درصد در سال ۲۰۲۰ و تبدیل آن به زمین‌های بافت شهری بود. همچنین نتایج این تحقیق مفید بودن سناریوی پیش‌بینی آینده و اطلاعات تغییرات کاربری به منظور استفاده در بیلان آب و برنامه‌ریزی‌های مدیریت آب را نشان داد. [۱۱] با استفاده از زنجیره مارکوف و CA گسترش شهری را در ناحیه‌ای شهری در هند بررسی کردند، نتایج نشانگر تغییرات زیاد کاربری‌های زمین مختلف در بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ بود. [۱۲] تغییرات پوشش و کاربری زمین را در شهر ابوظبی واقع در کشور امارات با استفاده از مدل ترکیبی CA و زنجیره مارکوف بررسی کردند. آنها از تصاویر سنجنده‌های لندست TM و ETM+ استفاده کردند. صحت کلی به دست آمده در تحقیق ذکر شده تقریباً برابر با ۸۰ درصد بود. آنها با استفاده از این روش، نقشه کاربری زمین را برای سال ۲۰۳۰ پیش‌بینی کردند و در این راستا از تصاویر سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۰۶ بهره‌گیری کردند. آنها نشان دادند که این تصاویر و الگوریتم می‌تواند به منظور بررسی فرآیند پیش‌بینی به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه به کار رود. [۱۳] به منظور پیش‌بینی LUCC، روش CA-زنجیره مارکوف را در حوضه‌ای در کنار دریاچه‌ای در چین پیاده‌سازی نمودند. در این پژوهش از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا از سنجنده‌های SPOT-5، QuickBird و WorldView-2 استفاده گردید. تصاویر منطقه مورد مطالعه برای سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۹ به ۱۰ کلاس مختلف طبقه‌بندی شده و نتیجه تصویر پیش‌بینی شده سال ۲۰۱۴ با تصاویر طبقه‌بندی شده نشانگر صحت کلی ۸۸ درصدی بود. در نهایت تصویر کاربری زمین سال ۲۰۲۲ پیش‌بینی شده است. آنها همچنین دریافتند که فیلتر همسایگی ۵×۵ بهترین نتیجه را در بر داشته است. نتایج تغییرات نیز بیانگر کاهش مساحت کلاس‌های پوشیده شده از آب و مناطق

۱ Land Use Land Cover

۲ Habitat

۳ Acidification

۴ Desertification

۵ Biodiversity

۶ Dynamic analysis of process

۷ Driving forces

۸ Markov chains

۹ Cellular automata

۱۰ Agent based model

۱۱ Conversion of Land Use and its Effects

۱۲ Grassland protection

جنگل در این تصاویر بود. همچنین، آنها دریافتند که تغییر کلاس جنگل به دیگر کلاس‌ها بزرگترین تغییر در بین تغییرات کاربری زمین در آینده است.

همچنین در ارتباط با تعیین تغییرات کاربری زمین و تأثیرات آن بر حوضه آبخیز با استفاده از مدل مارکوف-اتوماتای سلولی می‌توان به پژوهش‌های [۲، ۲۰، ۲۱] اشاره کرد. در این پژوهش‌ها ابتدا با مدلی نقشه‌های کاربری زمین پیش‌بینی شده یا با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای تغییرات بررسی شده است و در نهایت با استفاده از ورود نقشه‌های کاربری زمین به مدل‌های هیدرولوژی مختلف تاثیر این تغییرات بررسی گردید.

با توجه به نتایج موفقیت‌آمیز پژوهش‌های متعدد ارائه شده با استفاده از مدل ترکیبی اتوماتای سلولی و مارکوف به منظور بررسی و پیش‌بینی کاربری زمین و پوشش زمین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مارکوف-اتوماتای سلولی همراه با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و GIS روشی مناسب برای مدلسازی تغییرات مکانی و زمانی تغییرات است [۲۲، ۲۳]. در مدل مارکوف-اتوماتای سلولی، زنجیره مارکوف کنترل کننده تغییرات زمانی برای کاربری‌های مختلف زمین بر اساس ماتریس احتمال انتقال^۵ است [۲۴]. در حالی که مدل اتوماتای سلولی کنترل کننده تغییرات الگوهای مکانی از طریق قوانین محلی همسایگی در نظر گرفته شده و نقشه پتانسیل انتقال^۶ یا تناسب^۷ است [۲۵، ۲۶].

عواملی که بر الگوی تغییر کاربری زمین تأثیر می‌گذارند، متفاوت بوده و انتخاب این عوامل، وابسته به اهداف مطالعه می‌باشد [۷]. عوامل انتخابی می‌تواند ترکیبی از عوامل طبیعی یا اجتماعی-اقتصادی^۸ باشد. این مورد در تحقیقات [۲۷-۳۰] که همگی از عوامل ترکیبی طبیعی و اجتماعی اقتصادی به منظور تعیین الگوی تغییر کاربری زمین استفاده کرده‌اند نیز به چشم می‌خورد. بنابراین، می‌توان با مشخص کردن عوامل تأثیر گذار و تعیین هدف به منظور بررسی عوامل تعیین کننده در تغییرات کاربری زمین در ناحیه مورد مطالعه و همچنین بهره‌گیری از روش ترکیبی اتوماتای سلولی و زنجیره مارکوف اقدام به بررسی و تولید نقشه‌های کاربری زمین کرد.

با توجه به تحقیقات بررسی شده و اهمیت تولید نقشه‌های کاربری زمین در مدل‌های هیدرولوژیکی و بررسی اهمیت

جنگلی بود. [۱۴] با استفاده از آزمون استقلال آماری^۱ و شاخص کاپا نتایج تغییرات کاربری زمین با استفاده از مدل ترکیبی اتوماتای سلولی و زنجیره مارکوف را صحت سنجی کردند. نتایج آنها نشانگر این بود که تغییرات کاربری زمین دارای استقلال آماری نمی‌باشد. [۱۵] با استفاده از تصاویر ماهواره لندست، زنجیره مارکوف، اتوماتای سلولی و ارزیابی چند معیاره نقشه کاربری زمین را برای شهری در هند در سال ۲۰۲۰ پیش‌بینی کردند و مشخص کردند که بیشینه تغییرات در نواحی مرزی شرقی محدوده شهری رخ خواهد داد. [۱۶] با استفاده از یک روش شی‌گرا و با استفاده از اتوماتای سلولی و زنجیره مارکوف نقشه کاربری زمین برای دشت سراب را برای سال ۲۰۲۰ پیش‌بینی کردند. نتایج آنها نشانگر کاهش زمین‌های با پوشش گیاهی ناچیز و افزایش نواحی کشاورزی در آن محدوده بود.

[۱۷] با مدل ترکیبی اتوماتای سلولی و مارکوف توسعه شهری و تغییرات کاربری زمین را در شهری در چین شبیه‌سازی نمود و به منظور تعیین قوانین انتقال و تولید لایه‌های نقشه تناسب از عوامل محلی و جهانی استفاده کرد. آنها در این راستای تولید نقشه کاربری زمین از تصاویر سنجنده لندست TM نیز استفاده کردند. نتایج آنها نشانگر صحت و امکان استفاده این مدل برای شبیه‌سازی تغییرات بود. [۱۸] روشی جدید برای پیش‌بینی الگوهای مکانی توسعه شهری با استفاده از مدل ترکیبی توان دوم کای^۲ همراه با مارکوف و اتوماتای سلولی توسعه دادند. آنها این روش را در پیش‌بینی توسعه شهری در لیبی برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۵ به کار بردند. آنها از تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده از سال‌های ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۰ به منظور استخراج نقشه‌های کاربری این سال‌ها استفاده کردند. نتایج نشان دهنده آن بود که مدل هیبرید استفاده شده قابل استفاده در پیش‌بینی توسعه و گسترش شهری است.

[۱۹] با استفاده از تصویرهای چند زمانه^۳ و مدل مارکوف-اتوماتای سلولی تغییرات کاربری زمین در ناحیه‌ای نیمه‌خشک در غرب ایران را پیش‌بینی کردند و در این راستا از مدل چند لایه پرسپترون^۴ استفاده کردند. آنها نقشه کاربری زمین را برای سال ۲۰۲۱ پیش‌بینی کردند و نتایج نشانگر کاهش حدود ۳۰ درصدی کلاس

^۵ Transition probability matrix

^۶ Transition potential

^۷ Suitability map

^۸ Socioeconomic

^۱ Statistical independence test

^۲ Chi-square

^۳ Multi temporal

^۴ Multi layer perceptron

تأثیرات آن بر یک حوضه آبخیز، هدف این پژوهش، استفاده از روش ترکیبی مارکوف-اتوماتای سلولی و همچنین تصمیم‌گیری چندمعیاره به منظور تولید و پیش‌بینی نقشه کاربری زمین برای سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۳۰ در حوضه آبخیز تالار در شمال ایران، تحت سناریویی مشخص است. در این راستا ماتریس احتمال انتقال برای تبدیل کاربری زمین برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ و ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ تعیین شده است. برای تولید نقشه‌های پتانسیل انتقال تحت سناریو تعریف شده از تصمیم‌گیری چند معیاره بهره‌گیری شده است. سناریو بر مبنای افزایش زمین‌های با کاربری مسکونی، افزایش زمین‌های بدون پوشش و یا با پوشش کم و همچنین افزایش زمین‌های کشاورزی می‌باشد. نقشه‌های پیش‌بینی سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۳۰ با استفاده از روش ترکیبی مارکوف-اتوماتای سلولی تولید شده است. همچنین، صحت‌سنجی و ارزیابی نتایج توسط نقشه کاربری سال ۲۰۱۶ انجام شده است.

۲- مواد و روش‌ها

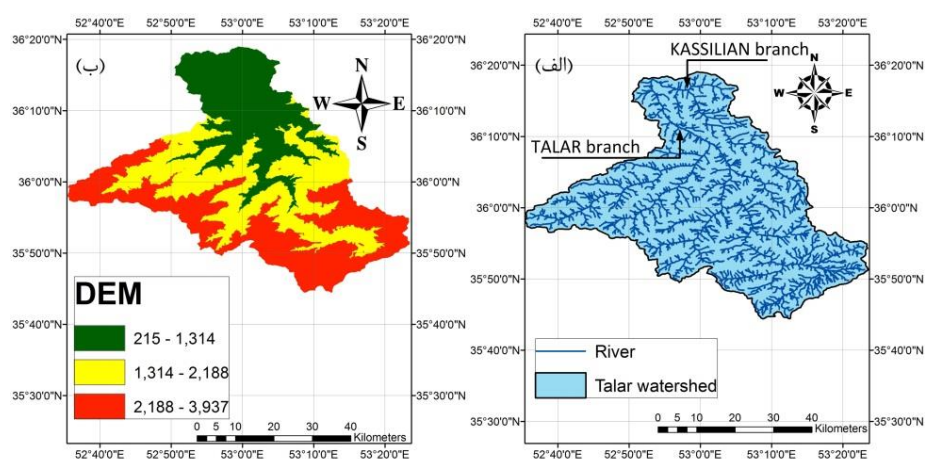
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز تالار واقع شده در شمال ایران، بین سه استان مازندران، تهران و سمنان واقع شده است. این ناحیه به عنوان حوضه معرف وزارت نیرو است و به لحاظ تغییر اقلیم شامل نواحی با اقلیم نیمه خشک و نواحی با پوشش کم و نواحی با پوشش گیاهی زیاد و مرطوب در قسمت‌های شمالی می‌شود. این حوضه در محدوده طول جغرافیایی $35^{\circ} 22.2'$ تا $52^{\circ} 34.19'$ شرقی و عرض جغرافیایی $33.06^{\circ} 23.44'$ تا $35^{\circ} 19.6'$ شمالی واقع شده است (شکل ۱ الف). این حوضه شامل دو رودخانه اصلی تالار به طول ۱۰۰ کیلومتر و رودخانه کسلیان به طول ۵۰ کیلومتر

می‌باشد. مساحت کلی حوضه برابر با $210088/7$ هکتار می‌باشد. شکل عمومی حوضه پهن و دارای امتداد شمالی-جنوبی بوده و دامنه تغییرات ارتفاعی حوضه از ۲۱۵ متر تا ۳۹۱۰ متر می‌باشد (شکل ۱ ب). اراضی پست حدود ۲۲ درصد و اراضی متوسط حدود $70/2$ درصد و اراضی مرتفع حدود $7/8$ درصد از کل حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. $11/55$ درصد از حوضه دارای شیب کمتر از ۱۲ درصد و $14/21$ درصد دارای شیب تند بیش از ۶۰ درصد، $58/52$ درصد از کل حوضه دارای شیب بیش از ۳۰ درصد می‌باشد.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

به منظور تولید نقشه کاربری زمین، تصاویر اخذ شده توسط سنجنده LANDSAT 5 TM با قدرت تفکیک ۳۰ متر مربوط به تاریخ $2000/07/19$ و $2010/05/28$ تهیه گردید. همچنین، برای صحت‌سنجی نتایج روش‌ها، تصویر سنجنده SENTINEL-2 MSI با قدرت تفکیک تقریبی ۱۰ متر در باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک مربوط به تاریخ $2016/06/06$ اخذ شد. افزون بر این، از SRTM DEM با قدرت تفکیک تقریبی ۳۰ متر، مربوط به سال ۲۰۰۷ به منظور تولید تعدادی از لایه‌های اطلاعاتی مانند لایه تراز ارتفاعی، شیب یا جهت شیب برای مدل استفاده شده است. سایر اطلاعات مورد استفاده شامل لایه نقشه راه‌ها، نقشه روستاها و مناطق مسکونی حوضه آبخیز تالار مورد نیاز تولید نقشه‌های پتانسیل تغییر از وزرات جهاد کشاورزی تهیه شد. همچنین لایه مناطق حفاظت شده توسط سازمان محیط زیست نیز از سازمان حفاظت محیط زیست تهیه شد. این لایه به منظور در نظر گرفتن تأثیر لایه‌های حفاظت شده در محاسبات به کار گرفته شد.



شکل ۱- (الف) محدوده حوضه آبخیز تالار و رودخانه‌های تشکیل دهنده آن، (ب) تراز رقمی ارتفاعی حوضه آبخیز

۳-۲- روش شناسی

روند کلی تولید و پیش‌بینی نقشه کاربری زمین شامل (۱) تولید ماتریس احتمال انتقال بر اساس زنجیره مارکوف برای تولید ماتریس احتمال تغییرات کاربری زمین برای دوره‌های متفاوت و (۲) استفاده از لایه‌های اطلاعات GIS عوامل تأثیر گذار بر پتانسیل تغییرات تحت سناریوهای تعیین شده و تبدیل آن بر اساس ارزیابی چند معیاره با بهره‌گیری از ابزارهای فازی‌سازی و روش ترکیب خطی وزنی به نقشه پتانسیل انتقال است. در نهایت بر اساس نقشه‌های طبقه‌بندی شده کاربری زمین در سال ۲۰۱۰، نقشه‌های پتانسیل تغییر و ماتریس احتمال انتقال اقدام به تولید نقشه‌های کاربری برای سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۳۰ می‌گردد. همچنین در این راستا نقشه تولید شده سال ۲۰۱۶ با نقشه طبقه‌بندی شده تصویر SENTINEL-2 MSI به منظور صحت‌سنجی و تولید ماتریس خطا مقایسه شده است. فلوچارت کلی مدل مارکوف-اتوماتای سلولی استفاده شده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

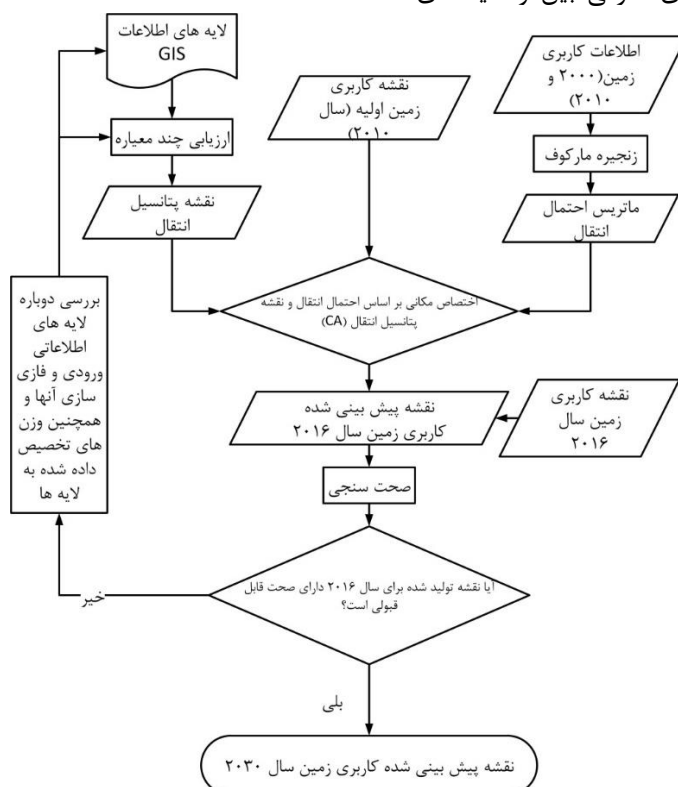
۳-۲-۱- زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف مدلی ریاضی است که برای شرح نوع خاصی از فرآیند که در گام‌های متوالی بین وضعیت‌های

مختلف رخ می‌دهد، کاربرد دارد [۳۱]. فرضیه مدل زنجیره مارکوف که به صورت کاربردی برای تغییرات کاربری زمین به کار گرفته می‌شود، آن است که کاربری زمین در گذشته می‌تواند برای پیش‌بینی آینده و همچنین وضعیت کنونی مؤثر باشد. [۳۲] بیان کردند که "احتمال شرطی تغییرات کاربری زمین در هر زمان، با در دسترس بودن تمام نقشه‌های کاربری در زمان‌های قبلی، وابسته به نزدیکترین کاربری به زمان مورد نظر بوده و به زمان‌های دورتر مرتبط نمی‌باشد". سازوکار اصلی زنجیره مارکوف احتمال است که نشان دهنده درست‌نمایی انتقال یا حرکت از وضعیت i به وضعیت j در یک بازه زمانی مشخص است [۳۳]. در گام اول، ماتریس احتمال انتقال کاربری زمین باید تولید گردد که رابطه آن بصورت زیر می‌باشد:

$$P = (P_{ij}) = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

در ماتریس بالا، P_{ij} نشان دهنده احتمال انتقال از وضعیت i به وضعیت j (مرحله اول به مرحله دوم) بوده و n تعداد کاربری‌های مورد استفاده در ناحیه مورد مطالعه می‌باشد. P_{ij} باید دارای شرایط زیر باشد:



شکل ۲- فلوچارت کلی مدل مارکوف-اتوماتای سلولی در نظر گرفته شده برای پیش‌بینی نقشه کاربری زمین

نقشه پتانسیل با توجه به سناریوهای در نظر گرفته شده از شاخص‌های طبیعی و اجتماعی-اقتصادی شامل شیب، ارتفاع، جهت شیب، فاصله تا جاده‌ها، فاصله تا آبراهه‌ها، فاصله تا مناطق شهری و روستایی، عرض جغرافیایی و همچنین محدوده مناطق حفاظت شده استفاده گردید. سپس، به منظور تولید نقشه پتانسیل تغییر یا نواحی مناسب^{۱۲} برای تغییر و توسعه کاربری تحت سناریوی ذکر شده شاخص‌های مورد استفاده برای هریک از سناریوها توسط تبدیلات فازی به بازه ۰ تا ۱ تبدیل شدند. در این راستا با توجه به هر سناریو و عامل تأثیر گذار تحت بررسی، از توابع تبدیل فازی خطی، سیگموئید و J شکل استفاده شد. برای نمونه برای تغییر لایه اطلاعاتی عرض جغرافیایی از تبدیل خطی استفاده شده و برای لایه فاصله از زمین های زراعی از تبدیل J شکل استفاده شد. همچنین، با توجه به نوع تبدیل فازی، نقاط کنترلی به منظور تبدیل آن لایه به لایه فازی در نظر گرفته شد. به عنوان مثال، می‌توان نواحی با شیب کمتر از ۱۵ درجه را به عنوان شیب مناسب برای توسعه نواحی مسکونی در نظر گرفت. بدین منظور با اعمال تبدیل فازی مشخص و نقطه کنترل ۱۵ درجه، پیکسل‌هایی که دارای مقدار کمتری هستند را به عنوان مناطق با امتیاز فازی ۱ در نظر گرفت و در نواحی بالاتر از ۱۵ درجه به صورت خطی و نزولی عمل کرد.

در نهایت نقشه پتانسیل تغییر، برای هر کدام از سناریوها، لایه‌های فازی تولید شده با روش ارزیابی چند معیاره^{۱۳} و روش ترکیب خطی وزنی (WLC)^{۱۴} تولید شد. روش ارزیابی چند معیاره یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی چندین معیار مکمل یا متضاد برای اهداف متفاوت [۳۶] به صورت همزمان می‌باشد [۳۷]. در این راستا و با توجه به اهداف تعیین شده برای افزایش مناطق کشاورزی، مسکونی و نواحی با پوشش گیاهی ناچیز این روش به کار گرفته شده است.

روش ترکیب خطی وزنی در واقع روش میانه رو بین عملگرهای منطقی AND (نشان دهنده استراتژی‌های بدبینانه) و OR (مشخص کننده خوشبینانه‌ترین استراتژی‌ها) بوده [۳۷] و با در نظر گیری محیط پیوسته و سبک‌سنگینی^{۱۵} عوامل تأثیر گذار، می‌تواند نقشه نواحی

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ij} \leq 1 & (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 & (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

بر اساس فرآیند مارکوف و فرمول احتمال شرطی بیز^۱، مدل پیش‌بینی مارکوف از طریق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$P_{(n)} = P_{(n-1)} P_{ij} \quad (3)$$

که در آن n نشان دهنده زمان مورد بررسی است. پیش‌بینی آینده با استفاده از مدل زنجیره مارکوف عمدتاً با تحلیل دو تصویر کاربری زمین در دو تاریخ متفاوت انجام می‌پذیرد [۳۴]. بر این اساس در این تحقیق ابتدا نقشه‌های کاربری زمین مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰، با استفاده تصاویر مربوط سنجنده Landsat 5 TM به کلاس‌های کاربری زمین طبقه‌بندی شد. برای طبقه‌بندی ابتدا تصاویر با استفاده از روش بیشینه احتمال^۲ به ۶ کلاس کاربری جنگل با پوشش زیاد^۳، زمین با بدون گیاهی (پوشش گیاهی ناچیز)^۴، جنگل با پوشش گیاهی کم^۵، مناطق مسکونی^۶، زمین‌های کشاورزی^۷ و مرتع^۸ طبقه‌بندی گردیدند. سپس با استفاده از فیلتر انبوهش^۹ و اعلام حداقل ۹ پیکسل برای هر انبوهش، یک روش پس‌طبقه‌بندی^{۱۰} بر روی تصاویر اعمال شد. در نهایت ماتریس احتمال انتقال بین دو تصویر مذکور محاسبه شد.

۲-۳-۲- تولید نقشه پتانسیل تغییر با استفاده از ارزیابی چند معیاره

نقشه پتانسیل تغییر^{۱۱} بیانگر درستنمایی یا احتمالی است که یک کلاس کاربری زمین به کلاس دیگر تغییر یابد [۳۵]. در این تحقیق، سناریوهای در نظر گرفته شده شامل افزایش نواحی کشاورزی، افزایش نواحی مسکونی و پوشش‌های غیرطبیعی و همچنین گسترش نواحی با پوشش گیاهی پایین یا بدون پوشش گیاهی بود. برای تولید

- ۱ Bayesian
- ۲ Maximum likelihood
- ۳ Dense forest
- ۴ Bare land
- ۵ Degraded forest
- ۶ Settlement
- ۷ Farmland
- ۸ Pasture
- ۹ Aggregation
- ۱۰ Post classification
- ۱۱ Transitional potential

۱۲ Suitable areas
۱۳ Multi criteria evaluation
۱۴ Weighted linear combination
۱۵ Trade off

که در آن S مقدار تناسب بوده، w_i وزن عامل i بوده و x_i امتیاز معیار برای عامل i است، c_j امتیاز ضابطه j (صفر یا ۱ در تصاویر بولین) می باشد. در نهایت با استفاده از تصمیم گیری چند معیاره نقشه های تناسب تولید گردید. جدول ۱ نشان دهنده وزن های تعیین شده به منظور اعمال بر روی لایه های ورودی فازی شده برای تولید هریک از نقشه های تناسب می باشد.

۳-۳-۲- اتوماتای سلولی

اتوماتای سلولی یک مدل پویایی است که در زمان، فضا و (شبکه پیکسل) گسسته است که ابتدا توسط Ulam و Von Neumann در اوایل دهه ۱۹۴۰ به منظور ایجاد چهارچوبی برای بررسی رفتار سیستم های پیچیده تولید شد [۴۱]. اتوماسیون سلولی بر اساس شبکه گسسته از پیکسل است که وضعیت آن به صورت مستقل بر اساس وضعیت قبلی و همسایگی بر اساس قوانین مشخصی تغییر می یابد. اکثر مدل ها دارای پنج مشخصه زیر هستند:

۱. سلول های مجزا: زیرلایه سیستم شامل فضای سلولی یک، دو و یا چند بعدی است.
۲. همگنی: تمامی سلول ها برابر هستند.
۳. وضعیت های مجزا: هر سلول دارای تعداد محدودی از وضعیت های مجزا است.
۴. بر هم کنش محلی: هر سلول فقط بر سلول هایی که در همسایگی آن قرار دارد اثر می کند.
۵. دینامیک های مجزا: در هر بازه زمانی مجزا، هر سلول وضعیت خودش را بر اساس قوانین انتقال که برای سلول های همسایه اش در نظر گرفته شده است بروز رسانی می کند [۴۲].
۶. در محاسبات با اعمال تعداد گام های مربوطه برای تکرار، در هر گام یک کلاس کاربری به عنوان کلاس میزبان معرفی می گردد و سایر کلاس های کاربری دیگر به عنوان مدعی^۵ به منظور اختصاص تغییرات کاربری زمین رقابت می کنند. مساحت مورد نیاز برای تغییر هر کلاس کاربری بر اساس مساحت انتقالی به دست آمده از ماتریس احتمال انتقال مارکوف تعیین شده و با تقسیم مساحت بر تعداد گام های تکرار، اختصاص های مورد نیاز در هر مرحله برای هر تغییر

پتانسیل تغییر را بین دو استراتژی بدبینانه و خوشبینانه (AND منطقی و OR منطقی) تولید کند. روش WLC بر اساس مقایسه جفتی بصورت فرآیند تحلیل سلسله مراتبی است که توسط [۳۸] توسعه یافته است و اولین ارائه گر این روش برای سیستم های GIS، [۳۹] است. در روش WLC ابتدا با تعیین وزن هایی برای تعیین اهمیت هریک از شاخص های سیاسی-اقتصادی و طبیعی، اهمیت هر کدام از عوامل برای تولید لایه نقشه پتانسیل تعیین می شود. بدین منظور اهمیت دو لایه اطلاعاتی (برای مثال نسبت اهمیت لایه فاصله از راه ها و شیب با توجه به اینکه این دو لایه به منظور تولید کدام یک از نقشه های پتانسیل تغییر به کار می روند) نسبت به هم با تعیین نسبت اهمیت دولایه انتخاب شده در بازه ای بین ۱/۹ تا ۹ تعیین می شود [۳۷].

در فرآیند ارزیابی چند معیاره با استفاده از ترکیب خطی وزنی، جمع وزن ها برابر یک است. در روش [۳۸] وزن می تواند با بردار ویژه های اصلی مربوط به ماتریس مربعی متقابل^۱ به دست آمده از مقایسه دوهیو بین معیارها تعیین شود. بنابراین، برای هریک از لایه های ورودی در تعیین هر کدام نقشه پتانسیل وزنی تعریف شده و مجموع این وزن ها برابر یک در نظر گرفته می شود. مقایسه انجام شده، نسبت اهمیت دو معیار ورودی در اندازه گیری نقشه تناسب را برای هدف مشخص تعیین می کند. از آنجایی که ماتریس مقایسه دوهیو کامل، شامل مسیرهای چندگانه بوده که در آن اهمیت نسبی معیارها بررسی می شوند، می توان با استفاده از درجه سازگاری^۲ یا نرخ سازگاری (CR)^۳ برای تعیین نرخ ها اقدام کرد. CR نشان دهنده احتمالی است که ماتریس رتبه بندی^۴ به صورت تصادفی تولید شده باشد. [۳۸] بیان کرده است که ماتریس های با CR بیشتر از ۰/۱ باید دوباره ارزیابی شوند. لذا در این پژوهش به منظور در نظر گرفتن نرخ سازگاری مناسب، برای هر سه سناریو کاربری زمین نرخ زیر ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روش WLC عوامل توسط وزن ها با یکدیگر ترکیب شده و با استفاده از رابطه زیر منجر به تولید نقشه تناسب می گردند [۴۰]:

$$S = \sum w_i x_i \times \prod c_j \quad (4)$$

^۱ Square Reciprocal Matrix

^۲ Consistency

^۳ Consistency ratio

^۴ Rating matrix

کاربری زمین صورت می‌گیرد. فیلتر همسایگی به منظور کاهش وزن پیکسل‌هایی که خارج از محدوده مذکور وجود دارند، به کار می‌رود. در این پژوهش از مدل اتوماتای سلولی با فیلتر همسایگی 5×5 به منظور تولید نقشه کاربری زمین استفاده شد، زیرا این فیلتر بهترین نتیجه صحت کلی را در بر داشته است.

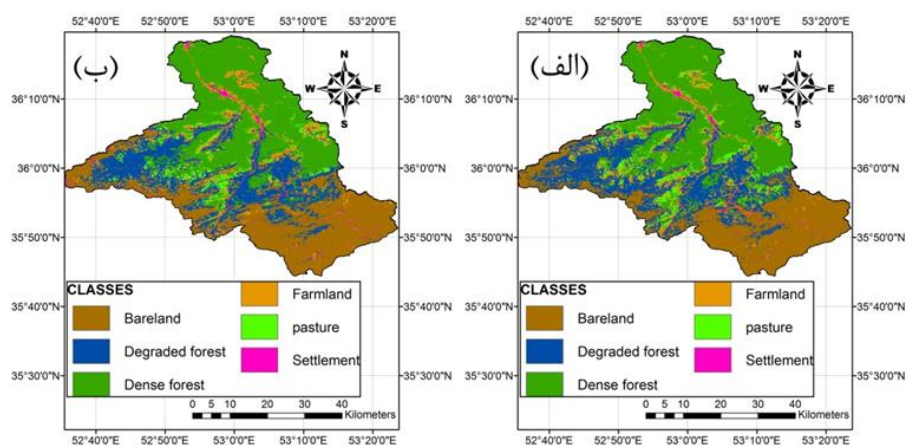
۲-۳-۴- روش اتوماتای سلولی_مارکوف

در این روش ابتدا، بر اساس شرایط اولیه اطلاعات زیستی و اجتماعی-اقتصادی، نقشه‌های تناسب تولید

گردید. سپس بر اساس تحلیل احتمال انتقال صورت گرفته با استفاده از زنجیره مارکوف، ماتریس احتمال انتقال و مساحت انتقالی بین کلاس‌های مختلف کاربری تعیین گردید. همچنین قوانین همسایگی بر اساس نقشه پتانسیل انتقال تولید شد. در مدل تغییرات زمانی، کاربری زمین با استفاده از احتمال انتقال به دست آمده از زنجیره مارکوف تعیین شد، اما تغییرات مکانی توسط قوانین تعیین شده در اتوماتای سلولی که توسط فیلترها یا نقشه‌های پتانسیل انتقال تولید می‌شوند، کنترل می‌شود [۴۳].

جدول ۱- وزن‌های به دست آمده با استفاده از مقایسه جفتی اهمیت دو معیار نسبت به هم در تولید هر کدام از نقشه‌های پتانسیل تغییر (تناسب)

وزن‌های تعیین شده برای تولید نقشه تناسب نواحی عاری از پوشش		وزن‌های تعیین شده برای تولید نقشه تناسب کشاورزی		وزن‌های تعیین شده برای تولید نقشه تناسب نواحی مسکونی	
عرض جغرافیایی فازای شده خطی	۰/۶۳۴۸	تراز ارتفاعی فازای شده خطی	۰/۰۵۲۲	فاصله از جاده فازای شده خطی	۰/۵۰۴۸
جهت شیب خطی شده فازای	۰/۱۵۱۴	فاصله از جاده فازای شده خطی	۰/۱۰۷۹	شیب فازای شده سیگموئید	۰/۱۴۳۱
تراز ارتفاعی فازای شده خطی	۰/۰۶۲۴	فاصله از رودخانه فازای J شکل	۰/۱۱۹۷	تراز ارتفاعی فازای شده خطی	۰/۰۶۴۵
فاصله از جاده فازای شده خطی	۰/۱۵۱۴	شیب فازای شده سیگموئید	۰/۲۶۰۲	فاصله از نواحی مسکونی فازای J شکل	۰/۲۸۷۶
		فاصله از نواحی کشاورزی فازای J شکل	۰/۴۶۰۱		



شکل ۳- نقشه کاربری زمین تولید شده برای (الف) سال ۲۰۰۰ (ب) سال ۲۰۱۰

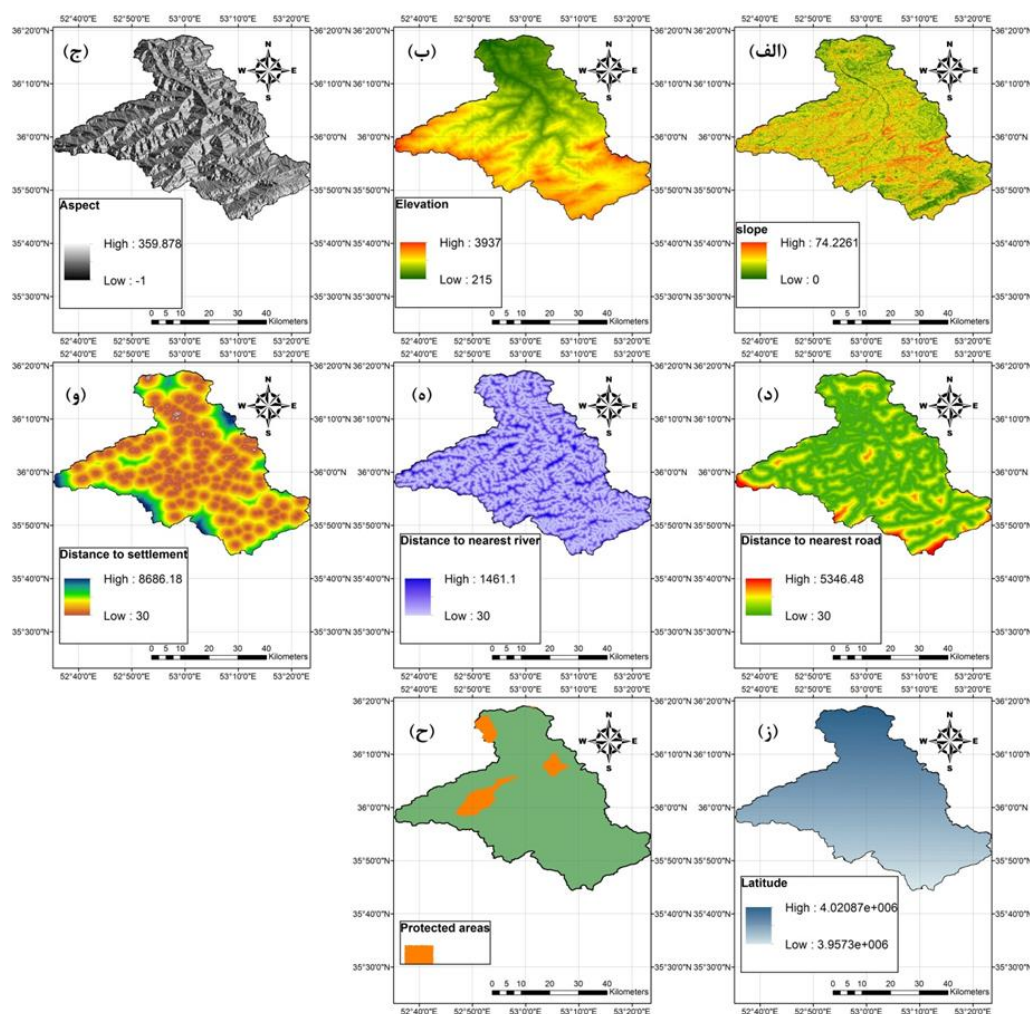
۳- نتایج و بحث

با توجه به منطقه مورد مطالعه نقشه‌های کاربری زمین مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ تهیه شده است. بدین منظور محدوده مورد مطالعه به شش کلاس کاربری زمین‌های بدون پوشش (Bareland)، مسکونی (Settlement)، زمین زراعی (Farmland)، مرتع (pasture)، جنگل با پوشش زیاد (Dense forest) و جنگل با پوشش کم (Degraded forest) طبقه‌بندی شد. صحت کلی به

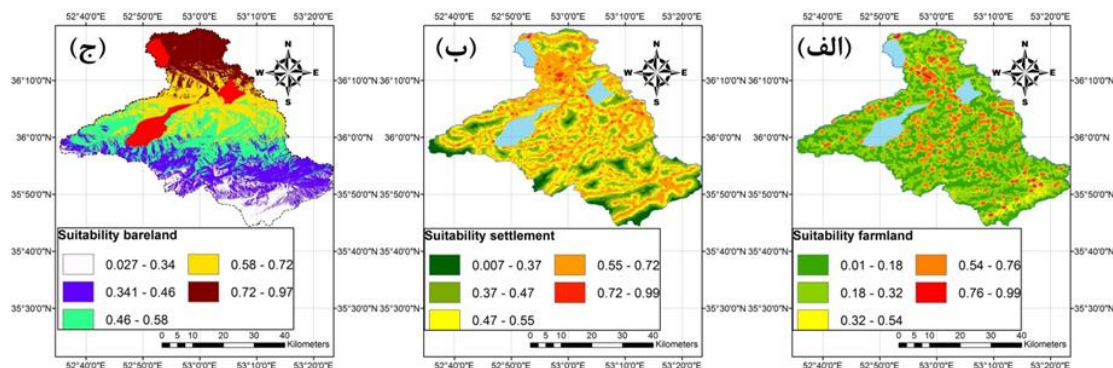
دست آمده در طبقه‌بندی تصاویر بالاتر از مقدار ۸۰ درصد بود. با استفاده از نقشه‌های تهیه شده (شکل ۳) به عنوان ورودی به ارزیابی چند معیاره و با توجه به سناریو تعریف شده، لایه‌های مورد استفاده برای تعیین نقشه پتانسیل تغییر ایجاد گردید (شکل ۴). برای تولید هر کدام از نقشه‌های پتانسیل تعریف شده توسعه نواحی مسکونی، کشاورزی و بدون پوشش (پوشش ناچیز) ترکیبی از لایه‌های ارائه شده در شکل ۴ به عنوان ورودی استفاده شده است. در این راستا ابتدا لایه‌های مذکور با توجه به نحوه

مناطق روستایی و شهری دارای تناسب بالاتری هستند. در شکل ۵ ب نقشه تناسب نواحی کشاورزی نشان داده شده است که در این شکل مناطق مستعد توسعه کشاورزی دارای مقادیر بیشتری است. در شکل ۵ ج مناطق مناسب برای نواحی بدون پوشش گیاهی مشخص شده که مقادیری که امتیاز کمتری دارند برای این کلاس مناسبتر هستند.

تأثیر هر کدام از عوامل تعیین شده، فازی سازی شده و وزنهایی برای تعیین درجه اهمیت هر کدام از لایهها تعیین گردید. سپس، نقشه پتانسیل تغییر برای سناریو تعریف شده تولید گردید (شکل ۵). شکل ۵ الف نشان دهنده نقشه پتانسیل تولید شده برای افزایش نواحی کشاورزی می باشد. همانطور که در شکل مشخص است، نواحی که نزدیکتر به



شکل ۴- لایههای مورد استفاده برای تعیین نقشه پتانسیل تغییر در حوزه آبخیز تالار شامل نقشههای (الف) شیب، (ب) تراز ارتفاع، (ج) جهت شیب، (د) فاصله به نزدیکترین جاده، (ه) فاصله به آبراهه، (و) فاصله به نواحی مسکونی، (ز) عرض جغرافیایی و (ح) نواحی حفاظت شده



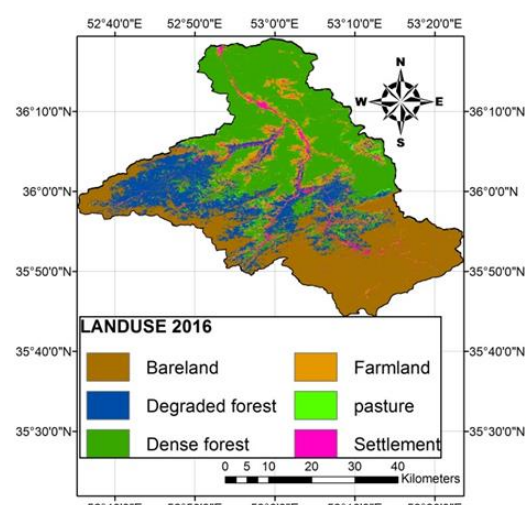
شکل ۵- نقشه تناسب به دست آمده برای (الف) توسعه کاربری کشاورزی (نواحی آبی رنگ نواحی حفاظت شده بوده که ماسک شده اند)، (ب) توسعه کاربری شهری و (ج) بدون پوشش گیاهی (نواحی قرمز جزو مناطق حفاظت شده محیط زیست هستند)

جدول ۲- ماتریس خطای تولید شده برای تصویر طبقه‌بندی شده سال ۲۰۱۶ سنجنده SENTINEL-2 MSI

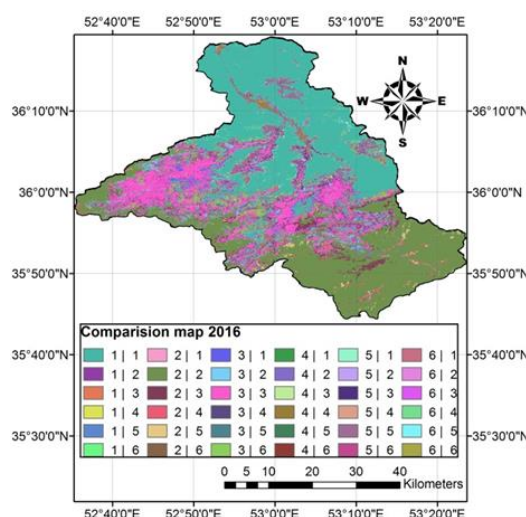
صحت کلی = ۸۷/۴۹٪				ضریب کاپا=۰/۸۴۵۱			
صحت زمینی (درصد)							
کلاس‌ها	جنگل پر تراکم	نواحی با پوشش	جنگل کم تراکم	مسکونی	زمین‌های کشاورزی	مراتع و علفزارها	کل
جنگل پر تراکم	۹۹/۴۸	۰	۰	۰	۰	۴/۵	۲۴/۲۶
نواحی با پوشش ناچیز	۰	۹۹/۰۱	۰	۲/۷۸	۰/۴۴	۰	۲۵/۱۷
جنگل کم تراکم	۰	۰	۷۶/۲۶	۰	۷/۰۲	۱۸/۹۲	۱۵/۷۳
مسکونی	۰	۰/۹۹	۰/۷۲	۹۲/۷۸	۰/۴۴	۰	۱۰/۹۹
زمین‌های کشاورزی	۰	۰	۲۱/۲۲	۴/۴۴	۷۲/۳۷	۲۱/۶۲	۱۶/۱۷
مراتع و علفزارها	۰/۵۲	۰	۱/۸	۰	۱۹/۷۴	۵۴/۹۵	۷/۱۴
کل	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
خطای اضافه شدگی	۱/۳	۱/۴۷	۱۴/۸۵	۴/۰۲	۳/۵۵	۴/۶	
خطای حذف‌شدگی	۰/۵۲	۰/۹۹	۲/۳۷	۷/۲۲	۲/۷۶	۴/۵	

احتمال مربوط به سال ۲۰۱۶ با استفاده تصویر سنجنده SENTINEL-2 MSI به کار گرفته شد (شکل ۶). ماتریس خطای تولید شده برای طبقه‌بندی این تصویر در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به صحت کلی^۱ (۸۷/۴۹٪) و کاپا^۲ (۰/۸۴۵۱) به دست آمده که به طور کلی نشان دهنده میزان درستی تصویر کاربری زمین بر اساس نقاط کنترل زمینی برای تصویر طبقه‌بندی شده سال ۲۰۱۶ و صحت هر کلاس است، این نقشه دارای کارایی مناسبی است. بنابراین، از این نقشه کاربری زمین تولید شده می‌توان به عنوان مرجع برای مقایسه نقشه کاربری زمین پیش‌بینی شده و بررسی صحت مدل استفاده کرد.

در نهایت با استفاده از مدل مارکوف-اتوماتای سلولی نقشه کاربری زمین پیش‌بینی شده برای سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۳۰ تولید شد. برای صحت سنجی نتیجه، نقشه کاربری زمین پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۱۶ توسط مدل مارکوف-اتوماتای سلولی توسط نقشه کاربری زمین تولید شده از طبقه‌بندی تصویر سنجنده SENTINEL-2 MSI ارزیابی گردید. شکل ۷ نشان دهنده مقایسه کلاس به کلاس بین دو تصویر می‌باشد. در این شکل، شماره ۱ تا ۶ به ترتیب نشان دهنده کلاس‌های کاربری جنگل‌های پرتراکم (Dense forest)، نواحی با پوشش ناچیز یا بدون پوشش (Bareland)، جنگل کم‌تراکم (Degraded forest)، مسکونی (Settlement)، زمین‌های کشاورزی (Farmland)، مراعات و علفزارها (Pasutire) می‌باشد. هر طبقه‌بندی در نقشه اصلی به طبقه‌بندی در نقشه پیش‌بینی ربط داده



شکل ۶- نقشه کاربری زمین تولید شده برای سال ۲۰۱۶ با استفاده از تصویر سنجنده SENTINEL-2 MSI



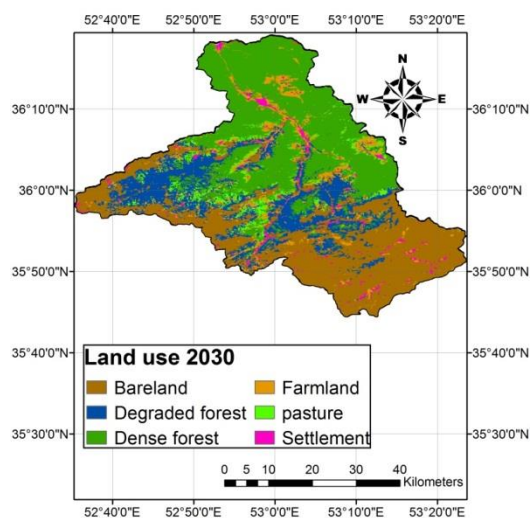
شکل ۷- تصویر مقایسه بین نقشه مرجع کاربری زمین و کاربری زمین تولید شده توسط مدل مارکوف-اتوماتای سلولی برای سال ۲۰۱۶

برای صحت‌سنجی نقشه کاربری زمین پیش‌بینی شده توسط این تحقیق، نقشه طبقه‌بندی شده با روش بیشینه

^۱ Overall accuracy

^۲ Kappa

شده در سال‌های آتی میزان زمین‌های با پوشش کم و مناطق مسکونی و مسقف افزایش می‌یابند. همچنین در ارتباط با کلاس کشاورزی ابتدا روند افزایشی بوده و پس از آن کاهش می‌یابد که می‌توان بخشی از آن را ناشی از اختصاص زمین‌های کشاورزی و باغ به کاربری مسکونی دانست. همچنین بخشی از کلاس کاربری جنگل پرتراکم (با توجه به مساحت زیاد این کلاس) کاهش یافته و بخش زیادی از کلاس جنگل کم‌تراکم کاهش یافته است که می‌توان بیان نمود که بیشتر این زمین‌ها که در قسمت‌های جنوبی حوضه قرار گرفته‌اند تبدیل به کلاس نواحی با پوشش ناچیز و بدون پوشش شده‌اند. همچنین کلاس مرتع نیز کاهش یافته که بخشی از آن را می‌توان ناشی از تبدیل آن به کاربری نواحی با پوشش کم دانست و بخشی دیگر ناشی از خطای طبقه‌بندی و مدل پیش‌بینی دانست.



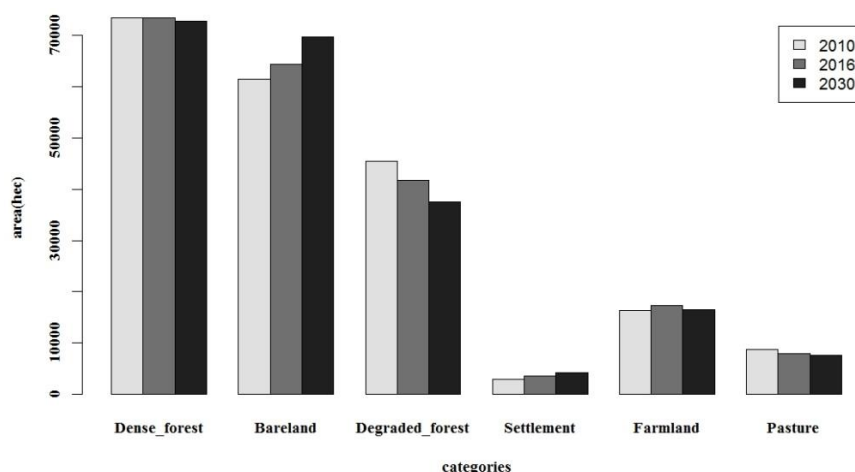
شکل ۸- نقشه کاربری زمین حوضه آبخیز تالار تولید شده برای سال ۲۰۳۰

شده است. برای مثال ۱/۲ نشان دهنده پیکسل‌هایی مربوط به کلاس کاربری جنگل پرتراکم در نقشه مرجع کاربری زمین است که برای آن‌ها کلاس کاربری نواحی با پوشش ناچیز پیش‌بینی شده است. چنانچه کلاس‌ها یکسان باشد، شماره‌ها یکسان و در غیر این صورت شماره‌ها غیر یکسان است که نشان دهنده این است که پیکسل‌ها در مدل درست پیش‌بینی نشده است. از طرفی جدول ۳ نشان دهنده تعداد پیکسل‌هایی است که در هر کلاس کاربری درست پیش‌بینی شده است، همچنین میزان کاپا به دست آمده بین مقایسه دو تصویر برابر ۰/۸۴ است. چنانچه در شکل ۷ و جدول ۳ مشاهده می‌شود بیشترین صحت در کلاس‌های کاربری جنگل پرتراکم و نواحی با پوشش ناچیز رخ داده است که از نظر تعداد پیکسل بیشترین تعداد را نیز به خود اختصاص داده است. همچنین، کمترین صحت مربوط به کلاس کاربری مراتع است که بخشی از خطا را می‌توان ناشی از عدم قطعیت در تعیین صحیح این کلاس در تصویر طبقه‌بندی شده مربوط به سال ۲۰۱۶ دانست.

با توجه به صحت قابل قبول به دست آمده برای تصویر سال ۲۰۱۶ اقدام به تولید نقشه کاربری زمین برای سال ۲۰۳۰ شد. شکل ۸ نشان دهنده تصویر کاربری زمین پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۳۰ است. به منظور بررسی تغییرات کاربری زمین تا سال ۲۰۳۰ مساحت اختصاص داده شده برای سه سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۶ و ۲۰۳۰ در شکل ۹ نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، کلاس‌های کاربری زمین زمین‌های با پوشش ناچیز و مسکونی در سال ۲۰۳۰ افزایش قابل توجهی داشته و این امر نشانگر این است که بر اساس فرآیند و سناریوی تعریف

جدول ۳- مقایسه ماتریسی بین دو تصویر مرجع تولید شده و پیش‌بینی شده توسط مدل برای سال ۲۰۱۶

دسته بندی (پیش‌بینی/مشاهداتی)	جنگل پر تراکم	نواحی با پوشش	جنگل کم تراکم	مسکونی	زمین‌های کشاورزی	مراتع و علفزارها	جنگل پر تراکم
جنگل پر تراکم	۷۴۲۲۴۴	۵۵	۲۲۱۳۲	۱۰۷۶	۳۴۴۸۱	۱۴۱۴۵	۸۱۴۱۳۳
نواحی با پوشش ناچیز	۱۹۸۸	۶۴۰۰۳۶	۳۹۳۹۳	۱۲۲۴۶	۲۰۱۶۴	۳۳۲	۷۱۴۱۵۹
جنگل کم تراکم	۱۶۵۱۵	۵۶۱۴۷	۳۰۶۵۵۵	۹۱۶۹	۶۹۷۸۷	۵۹۸۲	۴۶۴۱۵۵
مسکونی	۹۳	۱۴۷۶۰	۱۸۷۰	۱۵۸۲۷	۷۱۹۱	۴۸	۳۹۷۸۹
زمین‌های کشاورزی	۸۲۴۳	۲۴۵۳۹	۴۴۳۹۰	۹۹۵۳	۹۷۰۴۲	۹۰۹۱	۱۹۳۲۵۸
مراتع و علفزارها	۱۱۹۷۰	۱۰۷۲	۳۹۲۷۴	۵۳۳	۲۱۳۰۳	۱۴۱۴۴	۸۸۲۹۶
کل	۷۸۱۰۵۳	۷۳۶۶۰۹	۴۵۳۶۱۴	۴۸۸۰۴	۲۴۹۹۶۸	۴۳۷۴۲	۲۳۱۳۷۹۰



شکل ۹- تغییر مساحت (هکتار) هر کلاس کاربری زمین در طی دوره ۲۰۱۰، ۲۰۱۶ و ۲۰۳۰ برای حوضه تالار

۴- نتیجه گیری

تولید و پیش‌بینی نقشه کاربری زمین در حوضه‌های آبخیز می‌تواند کمک زیادی به درک عوامل تأثیر گذار بر حوضه آبخیز و شناسایی نواحی مستعد تغییر کاربری داشته باشد. همچنین چنین نقشه‌هایی می‌تواند به عنوان ورودی به مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف به کار گرفته شود. در این پژوهش، نقشه کاربری زمین برای حوضه آبخیز تالار در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۳۰ بر اساس اطلاعات تصاویر سنجنده Landsat 5 TM سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۰ و سناریو پتانسیل تغییر، پیش‌بینی شد. در این راستا، از روش ترکیبی زنجیره مارکوف و اتوماتای سلولی بهره گرفته شد. به منظور تولید نقشه تناسب یا پتانسیل تغییر از روش ارزیابی چند معیاره همراه با وزن‌دهی خطی و فازی سازی تصاویر بهره گرفته شده است. برای تولید ماتریس احتمال انتقال از زنجیره مارکوف استفاده شده است. جهت اختصاص تغییر مکانی هر کلاس کاربری از روش اتوماتای سلولی با فیلتر همسایگی 5×5 بهره‌گیری شد. سناریوی ترکیبی نوآورانه تعریف شده برای این پژوهش بر اساس گسترش نواحی مسکونی و شهری، گسترش نواحی فاقد یا با پوشش کم و همچنین گسترش زمین‌های کشاورزی بود. لذا نقشه تناسب کاربری بر اساس این سناریو تولید شد. وزن‌دهی عوامل تأثیرگذار بر اساس اهمیت آنها براساس این سناریو بوده است. نتایج به دست آمده نشانگر عملکرد خوب مدل مارکوف-اتوماتای سلولی با استفاده از ارزیابی چندمعیاره است. به منظور صحت‌سنجی تصویر طبقه‌بندی شده سال ۲۰۱۶ با استفاده از تصویر سنجنده SENTINEL-2 MSI تولید

شده و نتیجه تصویر پیش‌بینی شده سال ۲۰۱۶ به دست آمده با این تصویر مقایسه شد. بررسی ماتریس هماهنگی به دست آمده و همچنین کاپا حدود ۰/۸۴ نشانگر هماهنگی خوب این دو تصویر بود. در نهایت نقشه کاربری زمین برای سال ۲۰۳۰ تولید شد که نتایج نهایی نشان دهنده افزایش کاربری زمین‌های نواحی با پوشش کم و مسکونی بود. همچنین، کلاس کاربری کشاورزی پس از افزایش در سال ۲۰۱۶ در سال ۲۰۳۰ کاهش یافته است که می‌توان این مورد را ناشی از تبدیل این زمین‌ها به کلاس‌های کاربری مسکونی و نواحی با پوشش کم دانست. پیش‌بینی نقشه کاربری زمین برای سال‌های آتی می‌تواند کمک به درک رفتار حوضه‌های آبخیز و پیش‌بینی وضعیت آنها و عوامل تأثیر گذار بر آنها باشد. همچنین به عنوان پیشنهاد، نقشه‌های کاربری زمین پیش‌بینی شده می‌تواند در مدل‌های مختلف به عنوان ورودی به کار رود و نتیجه این تغییرات در رفتار محدوده و حوضه آبخیز بررسی گردد. همچنین به کارگیری ترکیب روش‌های مختلف، استفاده از لایه‌های اطلاعاتی بیشتر یا با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، یا استفاده از مدل‌های متنوع و مقایسه آنها در تولید نقشه‌های کاربری زمین می‌تواند منجر به تولید و پیش‌بینی نقشه‌ای دقیق‌تر گردد. به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت استفاده از روش پیش‌بینی کاربری زمین با استفاده از روش ترکیبی مارکوف-اتوماتای سلولی همراه با ارزیابی چندمعیاره با تعریف سناریو مشخص توسعه انواع کاربری در حوضه‌های آبخیز می‌تواند کارا بوده و کمک به درک بهتر حوضه‌ها و تأثیرپذیری آنها از عوامل مختلف کند.

- [1] D. M. Shriver and T. O. Randhir, "Integrating stakeholder values with multiple attributes to quantify watershed performance," *Water resources research*, vol. 42, no. 8, 2006.
- [2] E. Marshall and T. O. Randhir, "Spatial modeling of land cover change and watershed response using Markovian cellular automata and simulation," *Water Resources Research*, vol. 44, no. 4, 2008.
- [3] R. R. Rindfuss, S. J. Walsh, B. Turner, J. Fox, and V. Mishra, "Developing a science of land change: challenges and methodological issues," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 101, no. 39, pp. 13976-13981, 2004.
- [4] D. Guan, W. Gao, K. Watari, and H. Fukahori, "Land use change of Kitakyushu based on landscape ecology and Markov model," *Journal of Geographical Sciences*, vol. 18, no. 4, pp. 455-468, 2008.
- [5] P. H. Verburg, K. P. Overmars, M. G. Huigen, W. T. de Groot, and A. Veldkamp, "Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines," *Applied Geography*, vol. 26, no. 2, pp. 153-173, 2006.
- [6] A. Veldkamp and L. Fresco, "CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica," *Ecological modelling*, vol. 91, no. 1-3, pp. 231-248, 1996.
- [7] P. Ghosh et al., "Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling-A review," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2017.
- [8] X. Li and A. G.-O. Yeh, "Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems," *Environment and Planning A*, vol. 33, no. 8, pp. 1445-1462, 2001.
- [9] C. He, Q. Zhang, Y. Li, X. Li, and P. Shi, "Zoning grassland protection area using remote sensing and cellular automata modeling—a case study in Xilingol steppe grassland in northern China," *Journal of Arid Environments*, vol. 63, no. 4, pp. 814-826, 2005.
- [10] C. Hyandye and L. W. Martz, "A Markovian and cellular automata land-use change predictive model of the Usangu Catchment," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 1, pp. 64-81, 2017.
- [11] S. Deep and A. Saklani, "Urban sprawl modeling using cellular automata," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 17, no. 2, pp. 179-187, 2014.
- [12] M. Yagoub and A. A. Al Bizreh, "Prediction of land cover change using Markov and cellular automata models: case of Al-Ain, UAE, 1992-2030," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 42, no. 3, pp. 665-671, 2014.
- [13] S. Li, B. Jin, X. Wei, Y. Jiang, and J. Wang, "Using Ca-Markov Model to Model the spatiotemporal change of land use/cover in Fuxian Lake for decision support," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, no. 4, p. 163, 2015.
- [14] M. S. Mondal, N. Sharma, P. Garg, and M. Kappas, "Statistical independence test and validation of CA Markov land use land cover (LULC) prediction results," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 19, no. 2, pp. 259-272, 2016.
- [15] S. Borana and S. Yadav, "Prediction of Land Cover Changes of Jodhpur City Using Cellular Automata Markov Modelling Techniques," *International Journal of Engineering Science*, vol. 17, no. 11, pp. 15402-15406, 2017.
- [16] A. Naboureh, M. H. R. Moghaddam, B. Feizizadeh, and T. Blaschke, "An integrated object-based image analysis and CA-Markov model approach for modeling land use/land cover trends in the Sarab plain," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 10, no. 12, p. 259, 2017.

- [17] J. Huang, Y. Wu, T. Gao, Y. Zhan, and W. Cui, "An integrated approach based on Markov Chain and cellular automata to simulation of urban land use changes," *Applied Mathematics & Information Sciences*, vol. 9, no. 2, p. 769, 2015.
- [18] A. A. Al-sharif and B. Pradhan, "A novel approach for predicting the spatial patterns of urban expansion by combining the chi-squared automatic integration detection decision tree, Markov chain and cellular automata models in GIS," *Geocarto International*, vol. 30, no. 8, pp. 858-881, 2015.
- [19] H. Fathizad, N. Rostami, and M. Faramarzi, "Detection and prediction of land cover changes using Markov chain model in semi-arid rangeland in western Iran," *Environmental monitoring and assessment*, vol. 187, no. 10, p. 629, 2015.
- [20] P. Subedi, K. Subedi, and B. Thapa, "Application of a hybrid cellular automaton–Markov (CA–Markov) Model in land-use change prediction: a case study of saddle creek drainage Basin, Florida," *Applied Ecology and Environmental Sciences*, vol. 1, no. 6, pp. 126-132, 2013.
- [21] M. D BEHERA, S. N. Borate, S. N. Panda, P. R. Behera, and P. S. Roy, "Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA)–Markov model–A geo-information based approach," *Journal of earth system science*, vol. 121, no. 4, pp. 1011-1024, 2012.
- [22] C. Kamusoko, M. Aniya, B. Adi, and M. Manjoro, "Rural sustainability under threat in Zimbabwe–simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model," *Applied Geography*, vol. 29, no. 3, pp. 435-447, 2009.
- [23] H. Li and J. Reynolds, "Modeling effects of spatial pattern, drought, and grazing on rates of rangeland degradation: A combined Markov and cellular automaton approach," ed: New York: Lewis Publishers, 1997, pp. 211-230.
- [24] E. López, G. Bocco, M. Mendoza, and E. Duhau, "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: a case in Morelia city, Mexico," *Landscape and urban planning*, vol. 55, no. 4, pp. 271-285, 2001.
- [25] R. White and G. Engelen, "Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns," *Environment and planning A*, vol. 25, no. 8, pp. 1175-1199, 1993.
- [26] K. C. Clarke, J. A. Brass, and P. J. Riggan, "A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction," 1994.
- [27] J. J. Arsanjani, M. Helbich, W. Kainz, and A. D. Boloorani, "Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 21, pp. 265-275, 2013.
- [28] S. W. Myint and L. Wang, "Multicriteria decision approach for land use land cover change using Markov chain analysis and a cellular automata approach," *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 32, no. 6, pp. 390-404, 2006.
- [29] Z. Hu and C. Lo, "Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 667-688, 2007.
- [30] F. Sangermano, J. R. Eastman, and H. Zhu, "Similarity Weighted Instance-based Learning for the Generation of Transition Potentials in Land Use Change Modeling," *Transactions in GIS*, vol. 14, no. 5, pp. 569-580, 2010.
- [31] G. Fischer and L. Sun, "Model based analysis of future land-use development in China," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 85, no. 1, pp. 163-176, 2001.
- [32] E. J. Bell and R. Hinojosa, "Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 13-17, 1977.
- [33] E. Wood, G. G. Tappan, and A. Hadj, "Understanding the drivers of agricultural land use change in south-central Senegal," *Journal of Arid Environments*, vol. 59, no. 3, pp. 565-582, 2004.

- [34] H. S. Moghadam and M. Helbich, "Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model," *Applied Geography*, vol. 40, pp. 140-149, 2013.
- [35] J. R. Eastman, *IDRISI Kilimanjaro: guide to GIS and image processing*. Clark Labs, Clark University Worcester, 2003.
- [36] S. J. Carver, "Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems," *International Journal of Geographical Information System*, vol. 5, no. 3, pp. 321-339, 1991.
- [37] J. R. Eastman, H. Jiang, and J. Toledano, "Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS," *Environment and Management*, vol. 9, pp. 227-252, 1998.
- [38] T. L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *Journal of mathematical psychology*, vol. 15, no. 3, pp. 234-281, 1977.
- [39] M. Rao et al., "A weighted index model for urban suitability assessment—a GIS approach," *Bombay Metropolitan Regional Development Authority*, Bombay, 1991.
- [40] H. Voogd, *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Pion London, 1983.
- [41] N. Moreno, F. Wang, and D. J. Marceau, "Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 44-54, 2009.
- [42] A. Ilachinski, *Cellular automata: a discrete universe*. World Scientific Publishing Co Inc, 2001.
- [43] J. Eastman, M. Van Fossen, and L. Solarzano, "Transition potential modeling for land cover change," *GIS, spatial analysis and modeling*, pp. 357-386, 2005.