



دوره‌ی ۳۴، شماره‌ی ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۳۲، پاییز ۱۴۰۰، صفحه‌های ۱۱۵-۱۳۲
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2021.128644.1288

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آبخیزداری

مدل‌سازی تغییر کاربری زمین با مدل‌ساز و پیش‌بینی وضعیت سال ۱۴۰۹ در سرآب آبخیز سیاه‌رود

به‌نوش جعفری‌گرزین

دانشجوی دوره‌ی دکترای علوم و مهندسی آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، واحد پردیس

عطاالله کاویان

(نویسنده‌ی مسئول)* استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و

منابع طبیعی ساری

کریم سلیمانی

استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: ataollah.kavian@gmail.com

تاریخ دریافت: ۲۰ آذر ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۳۰ آذر ۱۳۹۹

چکیده

برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه‌ی زمین، مستلزم به‌روزرسانی اطلاعات تغییر کاربری در طول زمان است. کاربرد توانمندی‌های سنجش‌از‌دور و مدل‌ساز تغییر زمین (ال‌سی‌ام) بستر مناسبی برای شبیه‌سازی تغییر کاربری زمین ایجاد می‌کند. تغییر کاربری زمین در منطقه‌ی سرآب آبخیز سیاه‌رود در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۴-۱۳۵۶ با مدل‌ساز ارزیابی، و سپس کاربری زمین برای سال ۱۴۰۹ شبیه‌سازی شد. نقشه‌های کاربری زمین سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ با روش‌های طبقه‌بندی نظارت نشده و نظارت‌شده‌ی تصویرهای ماهواره‌ی لندست تهیه، و مدل‌ساز تغییر زمین برای سه دوره‌ی زمانی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ و ۱۳۷۷-۱۳۶۷ و ۱۳۸۸-۱۳۷۷ در قالب سه مدل اجرا شد. پس از ارزیابی عمل‌کرد این مدل‌ها، مناسب‌ترین آن برای پیش‌بینی تغییر کاربری زمین انتخاب، و با کاربرد داده‌های دوره‌ی ۱۳۹۴-۱۳۸۸ پیش‌بینی برای سال ۱۴۰۹ انجام شد. نتیجه‌ی این پژوهش بیان‌گر آن است که کاربرد ورودی‌های مناسب برای مدل‌ساز تغییر زمین، به‌کارگیری روش‌های ترکیبی در طبقه‌بندی، و بهره‌گیری از دانش کارشناسی می‌تواند در بهبود نتیجه‌ی طبقه‌بندی تصویرهای ماهواره‌ی و افزایش کارایی ال‌سی‌ام موثر باشد (ضریب کاپای ۰/۸۲ تا ۰/۹۱). پیش‌بینی تغییر کاربری زمین در منطقه‌ی سرآب آبخیز سیاه‌رود در بازه‌ی زمانی ۱۳۵۶ تا ۱۴۰۹ بیان‌گر کاهش ۶۷٪ سطح زمین شالیزاری، کاهش ۱۲٪ سطح جنگل، ۳۴٪ برابر شدن وسعت زمین مخلوط زراعت و باغ، و ۳ برابر شدن وسعت منطقه‌های مسکونی است.

واژگان کلیدی: آشکارسازی تغییر، تحلیل چندزمانه، تصویرهای ماهواره‌ی، رودخانه‌ی سیاه‌رود

مقدمه

ایجاد تغییر وسیع در پوشش گیاهی و کاربری زمین، سبب ناپایداری و تخریب محیط‌زیست در بسیاری از آبخیزها شده است. در راستای توسعه‌ی متوازن و پایدار و بهره‌برداری مطلوب از زمین، پایش و نظارت تغییر کاربری در طول زمان ضروری و اجتناب‌ناپذیر است (بابر و همکاران ۲۰۲۰). این مساله به‌ویژه در جاهایی مانند بخش سرآب آبخیز سیاه‌رود، که به‌دلیل رشد جمعیت و نزدیک‌بودن به منطقه‌ی توسعه‌ی شهری در دهه‌های گذشته به‌گسترده‌گی تغییر کرده است، اهمیت ویژه‌ی دارد. مدل‌سازی تغییر کاربری زمین دانش لازم برای ارزیابی و شناخت فرآیند تغییر را فراهم کرده است، و پیش‌بینی آن و جانمایی منطقه‌های محتمل برای تغییر را امکان‌پذیر می‌کند. مدل‌ساز تغییر زمین (ال‌سی‌ام)^۱ ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی تغییر کاربری زمین است، و در بسیاری از پژوهش‌ها در ایران و سایر کشورها به‌کاربرده شده است (خوی و مورایاما ۲۰۱۰، عزیزی قلاتی و همکاران ۲۰۱۴، میشرا ۲۰۱۴، فلاحتکار و همکاران ۲۰۱۶، ناث و همکاران ۲۰۲۰).

نتیجه‌ی پردازش و مقایسه‌ی داده‌های سطح جنگل‌زدایی منطقه‌ی آمازون در برزیل با داده‌های ماهواره‌ی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۳ و پیش‌بینی تغییر در سال ۲۰۳۰ با ال‌سی‌ام (آمارالاسیلوا و همکاران ۲۰۲۰) بیان‌گر ارتباط بین افزایش تاثیر فعالیت‌های انسانی و سطح تخریب است. مهم‌ترین عامل‌های محرک در زیرمدل توان انتقال در ال‌سی‌ام، فاصله از جاده، فاصله از راه‌آهن، فاصله از آبراه (محرک‌های ایستا)، و فاصله از زمین کشاورزی و فاصله از منطقه‌های حضور دام (محرک‌های پویا) است.

ارزیابی تغییر کاربری زمین و پیش‌بینی ۳۰ سال آینده با ال‌سی‌ام در بخش نارمادادر ایالت گجرات هند (گوپتا و شارما ۲۰۲۰) نشان داد که پوشش گیاهی طبیعی بیش‌تر تخریب شده و به زمین‌های کشاورزی تبدیل شده است. متغیرهایی مانند شیب، جهت شیب، تراکم جمعیت، با اندازه‌های ضریب کرامر بیش‌تر از ۰/۱ محرک‌های مناسب برای محاسبه‌ی توان انتقال‌اند. اگرچه محرک‌هایی مانند مدل رقومی ارتفاع، فاصله از جاده‌ها، فاصله از پیکره‌های آبی، و فاصله از سکونتگاه‌ها، با اندازه‌های ضریب کرامر کم‌تر از ۰/۱ نیز برای مدل‌سازی انتقال به‌کاربرده شده است.

نتیجه‌ی ارزیابی تغییر و رشد محدوده‌ی شهری کلان‌شهر اتوکپو، نیجریه، با کاربرد ال‌سی‌ام (ژاندی و همکاران ۲۰۲۰) بیان‌گر آن است که تغییر کاربری تا سال ۲۰۳۰ در آن منطقه همراه با توسعه‌ی زمین دیم، زمین باغی، و منطقه‌های مسکونی است، و سطح زمین جنگلی و مرتعی کاهش خواهد یافت. محرک‌هایی مانند احتمال بودن شاهد تغییر^۲، تراکم جمعیت شهری، فاصله

از راه‌آهن و مدل رقومی ارتفاع مهم‌ترین عامل‌های شکل‌دهی رشد شهری در زیرمدل‌های توان انتقال در روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه‌ی زنجیره‌ی مارکف است. پیش‌بینی تغییر و سرعت شهرنشینی منطقه‌های گوانگدونگ، هنگ‌کنگ، و ماکائو در جنوب چین با کاربرد ال‌سی‌ام (هسن و همکاران ۲۰۲۰) نشان داد که وسعت منطقه‌ی شهری در دوره‌ی ۲۰۰۷-۲۰۱۷ با نرخ سالانه‌ی ۴/۷۲٪ افزایش یافت، و با توجه به این روند، نسبت زمین شهری از ۱۰/۳۱٪ وسعت در ۲۰۱۷ به ۱۶/۳۰٪ در ۲۰۳۱ خواهد رسید. از این‌رو آگاهی از تغییر کاربری زمین و پیش‌بینی وضعیت آینده به سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری‌ها در راستای حفظ منابع طبیعی و توسعه‌ی پایدار کمک می‌کند.

تغییر سیمای سرزمین در آبخیز تالار در شمال ایران با کاربرد ال‌سی‌ام (ذبیحی و همکاران ۲۰۲۰) بیان‌گر آن است که تغییر کاربری زمین تا سال ۲۰۳۰ همراه با توسعه‌ی زمین دیم، زمین باغی، و منطقه‌های مسکونی است، و سطح زمین جنگلی و مرتعی کاهش خواهد یافت. عامل‌هایی مانند مدل رقومی ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، فاصله از زمین دیم، فاصله از جنگل، فاصله از مرتع، فاصله از منطقه‌ی مسکونی، و احتمال بودن شاهد تغییر مهم‌ترین محرک‌ها برای مدل‌سازی توان تغییر در روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه-زنجیره‌ی مارکف برای پیش‌بینی کاربری زمین در سال ۲۰۳۰ است.

بررسی منابع نشان می‌دهد که اگرچه نتیجه‌ی کاربرد ال‌سی‌ام برای آشکارسازی و پیش‌بینی تغییر کاربری زمین پذیرفتنی است، داده‌های ماهواره‌ی با توان تفکیک مکانی، طیفی و زمانی متنوعی به‌کاربرده شده است، و نقشه‌های کاربری تهیه‌شده از این تصویرها از نظر صحت متفاوت‌اند. زیرمدل‌ها و محرک‌های متفاوتی در ال‌سی‌ام به‌کاررفته است. زیرمدل‌های انتقال از یک کاربری به کاربری دیگر متفاوت است و عامل‌های محرک متنوعی با دامنه‌ی متفاوت ضریب همبستگی به‌کاربرده شده است.

هدف از این پژوهش ارزیابی تغییر کاربری زمین و پیش‌بینی تغییر آینده با مدل‌ساز تغییر زمین در منطقه‌ی سرآب آبخیز سیاه‌رود، و به‌دست‌آوردن اطلاعات کاربردی برای مدیریت بهینه‌ی این زمین است. به‌علاوه در این پژوهش با به‌کارگیری کم‌ترین متغیرهای محرک مناسب، برای ایجاد زیرمدل‌های توان انتقال، به‌کارگیری نقشه‌های کاربری زمین تصحیح شده با روش‌های پس‌پردازش و دانش کارشناسی و اطلاعات کمکی، نتیجه‌ی بهتری از اجرای مدل گرفته شود.

1 - Land Change Modeler

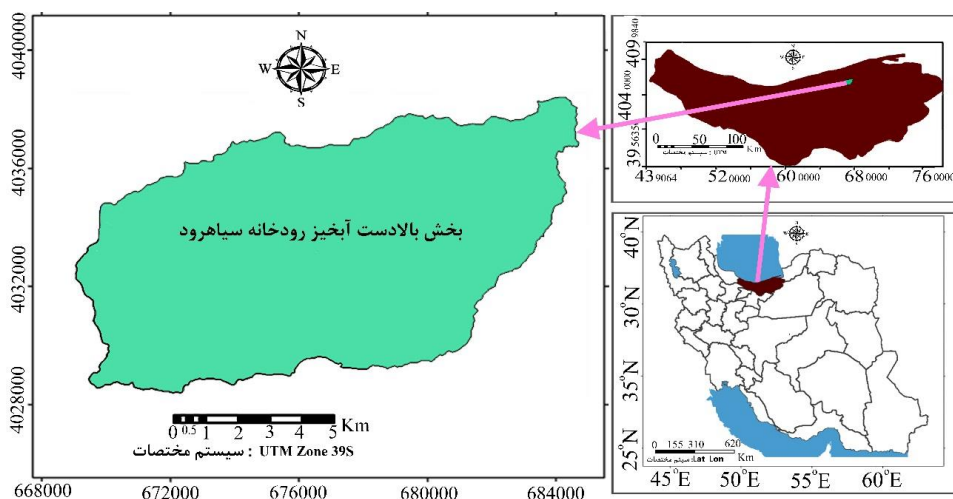
2 - Evidence likelihood to change

میلی متر، متوسط دمای سالانه $17/9^{\circ}\text{C}$ ، و آب و هوا براساس روش دومارتن معتدل است (اداره کل هواشناسی مازندران ۲۰۲۰) و کاربری زمین آن جنگل پهن‌برگ، زمین شالیزاری، زمین مخلوط زراعت و باغ، باغ مرکبات، آب‌بندان و منطقه‌های مسکونی است (مدیریت آبخیزداری سازمان جهاد سازندگی مازندران ۲۰۰۲).

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی پژوهش

محدوده‌ی بررسی شده بخش سرآب آبخیز سیاه‌رود ($36^{\circ}28'$ تا $36^{\circ}23'$ عرض شمالی و $52^{\circ}53'$ تا $53^{\circ}04'$ طول شرقی، مساحت حدود ۱۰۰۰۰ هکتار) در جنوب قائمشهر در استان مازندران است (شکل ۱). میانگین بارندگی آبخیز ۶۶۴/۸



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی پژوهش: بخش سرآب آبخیز سیاه‌رود.

برده‌شد. موقعیت مکانی پدیده‌ها و کاربری‌های فعلی برای اجرای تصحیح‌های هندسی تصویرهای ماهواره‌یی، تهیه‌ی نقشه‌ی نمونه‌های آموزشی و نقشه‌ی واقعیت زمینی با جی‌پی‌اس ثبت شد. این داده‌ها در قالب پرونده‌های رقومی در نرم‌افزارهای آرک جی‌آی‌اس 10.3 و ایدرسی سلوا^۳ ویرایش، پردازش و از نظر توان تفکیک مکانی همسان‌سازی شد، و برای اجرای ال‌سی‌ام به کار برده‌شد.

داده‌های ماهواره‌ی لندست ۲، ۴، ۵ و ۸ با تصویر سنجنده‌های ام‌اس‌اس، تی‌ام، و اوآل‌آی به کار برده‌شد (جدول ۱). برای افزایش صحت نقشه‌های خروجی پدیده‌ها و کاهش خطای طبقه‌بندی داده‌های کمکی شامل عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰۰ سال ۱۳۴۵، نقشه‌های پستی بلندی ۱/۵۰۰۰۰ سال‌های ۱۳۵۷ و ۱۳۷۳، نقشه‌های پستی بلندی ۱/۲۵۰۰۰ سال ۱۳۶۱، گزارش‌ها و اطلاعات توصیفی، دانش کارشناسی و مشاهده‌های میدانی به کار

جدول ۱ - مشخصات تصویرهای ماهواره‌یی به کار برده‌شده.

توان تفکیک مکانی تصویر (متر)	نوار (باند) های به کاررفته	شماره‌ی گذر و ردیف	تاریخ تصویر	سنجنده	شماره‌ی ماهواره‌ی لندست	تاریخ تصویر
۵۷	۷-۴	۱۷۶/۳۵	۱۳۵۶/۴/۲۲	MSS	۲	۱۳۵۶/۴/۲۲
۲۸/۵	۷ و ۵-۱	۱۶۴/۳۵	۱۳۶۷/۶/۲۸	TM	۴	۱۳۶۷/۶/۲۸
۳۰	۷ و ۵-۱	۱۶۴/۳۵	۱۳۷۷/۲/۲۸	TM	۵	۱۳۷۷/۲/۲۸
۳۰	۷ و ۵-۱	۱۶۳/۳۵	۱۳۸۸/۴/۵	TM	۵	۱۳۸۸/۴/۵
۳۰	۷ و ۶-۲	۱۶۳/۳۵	۱۳۹۴/۳/۵	OLI	۸	۱۳۹۴/۳/۵

۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ شامل تصحیح‌های بازتاب‌سنجی (حذف خطای بن‌بند شدن در تصویرهای MSS سال ۱۳۵۶) و نیواری (جوی)، تصحیح‌های هندسی و بارزسازی تصویرها، نسبت‌گیری

روش پژوهش

برای تهیه‌ی نقشه‌ی کاربری زمین دوره‌های زمانی پیش‌پردازش باندهای مختلف تصویر مقطع‌های زمانی ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷،

و Π_j تعداد نقطه‌های تصویر (پیکسل) ستون j ام اند. نقشه‌های تولیدشده با صحت مطلوب در مرحله‌ی بعد ورودی‌های ال‌سی‌ام گرفته شد. نمودار جریان‌ی تهیه‌ی نقشه‌های کاربری زمین در شکل ۲ آورده شده است.

مدل‌ساز تغییر زمین ابزاری جامع برای تحلیل تغییر در گذشته و پیش‌بینی تغییر در آینده است که در نرم‌افزار ایدرسی توسعه‌یافته است. این مدل در چند مرحله شامل آشکارسازی و تحلیل تغییر، مدل‌سازی توان انتقال، مدل‌سازی تغییر کاربری زمین، و پیش‌بینی و ارزیابی صحت مدل اجرا می‌شود (جاگانات ۲۰۱۹، هسن و همکاران ۲۰۲۰، عفیفی ۲۰۲۰، یوسفی و همکاران ۲۰۲۰). نقشه‌های کاربری زمین سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷ و ۱۳۸۸ برای واسنجی مدل‌ساز تغییر زمین در نرم‌افزار ایدرسی در قالب سه دوره‌ی زمانی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ و ۱۳۷۷-۱۳۶۷ و ۱۳۸۸-۱۳۷۷ به کار برده شد. پس از تعیین کردن مناسب‌ترین مدل، داده‌های دوره‌ی ۱۳۹۴-۱۳۸۸ برای پیش‌بینی سال ۱۴۰۹ به کار برده شد.

تغییر کاربری زمین برای سه بازه‌ی زمانی ۱۳۶۷-۱۳۵۶، ۱۳۷۷-۱۳۶۷ و ۱۳۸۸-۱۳۷۷ آشکارسازی و تحلیل شد، کاهش و افزایش و تغییر خالص کاربری‌ها محاسبه، و نقشه‌های تغییر و انتقال برای هر بازه‌ی زمانی جداگانه تهیه شد.

منظور از توان انتقال، ظرفیت کاربری برای تغییر به نوع دیگر است. توان انتقال تحت تاثیر متغیرها یا عامل‌های محرک زیادی است، و شامل دو دسته‌ی کلی متغیرهای ایستا (با گذشت زمان تغییر نمی‌کند) و متغیرهای پویا (وابسته به زمان است) و با گذشت زمان تغییر می‌کند) تفکیک می‌شود (میشرا و همکاران ۲۰۱۴). اهمیت و اندازه‌ی تاثیر هر عامل محرک با محاسبه‌ی ضریب همبستگی کرامر ارزیابی می‌شود. متغیرهایی که ضریب همبستگی کرامر آن‌ها به ۰/۱۵ نزدیک است متغیرهای کاربردی، و متغیرهایی که ضریب همبستگی کرامر آن ۰/۴ یا بیش‌تر است متغیر خوب برای مدل‌سازی توان انتقال دانسته می‌شود (ایستمن ۲۰۱۲، لیلند ۲۰۱۴، هسن و همکاران ۲۰۲۰، ژاندی و همکاران ۲۰۲۰). برای ارزیابی متغیرهای کیفی مانند نوع کاربری زمین، نقشه‌ی کاربری زمین به شکل لایه‌ی بی واحد و متغیری یکپارچه و کمی با عنوان احتمال وجود شاهد تغییر مانند سایر متغیرها، با کاربرد ضریب همبستگی کرامر ارزیابی شد (ایستمن ۲۰۱۲، ژاندی و همکاران ۲۰۲۰). این زیرمدل‌ها با روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، مدل‌سازی و ارزیابی، و نقشه‌های توان انتقال آن تولید شد (مگاهد و همکاران ۲۰۱۵، هسن و همکاران ۲۰۲۰). شبکه‌ی

نوار(باند)ها، شاخص‌های پوشش گیاهی، و تحلیل مولفه‌های اصلی برای تولید نوارهای ترکیبی مناسب انجام شد. برای ارزیابی اولیه‌ی کاربری‌های منطقه، طبقه‌بندی نظارت‌نشده به روش ایزودیتا^۴ اعمال شد و نقشه‌ی کاربری‌های مختلف، نامشخص بودن نوع کاربری و تنها براساس تفاوت آماره‌های نقطه‌های تصویر (پیکسل) و انتخاب تعداد طبقه‌ی کاربری‌های به وسیله‌ی کاربر برای همه‌ی مقطع‌های زمانی تولید شد. طبقه‌بندی نظارت‌شده با به‌کارگیری نمونه‌های آموزشی و الگوریتم بیشینه‌ی احتمال با شش طبقه‌ی کاربری شامل جنگل پهن‌برگ، باغ مرکبات، زمین مخلوط زراعت و باغ، زمین شالیزاری، پیکره‌های آبی و منطقه‌های مسکونی انجام شد. پس از اجرای طبقه‌بندی‌ها، برای افزایش صحت نقشه‌های تولیدشده، تصحیح‌های پس‌پردازش بر نقشه‌ها اعمال شد. ضمن حذف کردن سطح‌های کوچک و نقطه‌های تصویر (پیکسل) منفرد در فرآیند فیلتر کردن و عمومی‌سازی، سعی شد ضمن رعایت کردن کم‌ترین تغییر دستی، با بهره‌گیری از دانش کارشناسی و شناخت از تغییر زمانی عارضه‌ها و پدیده‌ها، با رقوم‌سازی روی صفحه‌ی نمایش گر^۵ (چادهاری و کومار ۲۰۱۷)، نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده بهبود، و خطاها کاهش یابد. نقشه‌های کاربری زمین/پوشش زمین برای سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ تهیه شد.

کاربرد نقشه‌های استخراج شده از تصویرهای ماهواره‌ی نیازمند ارزیابی صحت آن‌ها است. نقشه‌ی چندضلعی نمونه‌های واقعیت زمینی در هر مقطع زمانی با کاربرد عکس‌های هوایی، نقشه‌های پستی‌بلندی همان مقطع زمانی، و اطلاعات میدانی و دانش کارشناسی تهیه شد، و با انطباق دادن این نقشه‌ها با نقشه‌های کاربری زمین استخراج شده از تصویرهای ماهواره‌ی همان سال، ماتریس خطا یا ماتریس درهمی^۶ ایجاد شد (لیلسند ۲۰۱۴). صحت طبقه‌بندی با معیار صحت کلی، خطای حذف، خطای طبقه‌بندی و ضریب کاپا (رابطه‌ی ۱) محاسبه و ارزیابی شد (کانگتون و گرین ۲۰۱۹).

$$K = \frac{n \sum_{i=j=1}^r n_{ij} - \sum_{i=1}^r n_i n_j}{n^2 - \sum_{i=1}^r n_i n_j} \quad 1$$

K ضریب کاپا، n تعداد کل نقطه‌های تصویر (پیکسل) در ماتریس خطا، r تعداد ردیف (تعداد طبقه‌های کاربری زمین)، i شماره‌ی ردیف و j شماره‌ی ستون، n_{ij} تعداد نقطه‌های تصویر (پیکسل) در قطر چارچوب، n_i تعداد نقطه‌های تصویر (پیکسل) سطر i ام،

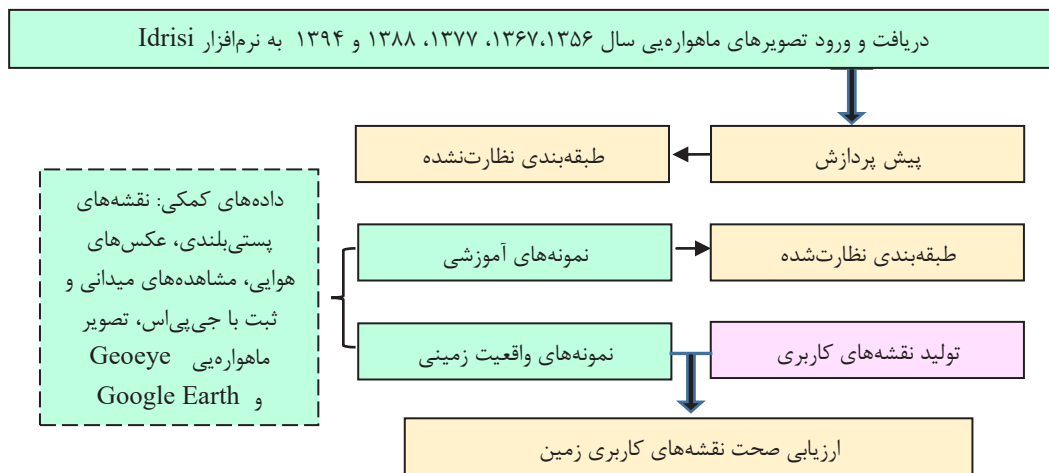
4 - Isodata
5 - On screen digitizing
6 - Confusion Matrix

کمیت مساحت تغییر کاربری زمین در زمان آینده با کمیت تغییر در زمان گذشته، با محاسبه‌ی چارچوب احتمال تغییر هر کاربری به کاربری دیگر پیش‌بینی می‌شود. کاربرد هر مدل نیازمند واسنجی و سنجش اعتبار مدل است. برای اعتبارسنجی مدل با ضریب کاپا کار کرده شد. هم‌خوانی نقشه‌های پیش‌بینی با نقشه‌ی واقعیت زمینی در همان مقطع زمانی محاسبه شد (لوسیری و همکاران ۲۰۱۶، جاگانات و همکاران ۲۰۱۹، شوشتری و همکاران ۲۰۱۹، لی و همکاران ۲۰۲۰).

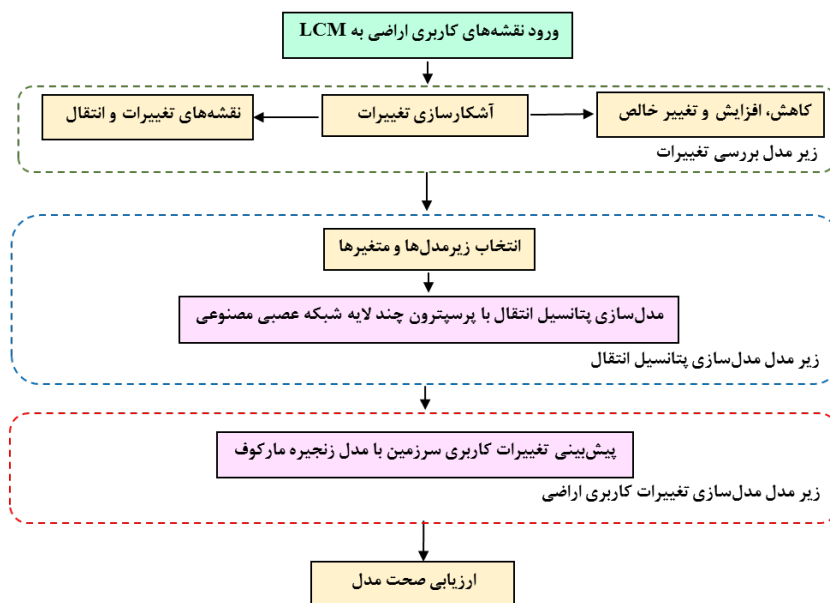
مدل مناسب نهایی برای پیش‌بینی کاربری زمین با انطباق دادن نقشه‌های پیش‌بینی هر دوره با نقشه‌های واقعیت زمینی آن و محاسبه‌ی ضریب کاپا که بیش‌ترین ضریب کاپا را دارد انتخاب شد. در شکل ۳ نمودار جریان‌ی اجرای مدل برای هر سه دوره‌ی ارزیابی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ و ۱۳۷۷-۱۳۶۷ و ۱۳۸۸-۱۳۷۷ آورده شده است.

عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه سامانه‌ی پردازش اطلاعاتی است با ساختاری لایه‌ی شامل لایه‌ی ورودی، لایه‌ی پنهان و لایه‌ی خروجی، و نوعی شبکه‌ی پیشخور^۷ است. در این شبکه‌ها اقدام‌های یادگیری و پردازش داده‌ها به جلو از لایه‌ی ورودی به خروجی شکل می‌گیرد (دستورانی و افخمی ۲۰۱۱). برای افزایش دقت و دستیابی به ساختار بهینه، ترکیب مختلف داده‌های ورودی به شکل آزمون و خطا به کار برده شد (تنهاپور و بنی‌حبيب ۲۰۱۸).

برای مدل‌سازی تغییر کاربری زمین روش زنجیره‌ی مارکوف به کار برده شد. در این روش نقشه‌های کاربری زمین تجزیه‌تحلیل شد، و یک خروجی به شکل چارچوب احتمالی تغییر، و یک تصویر خروجی برای سال هدف داده شد (لوسیری و همکاران ۲۰۱۶، کاویان و همکاران ۲۰۱۷، ناث و همکاران ۲۰۲۰). در روش مارکوف فرض می‌شود که وضعیت (کاربری) سلول معین در زمان بعدی تنها با وضعیت (کاربری) آخرین مرحله مرتبط است (گاناریدیس و همکاران ۲۰۱۹، گوان و همکاران ۲۰۱۹).



شکل ۲- جریانی تولید نقشه‌های کاربری زمین سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴.

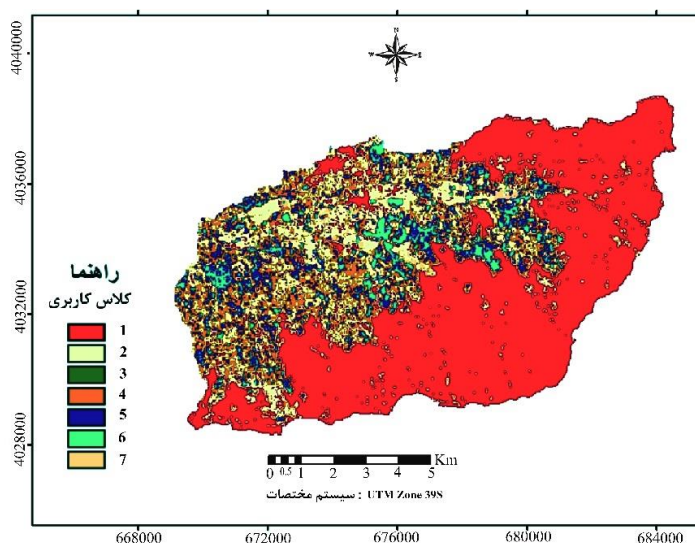


شکل ۳- جریان اجرای ال سی ام برای هر دوره ی ارزیابی.

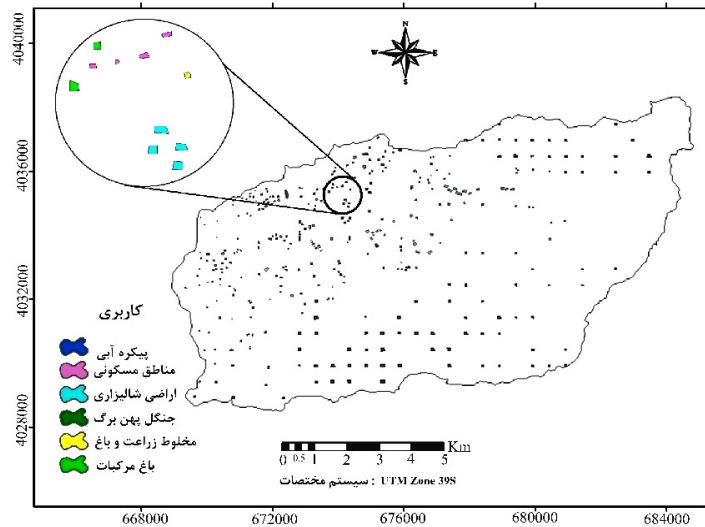
۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ به ترتیب با ۱۲۸۰، ۵۱۲۹، ۵۲۵۰، ۵۲۶۵ و ۱۰۵۵ نقطه ی تصویر و شش طبقه ی کاربری، با کاربرد داده های کمکی و دانش کارشناسی تهیه شد (شکل ۵ نمونه های آموزشی مربوط به سال ۱۳۹۴). طبقه بندی نظارت شده برای هر دوره با الگوریتم بیشینه ی احتمال اجرا شد، و تصحیح های پس پردازش برای کاهش خطاها و بهبود یافتن نقشه های تولید شده انجام شد. در شکل ۶ نقشه های کاربری زمین برای سال های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ با شش طبقه ی کاربری نشان داده شده است.

نتایج

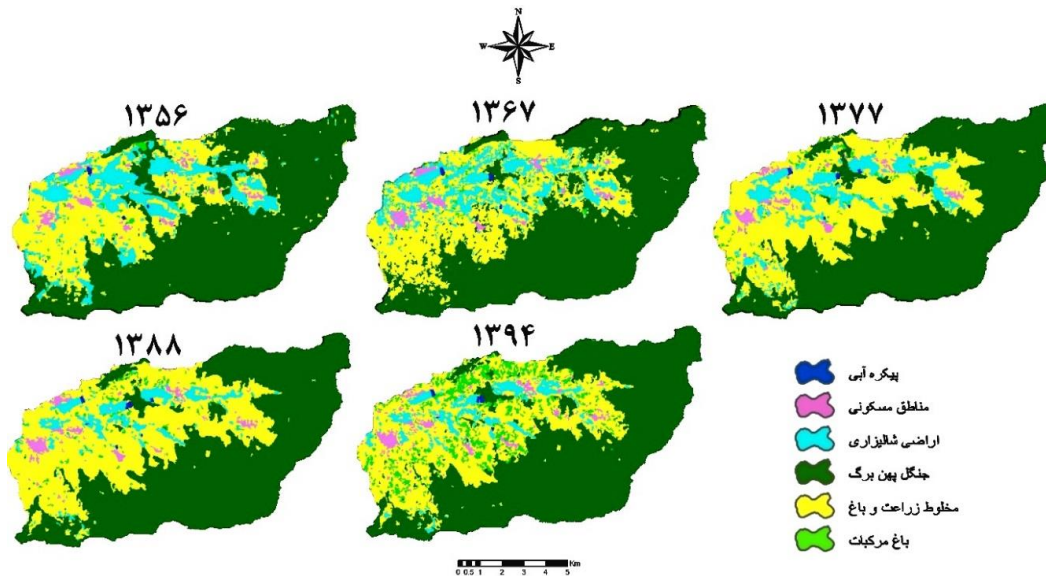
پس از پیش پردازش تصویرهای ماهواره ای هر مقطع زمانی، طبقه بندی نظارت نشده ی ایزودیتا با ۷ طبقه ی کاربری اجرا شد. این نقشه ها ضمن نمایش اطلاعات کلی، بر پایه ی گستردگی و تنوع کاربری ها الگوی مناسبی برای انتخاب نمونه های آموزشی برای طبقه بندی نظارت شده می دهد. برای نمونه در شکل ۴ نقشه ی طبقه بندی نظارت نشده ی ایزودیتای سال ۱۳۷۷ نشان داده شده است. برای اجرای طبقه بندی نظارت شده نقشه های چندضلعی نمونه های آموزشی برای سال های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷،



شکل ۴- نقشه ی طبقه بندی نظارت نشده ی ایزودیتا با ۷ طبقه ی کاربری سال ۱۳۷۷.



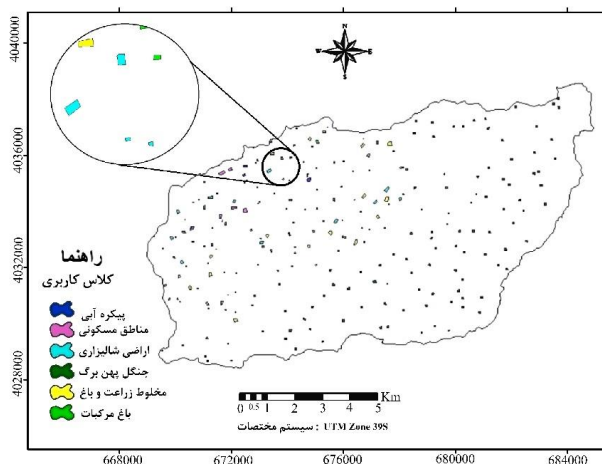
شکل ۵- یک نمونه از نقشه‌ی چندضلعی نمونه‌های آموزشی سال ۱۳۹۴.



شکل ۶- نقشه‌های کاربری زمین/پوشش زمین برای سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴.

طبقه‌بندی کاربری و نقشه‌ی واقعیت‌زمینی همان سال ارزیابی شد (جدول ۲). اندازه‌های ضریب کاپا در جدول ۲ نشان می‌دهد که صحت نقشه‌های استخراج‌شده‌ی سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ به ترتیب با ضریب کاپای ۰/۸۵، ۰/۸۲، ۰/۸۴، ۰/۸۷ و ۰/۹۱ برای استفاده در مرحله‌های بعدی پژوهش مناسب است (ژاندی و همکاران ۲۰۲۰).

برای ارزیابی صحت نقشه‌های تولیدشده، نمونه‌های واقعیت زمینی برای سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ به ترتیب با ۳۴۹۳، ۹۷۲، ۸۰۱، ۶۷۹ و ۱۷۳۱ نقطه‌ی تصویر و شش طبقه‌ی کاربری با داده‌های کمکی و دانش کارشناسی تهیه شد (شکل ۷ نمونه‌های واقعیت زمینی سال ۱۳۶۷). صحت نقشه‌ها با ایجاد ماتریس اشتباه به دست آمده از انطباق نقشه‌های



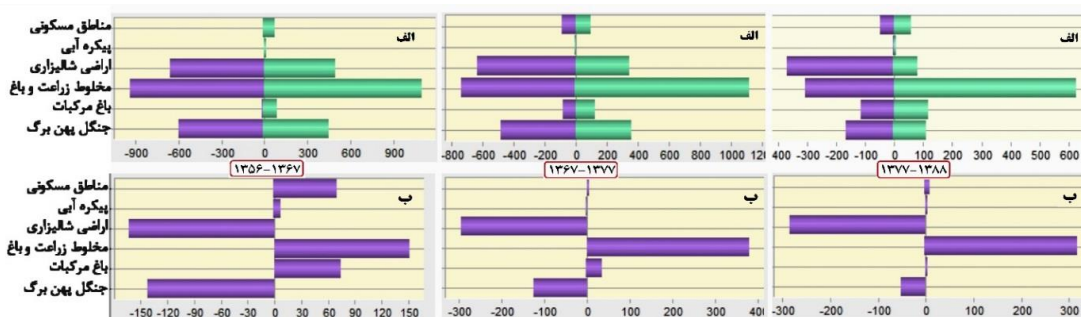
شکل ۷- نمونه‌یی از نقشه‌ی چندضلعی نمونه‌های واقعیت زمینی سال ۱۳۶۷.

جدول ۲- ارزیابی صحت طبقه‌بندی نقشه‌های تولیدشده.

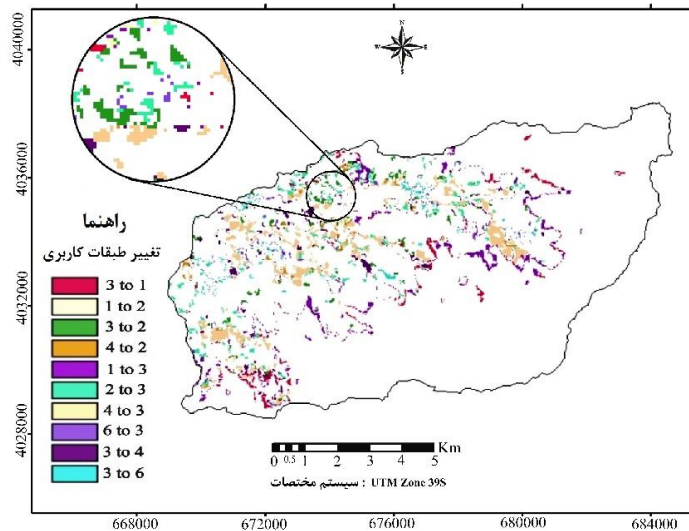
ضریب کاپا	خطاها		صحت کلی طبقه‌بندی	تعداد نقطه‌ی تصویر نمونه‌های واقعیت زمینی	زمان تصویر ماهواره‌یی
	حذف	طبقه‌بندی			
۰/۸۵۵۲	۰/۱۰۱۳	۰/۱۳۲۵	۰/۸۹	۳۴۹۳	۱۳۵۶ (م ۱۹۷۷)
۰/۸۲۳۰	۰/۱۳۱۷	۰/۰۹۰۱	۰/۸۶	۹۷۲	۱۳۶۷ (م ۱۹۸۸)
۰/۸۴۶۲	۰/۱۱۲۴	۰/۲۵۰۰	۰/۸۸	۸۰۱	۱۳۷۷ (م ۱۹۹۸)
۰/۸۷۱۸	۰/۰۸۶۹	۰/۱۰۶۱	۰/۹۱	۶۷۹	۱۳۸۸ (م ۲۰۰۹)
۰/۹۱۱۰	۰/۰۶۲۹	۰/۰۶۴۵	۰/۹۳	۱۷۳۱	۱۳۹۴ (م ۲۰۱۵)

کاربری‌ها برآورد، و نقشه‌های تغییر، دوام یا پایداری، افزایش و کاهش سطح، و روند تغییر مکانی ارزیابی شد. در شکل ۸ نمودارهای کاهش و افزایش (الف) و تغییر خالص (ب) سطح کاربری‌ها در سه دوره‌ی زمانی آورده شده است. برای نمونه در شکل ۹ نقشه‌ی تغییر کاربری‌ها به یکدیگر در دوره‌ی ۱۳۷۷-۱۳۸۸ نمایش داده شده است.

نقشه‌های کاربری زمین سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۶۷، ۱۳۷۷ و ۱۳۸۸ و ۱۳۸۸ ورودی برای واسنجی مدل گرفته‌شد، و در قالب سه دوره‌ی ۱۳۵۶-۱۳۶۷ و ۱۳۶۷-۱۳۷۷ و ۱۳۷۷-۱۳۸۸ به کار برده شد. آشکارسازی تغییر سه دوره‌ی واسنجی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ و ۱۳۷۷-۱۳۶۷ و ۱۳۸۸-۱۳۷۷ در قالب نمودارهای افزایش و کاهش سطح کاربری‌ها، تغییر خالص، تغییر سطح یک کاربری به دیگر



شکل ۸- کاهش و افزایش (الف) و تغییر خالص (ب) سطح کاربری‌ها در سه دوره‌ی زمانی از ۱۳۵۶ تا ۱۳۸۸.

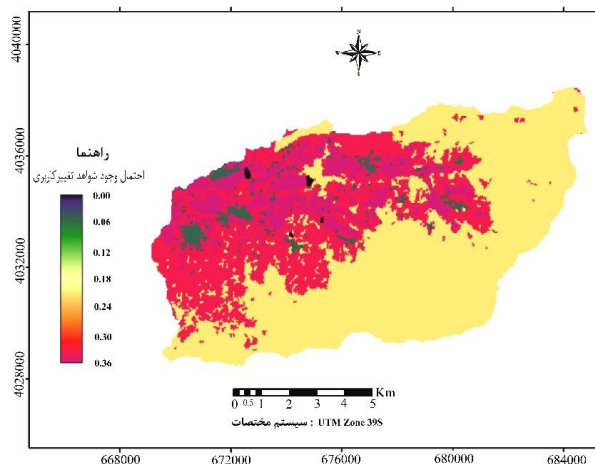


شکل ۹- نقشه‌ی تغییر رده‌ی کاربری‌ها به یکدیگر در دوره‌ی ۱۳۸۸-۱۳۷۷.

* رده‌های کاربری: جنگل (۱)، باغ مرکبات (۲)، زمین مخلوط زراعت و باغ (۳)، زمین شالیزاری (۴)، پیکره‌های آبی (۵) و منطقه‌های مسکونی (۶)

تغییر، شامل معیار احتمال وجود شاهد تغییر کاربری، فاصله از جاده، فاصله از منطقه‌های مسکونی، فاصله از جنگل، فاصله از باغ مرکبات، فاصله از زمین مخلوط زراعت و باغ، فاصله از رودخانه، پستی‌بلندی (مدل رقومی ارتفاع)، شیب و جهت شیب ارزیابی شد، و چند متغیر با ضریب همبستگی کرامر مناسب (بیش‌تر از ۰/۱۵) و متغیرهایی با ضریب همبستگی خوب (بیش‌تر از ۰/۴) انتخاب شد. سه زیرمدل شامل تغییر جنگل به زمین مخلوط زراعت و باغ، تغییر زمین مخلوط زراعت و باغ به منطقه‌های مسکونی، و تغییر زمین شالیزاری به مخلوط زراعت و باغ تلفیق شد، و در قالب زیرمدلی به نام فعالیت انسانی، با روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، برای سه دوره‌ی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ و ۱۳۷۷-۱۳۶۷ و ۱۳۸۸-۱۳۷۷ مدل‌سازی، و نقشه‌های توان انتقال آن ساخته شد.

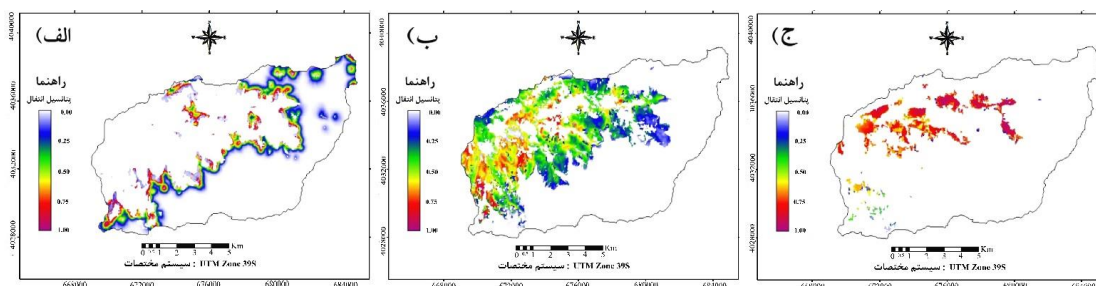
شکل ۸ (الف) نشان می‌دهد که در هر سه دوره مساحت همه‌ی طبقه‌های کاربری زمین در بخش‌هایی از حوزه کاهش، و در قسمت‌هایی افزایش داشت. روند این افزایش و کاهش برای همه‌ی کاربری‌ها در سه دوره ثابت نبود، اما افزایش و کاهش زمین شالیزاری و زمین مخلوط زراعت و باغ با شدت بیش‌تری در هر سه دوره دیده شد. نمودارهای خالص تغییر (ب) در هر سه دوره نشان‌دهنده‌ی کاهش سطح جنگل و زمین شالیزاری است، و این کاهش سطح به‌ویژه در دوره‌ی اول (۱۳۶۷-۱۳۵۶) زیاد بود. سطح زمین مخلوط زراعت و باغ نیز در هر سه دوره افزایش زیادی نشان داد. سطح منطقه‌های مسکونی و زمین باغ مرکبات نیز افزایش داشت و افزایش در دوره‌ی اول (۱۳۶۷-۱۳۵۶) زیاد بود. برای مدل‌سازی زیرمدل توان انتقال، ابتدا تاثیرگذاری محرک‌های



شکل ۱۰- نقشه‌ی احتمال وجود شاهد تغییر کاربری در دوره‌ی ۱۳۷۷-۱۳۶۷.

جدول ۳- ارزیابی متغیرها برای دوره‌ی واسنجی مدل ۱۳۶۷-۱۳۵۶.

متغیر	نقش متغیر	ضریب کرامر کلی
معیار احتمال وجود شاهد تغییر کاربری	ایستا	۰/۴۳۴۳
فاصله از جاده	پویا	۰/۳۰۹۸
فاصله از منطقه‌های مسکونی	پویا	۰/۳۳۹۳
فاصله از جنگل	پویا	۰/۳۱۹۴
فاصله از باغ مرکبات	پویا	۰/۳۱۷۶
فاصله از زمین مخلوط زراعت و باغ	پویا	۰/۳۰۵۶
فاصله از رودخانه	ایستا	۰/۲۸۶۹
پستی‌بلندی (مدل رقومی ارتفاع)	ایستا	۰/۳۶۶۸
شیب	ایستا	۰/۱۲۲۸
جهت شیب	ایستا	۰/۰۷۸۱



شکل ۱۱- نقشه‌ی توان تغییر در دوره‌ی واسنجی ۱۳۷۷-۱۳۶۷. الف) جنگل به کاربری مخلوط زراعت و باغ، ب) مخلوط زراعت و باغ به منطقه‌های مسکونی، ج) زمین شالیزاری به مخلوط زراعت و باغ.

ناحیه‌های حاشیه‌ی منطقه‌های مسکونی) و زرد (منطقه‌های تاثیر فعالیت انسان) از منطقه‌های سفید (ناحیه‌های دور از فعالیت‌های انسان) بسیار بیش‌تر است. در نقشه‌ی ج (زیرمدل توان تغییر کاربری زمین شالیزاری به مخلوط زراعت و باغ) نیز احتمال تغییر منطقه‌های قرمز (زمین شالیزاری به ویژه در حاشیه‌ی منطقه‌های مسکونی) زیاد است. این نقشه نشان می‌دهد که در فرآیند تبدیل زمین شالیزاری به کاربری مخلوط زراعت و باغ، تهدید در چه منطقه‌هایی از حوزه بیش‌تر است. نقشه‌های توان انتقال وارد فرآیند مدل‌سازی تغییر کاربری شد، و با تعیین شدن تاریخ پیش‌بینی، با روش زنجیره‌ی مارکف ماتریس احتمال تغییر هر کاربری به کاربری دیگر محاسبه و پیش‌بینی شد. برای نمونه در جدول ۴ ماتریس احتمال دوره‌ی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ برای پیش‌بینی سال ۱۳۷۷ نمایش داده شده است.

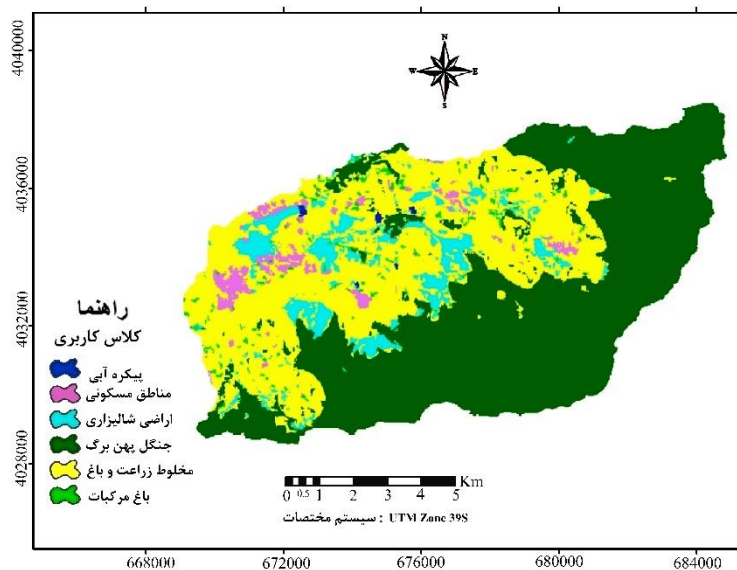
عددهای قطر ماتریس بیان‌کننده‌ی احتمال تغییر نکردن طبقه‌های کاربری و عددهای دیگر بیان‌کننده‌ی احتمال تغییر طبقه‌های کاربری به یکدیگر است. برای هر سه دوره‌ی واسنجی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ و ۱۳۷۷-۱۳۶۷ و ۱۳۸۸-۱۳۷۷-۱۳۷۷ مدل‌سازی و پیش‌بینی انجام شد. برای نمونه در شکل ۱۲ نقشه‌ی پیش‌بینی سال ۱۳۸۸ با دوره‌ی واسنجی ۱۳۷۷-۱۳۶۷ نمایش داده شده است.

متغیرهایی مانند فاصله از جاده، فاصله از منطقه‌های مسکونی، مدل رقومی ارتفاع و متغیر احتمال وجود شاهد تغییر کاربری در مدل‌سازی به کار برده شد. اگرچه ضریب همبستگی کرامر متغیر شیب کم (۰/۱۲) بود، به‌علت این‌که نتیجه‌ی بهتری در مدل‌سازی می‌داد در مدل وارد کرده شد. برای نمونه در نقشه‌ی احتمال وجود شاهد تغییر کاربری (شکل ۱۰) دوره‌ی ۱۳۶۷-۱۳۷۷، اندازه‌های این متغیر از ۰ تا ۰/۳۶ در نوسان است. اندازه‌های بزرگ‌تر بیان‌گر احتمال بیش‌تر تغییر است. در ناحیه‌ی بنفش (شالیزار) و قرمز (مخلوط زراعت و باغ) احتمال تغییر بسیار بیش‌تر از ناحیه‌ی زرد (قسمت بزرگی از جنگل پهن‌برگ) است، و احتمال تغییر منطقه‌های سبز تیره (مسکونی) و سیاه (بیکره‌های آبی) اندک است. نقشه‌های زیرمدل‌های توان تغییر نیز اطلاعاتی از تغییر کاربری‌ها می‌دهد. برای نمونه در شکل ۱۱ توان تغییر دوره‌ی ۱۳۶۷-۱۳۷۷ آورده شده است. در نقشه‌ی الف (زیرمدل توان تغییر کاربری جنگل به مخلوط زراعت و باغ) احتمال تغییر در منطقه‌های قرمز (ناحیه‌ی حاشیه‌ی جنگل و نزدیک به فعالیت‌های انسان) از منطقه‌های سفید (ناحیه‌های غیر جنگلی یا دور از فعالیت‌های انسان) بسیار بیش‌تر است. در نقشه‌ی ب (زیرمدل توان تغییر کاربری مخلوط زراعت و باغ به منطقه‌های مسکونی) احتمال تغییر در منطقه‌های قرمز

جدول ۴- ماتریس احتمال دوره‌ی واسنجی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ برای پیش‌بینی سال ۱۳۷۷.

رده‌ی کاربری*	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰/۹۲۳۴	۰/۰۰۲۱	۰/۰۶۴۰	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰
۲	۰/۰۳۹۱	۰/۰۳۲۰	۰/۷۱۸۶	۰/۱۹۴۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۵۵
۳	۰/۱۰۴۴	۰/۰۱۸۱	۰/۷۲۳۴	۰/۱۳۴۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۹۷
۴	۰/۰۴۷۵	۰/۰۱۷۸	۰/۴۱۸۲	۰/۵۱۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳۴
۵	۰/۰۵۴۹	۰/۰۰۰۰	۰/۱۳۵۵	۰/۰۳۳۲	۰/۷۷۶۵	۰/۰۰۰۰
۶	۰/۰۲۲۶	۰/۰۱۱۸	۰/۱۸۵۸	۰/۰۸۴۷	۰/۰۰۰۸	۰/۶۹۴۳

* رده‌های کاربری: جنگل (۱)، باغ مرکبات (۲)، زمین مخلوط زراعت و باغ (۳)، زمین شالیزاری (۴)، پیکره‌های آبی (۵) و منطقه‌های مسکونی (۶)



شکل ۱۲- نقشه‌ی پیش‌بینی کاربری زمین سال ۱۳۸۸ براساس دوره‌ی واسنجی ۱۳۶۷-۱۳۷۷.

به علت این که نقشه‌ی واقعیت زمینی ثابت ماند و تغییر نکرد، در حالی که نقشه‌ی پیش‌بینی تغییر را نشان داد (ایستمن ۲۰۱۲). نقشه‌های پیش‌بینی هر سه دوره‌ی واسنجی شامل نقشه‌های پیش‌بینی سال ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ با نقشه‌های واقعیت زمینی همان سال‌ها اعتبارسنجی شد و صحت نقشه‌های پیش‌بینی با انطباق دادن آن‌ها با نقشه‌های واقعیت زمینی همان سال، ایجاد جدول متقاطع و محاسبه‌ی خطای نبود تطابق مکانی، خطای نبود تطابق مقدار، و کاپای کلی بررسی شد (جدول ۵).

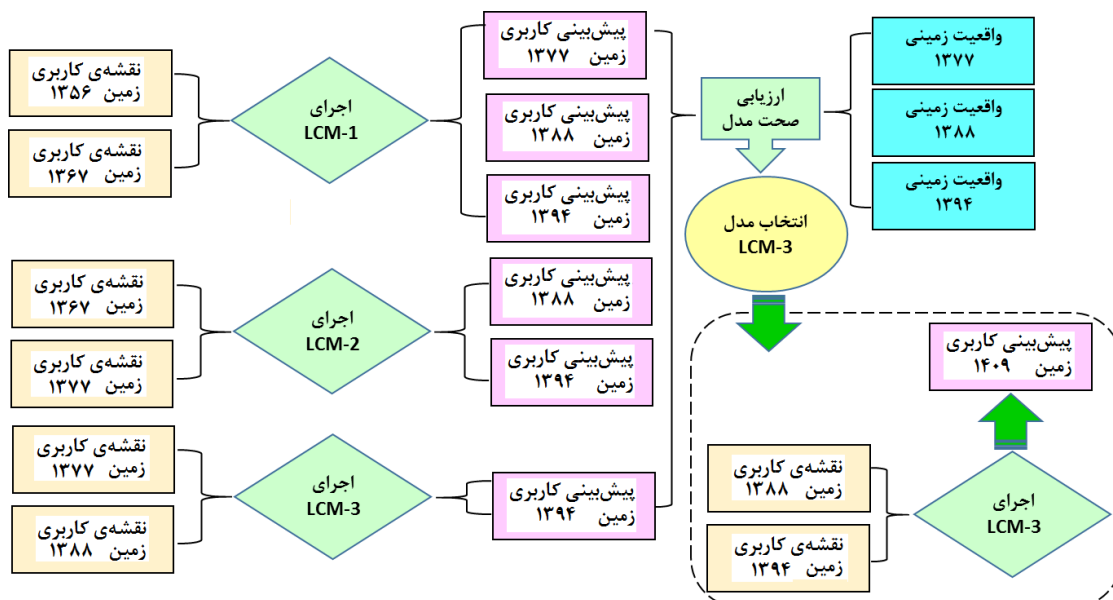
برای اعتبارسنجی مدل، صحت نقشه‌های پیش‌بینی شده با انطباق دادن نقشه‌ی پیش‌بینی و نقشه‌ی واقعیت زمینی، و محاسبه‌ی ضریب کاپا ارزیابی شد. نتیجه‌ی این انطباق به شکل نقشه‌ی با چهار نوع نقطه‌ی تصویر (پیکسل) است. موفقیت خنثی یا صحیح شامل منطقه‌هایی با نقشه‌ی واقعیت زمینی بی تغییر و ثابت است، و در نقشه‌ی پیش‌بینی هم تغییری در کاربری مشاهده نشد. موفقیت خنثی یا صحیح به علت این که نقشه‌ی واقعیت زمینی تغییر کرد، و نقشه‌ی پیش‌بینی هم تغییر را نشان داد. خطا به علت این که نقشه‌ی واقعیت زمینی تغییر کرد، و نقشه‌ی پیش‌بینی، ثابت و بی تغییر ماند. هشدار خطا

جدول ۵- ارزیابی صحت نقشه‌های پیش‌بینی کاربری زمین و اعتبار مدل.

شماره‌ی مدل	دوره‌ی واسنجی مدل	سال پیش‌بینی بر اساس مدل	زمان نقشه‌ی واقعیت زمینی	نبود تطابق ناشی از مکان	نبود تطابق ناشی از مقدار کاپای کلی
۱	۱۳۵۶-۱۳۶۷	۱۳۷۷	۱۳۷۷	۰/۰۷۸۶	۰/۰۱۹۶
		۱۳۸۸	۱۳۸۸	۰/۰۷۳۹	۰/۰۳۱۷
		۱۳۹۴	۱۳۹۴	۰/۰۷۱۲	۰/۰۵۲۱
۲	۱۳۶۷-۱۳۷۷	۱۳۸۸	۱۳۸۸	۰/۰۴۴۵	۰/۰۲۶۷
		۱۳۹۴	۱۳۹۴	۰/۰۴۷۳	۰/۰۵۷۱
۳	۱۳۷۷-۱۳۸۸	۱۳۹۴	۱۳۹۴	۰/۰۳۱۸	۰/۰۳۱۹

۳ بیش‌تر بود، و صحت نقشه‌ی پیش‌بینی براساس این مدل بیش‌تر است. از این‌رو، مدل ۳ برای پیش‌بینی کاربری زمین برای سال ۱۴۰۹ به‌کاربرده شد (شکل ۱۳).

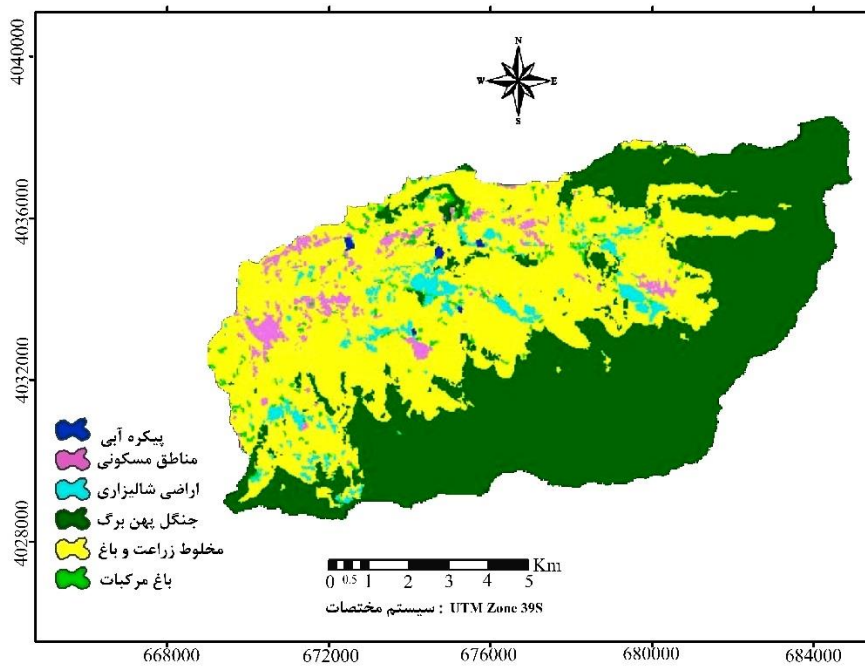
نتیجه‌ی جدول ۵ نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی کاربری زمین سال ۱۳۹۴ کم‌ترین ضریب کاپا در مدل ۱ و بیش‌ترین آن در مدل ۳ بود. از سه مدل دوره‌های واسنجی کارآیی مدل



شکل ۱۳ - فرآیند انتخاب مدل ۳ و پیش‌بینی کاربری زمین برای سال ۱۴۰۹.

جدول ۶ و شکل ۱۵ تغییر مساحت کاربری زمین از ۱۳۵۶ تا ۱۴۰۹ نشان داده شده است.

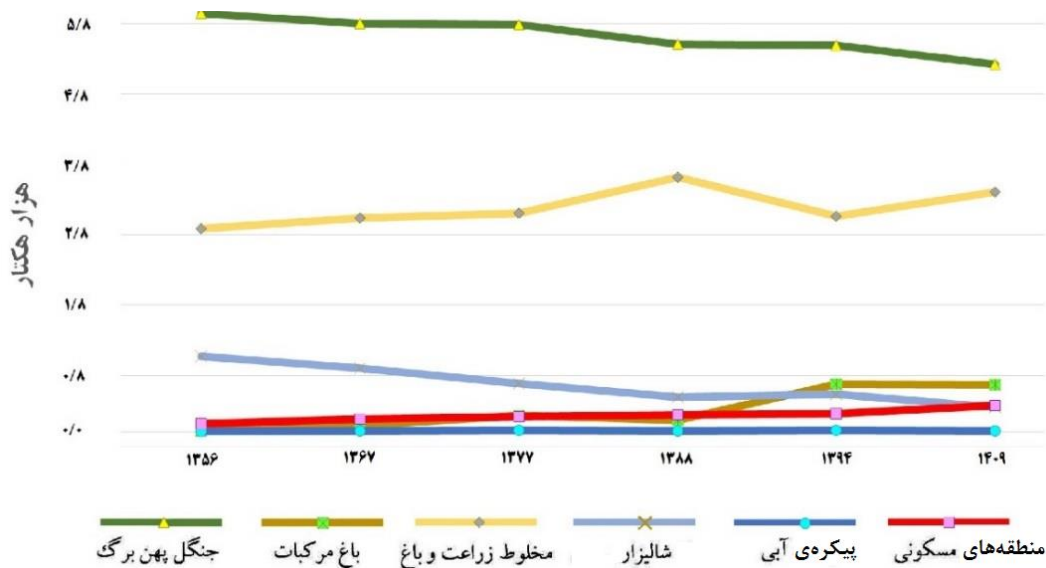
با جای‌گزین کردن نقشه‌ی کاربری زمین ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ در مدل، پیش‌بینی برای سال ۱۴۰۹ انجام شد (شکل ۱۴). در



شکل ۱۴- نقشه‌ی پیش‌بینی کاربری زمین ۱۴۰۹ براساس دوره‌ی اعتبارسنجی ۱۳۹۴-۱۳۸۸.

جدول ۶- مساحت کاربری‌های زمین در سال‌های ۱۳۵۶-۱۴۰۹

کاربری زمین	۱۳۵۶	۱۳۶۷	۱۳۷۷	۱۳۸۸	۱۳۹۴	۱۴۰۹
جنگل پهن‌برگ	۵۹۳۸/۶۵	۵۷۹۶/۶۳	۵۷۷۷/۰۱	۵۵۰۱/۶۱	۵۴۸۴/۶۹	۵۲۲۰/۹۰
باغ مرکبات	۱۹/۴۴	۹۳/۷۸	۲۳۳/۷۳	۱۷۰/۱۰	۶۷۸/۵۱	۶۷۰/۰۵
مخلوط زراعت و باغ	۲۸۸۶/۵۷	۳۰۳۸/۳۱	۳۱۰۶/۴۴	۳۶۱۵/۸۴	۳۰۶۰/۶۳	۳۴۰۴/۵۲
زمین شالیزاری	۱۰۷۱/۷۲	۹۰۹/۱۸	۶۸۴/۹۹	۴۹۳/۹۲	۵۳۸/۲۰	۳۴۸/۳۹
پیکره‌ی آبی	۱۱/۱۶	۱۹/۳۵	۲۴/۸۴	۱۶/۱۱	۲۱/۳۳	۱۹/۷۱
منطقه‌های مسکونی	۱۱۵/۲۹	۱۸۵/۵۸	۲۱۵/۸۲	۲۴۵/۲۵	۲۵۹/۴۷	۲۷۹/۲۶



شکل ۱۵- نمودار تغییر سطح کاربری زمین ۱۳۵۶-۱۴۰۹.

داده‌های جدول ۶ و شکل ۱۴ نشان‌دهنده‌ی روند کاهش سطح جنگل پهن‌برگ و زمین شالیزاری است و سطح منطقه‌های مسکونی، باغ مرکبات، و تا حدودی زمین مخلوط زراعت و باغ رو به افزایش است. سطح پیکره‌های آبی با نوسان‌هایی بعد از دوره‌ی رشد (۱۳۶۷) تا حدودی ثابت ماند. تغییر اندک آن را ممکن است به اندازه‌ی خروجی و برداشت آب از آن‌ها (آب بندان) برای آبیاری زمین شالیزاری نسبت داد. پیش‌بینی تغییر کاربری زمین در این دوره‌ی ۵۳ ساله (۱۳۵۶ تا ۱۴۰۹) بیان‌گر آن است که به ترتیب ۷۱۷ و ۷۲۳ هکتار از مساحت جنگل پهن‌برگ و شالیزار کاسته، و ۶۵۰، ۵۱۸، ۲۶۴ و ۸ هکتار به ترتیب به مساحت باغ مرکبات، مخلوط زراعت و باغ، منطقه‌های مسکونی و پیکره‌ی آبی افزوده خواهد شد. در این بازه‌ی زمانی شاهد کاهش ۶۷٪ سطح زمین شالیزاری، کاهش ۱۲٪ سطح جنگل، ۳۴ برابر شدن وسعت زمین مخلوط زراعت و باغ، و ۳ برابر شدن وسعت منطقه‌های مسکونی خواهیم بود.

بحث و نتیجه‌گیری

پایش و پیش‌بینی تغییر کاربری زمین در کسب دانش لازم برای مدیریت کردن منابع سرزمینی در حوزه‌های آبخیز به‌ویژه منطقه‌هایی مانند بخش سرآب آبخیز سیاه‌رود، که از گذشته تغییر گسترده‌ی کرده‌است، اهمیت ویژه‌ی دارد. این کار با مدل‌سازی تغییر کاربری زمین با مدل‌هایی مانند ال‌سی‌ام امکان‌پذیر می‌شود. با توجه به توانایی‌های سنجش‌از‌دور می‌توان نقشه‌های کاربری زمین را در مقطع‌های زمانی مختلف تهیه، و با کاربرد آن تغییر را در آینده پیش‌بینی کرد. با کاربرد داده‌های کمکی و دانش کارشناسی می‌توان از تصویرهای ماهواره‌ی با توان جداسازی مکانی متفاوت، نقشه‌های کاربری زمین مناسب با صحت پذیرفتنی و رضایت‌بخش استخراج کرد. دلیل زیاد بودن ضریب‌کاپای نقشه‌های کاربری زمین سال ۱۳۵۶ را، که از تصویرهای سنجنده‌ی ام‌اس‌اس ماهواره‌ی لندست با توان تفکیک مکانی ۵۷ متر تهیه شده‌است، می‌توان به انجام شدن تصحیح‌های پس‌پردازش با داده‌های کمکی (عکس‌های هوایی ۱۳۴۵ و نقشه‌ی پستی‌بلندی ۱۳۵۷) نسبت داد. تصویرهای سنجنده‌ی اوال‌آی ماهواره‌ی لندست با توان تفکیک مکانی و طیفی زیاد و تفسیر چشمی تصویرهای گوگل‌ارت و Geoeye به‌مانند داده‌های کمکی، و مشاهده‌های میدانی برای انتخاب مطلوب نمونه‌های آموزشی و نمونه‌های واقعیت‌زمینی، سبب افزایش ضریب‌کاپا و صحت طبقه‌بندی برای نقشه‌ی تولیدشده‌ی سال ۱۳۹۴ بود. این نتیجه‌گیری با یافته‌های دیگر محققان هم‌خوانی دارد، که روش‌های ترکیبی در طبقه‌بندی و به‌کارگیری دانش کارشناسی را در کاهش خطاهای طبقه‌بندی تصویرهای ماهواره‌ی بسیار موثر می‌دانند (چادھاری و کومار ۲۰۱۷).

در مرحله‌ی مدل‌سازی توان انتقال، از متغیرها یا عامل‌های محرکه‌ی که ضریب همبستگی کرامر آن به ۰/۱۵ نزدیک یا بیش‌تر از آن باشد به‌کاربرده می‌شود. در این پژوهش متغیرهایی مانند فاصله از جاده، فاصله از منطقه‌های مسکونی، مدل رقومی ارتفاع و متغیر معیار احتمال وجود شاهد تغییر کاربری به‌کاربرده شد، که با یافته‌های سایر محققان مطابقت دارد (سعدانی و همکاران ۲۰۲۰، شوشتری و همکاران ۲۰۱۸). هسن و همکاران (۲۰۲۰) عامل‌های محرک شیب، جهت شیب و ارتفاع را در توسعه‌ی منطقه‌های شهری در گوانگدونگ، هنگ کنگ و ماکائو در جنوب چین موثر تشخیص دادند، و فاصله از آب‌راه‌ها و فاصله از جاده‌ها را نیز دیگر عامل‌های اساسی در گسترش منطقه‌های شهری برآورد کردند. پس از آزمون و خطا نتیجه‌گیری شد که به‌کارگرفتن متغیر شیب، که ضریب همبستگی کرامر آن کم (۰/۱۲) است، سبب افزایش صحت توان انتقال می‌شود و نتیجه‌ی بهتری به‌دست می‌دهد. این نتیجه‌گیری با پژوهش گوپتا و شارما (۲۰۲۰) که محرک‌هایی با ضریب همبستگی کرامر کم‌تر از ۰/۱۵ به‌کار بردند، و محرک‌هایی با ضریب همبستگی بیش‌تر از ۰/۱ را مناسب دانستند، هم‌خوانی دارد. ضریب کرامر الزاما نمی‌تواند پیچیدگی رابطه‌ی پدیده‌ها را بیان، و همه‌ی نیازهای روش ریاضی به‌کاربرده شده را در مدل‌سازی برآورده کند (ایستمن ۲۰۱۲). بنابراین به‌نظر می‌رسد ضریب همبستگی کرامر را ممکن است در ارزیابی محرک‌های تغییر به‌کاربرد، اما در تأیید یا رد کردن متغیر براساس این معیار باید بیش‌تر احتیاط کرد.

نتیجه‌ی این پژوهش بیان‌گر آن است که کاربرد روش ال‌سی‌ام ممکن است برای منطقه‌های مشابه توصیه شود، که با نتیجه‌ی دیگر پژوهشگران (خوی و مورایاما ۲۰۱۰، زارع و همکاران ۲۰۱۲، چادھاری و کومار ۲۰۱۷، شید و کرم‌ر ۲۰۱۹) مطابقت دارد. اگرچه به‌نظر می‌رسد که برای نتیجه‌بخش بودن مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییر کاربری زمین در آینده، کاربرد نقشه‌های تصحیح‌شده و بهبودیافته‌ی کاربری زمین که تصحیح‌های لازم بر آن‌ها انجام گرفته ضروری است، زیرا پیش‌بینی مطلوب تغییر بستگی زیادی به صحت نقشه‌ها و داده‌های ورودی مدل دارد. نتیجه‌ی ارزیابی مدل (جدول ۵) نشان می‌دهد که به‌طور کلی هرچه بازه‌ی زمانی برای پیش‌بینی بیش‌تر شود، و تغییر برای آینده‌ی دورتری پیش‌بینی شود، تطابق نقشه‌های پیش‌بینی و واقعیت زمینی کم‌تر می‌شود، و در نتیجه اعتبار مدل کاهش می‌یابد. با این‌که مدل پیش‌بینی بر اساس توان تغییر و الگوبرداری از وضعیت حاضر و گذشته، آینده را شبیه‌سازی می‌کند، با فاصله‌گرفتن از مقطع زمانی دوره‌ی واسنجی، سنججه‌های تأثیرگذار در مدل‌سازی شبیه‌سازی را با خطای بیش‌تری انجام می‌دهد.

در حالیکه پیش‌بینی کاهش سطح جنگل تا سال ۱۴۰۹ با توجه به اجرای مدل، در حدود ۲۶۰ هکتار برآورد شده‌است (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد این تفاوت ناشی از آن است که در زیرمدل‌های توان انتقال ال‌سی‌ام، محرک‌های تغییر به‌ویژه محرک‌های پویا مانند فاصله از جاده، و فاصله از منطقه‌های مسکونی در برآوردها اثر می‌گذارد، و تغییر را در بستری پویا پیش‌بینی می‌کند، اما پیش‌بینی تغییر، صرفاً براساس شدت تغییر سالانه مطابق تحلیل داده‌های گذشته، با توجه به ماهیت ناپویایی آن نمی‌تواند تغییر آینده را به‌درستی پیش‌بینی کند. این نتیجه‌گیری را ممکن است برای تحلیل تغییر و پیش‌بینی سطح سایر کاربری‌ها نیز تعمیم داد.

و دقت پیش‌بینی‌ها کاهش می‌یابد. این روند کاهش‌ی ضریب کاپا در جدول ۵ برای دوره‌ی واسنجی ۱۳۶۷-۱۳۵۶ برای پیش‌بینی سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ به‌خوبی نمایان شد.

پیش‌بینی تغییر کاربری زمین در آبخیز سیاه‌رود در دوره‌ی ۵۳ ساله (۱۳۵۶ تا ۱۴۰۹) بیان‌گر کاهش سطح زمین جنگل پهن‌برگ است. از ۱۳۵۶ تا ۱۳۹۴ کاربری حدود ۴۵۰ هکتار زمین جنگلی (۷/۶٪ مساحت زمین جنگل پهن‌برگ حوزه) تغییر داده شد. شدت تخریب در این دوره‌ی ۳۸ ساله ۱۲ هکتار در سال بود. اگر این روند ادامه یابد انتظار می‌رود در سال ۱۴۰۹ حدود ۱۸۰ هکتار از سطح جنگل کاسته شود،

فهرست منابع

- Afifi ME. 2020. Modeling land use changes using Markov chain model and LCM model. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*. 20(56):141–158. (In Persian). <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3243-en.html>
- Amaral e Silva A, Braga M, Quintão Ferreira J, Juste dos Santos V, do Carmo Alves S, de Oliveira JC, Calijuri ML. 2020. Anthropogenic activities and the Legal Amazon: Estimative of impacts on forest and regional climate for 2030. *Remote Sensing Applications*. (18):1–24. doi: <https://10.1016/j.rsase.2020.100304>
- Azizi Ghalati S, Rangzan K, Taghizadeh A, Ahmadi Sh. 2014. LCM Logistic regression modelling of land-use changes in Kouhmare Sorkhi, Fars province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 22(4): 585–596. (In Persian).
- Babur M, Shrestha S, Bhatta B, Datta A, Ullah H. 2020. Integrated assessment of extreme climate and land use change impact on sediment yield in a mountainous transboundary watershed of India and Pakistan. *Journal of Mountain Science*. 17(3): 624–640. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5547-z>.
- Chaudhary BS, Kumar S. 2017. Use of RS and GIS for land use/land cover mapping of K-J Watershed. India. *Int. Journal of Advances in Remote Sensing and GIS*. 5(1): 85–92.
- Dashtorani MT, Afkhami H. 2011. Application of artificial neural networks on drought prediction in Yazd (Central Iran). *Desert*. 16(1): 39–48. <https://10.22059/jdesert.2011.23021>.
- Department of Watershed Management-Mazandaran Jihad Agriculture Organization. 2002. Report of feasibility-executive studies of Siahroud Watershed. 790 p. (In Persian).
- Eastman RJ. 2012. IDRISI selva manual. IDRISI Tutorial. s.l. Clark University, Worcester. www.clarklabs.org
- Congalton RG, Green K. 2019. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and Practices, 3rd ed. CRC Press: 347 p.
- Falahatkar S, Hoseini SM, Salman Mahini A, Ayoubi SH. 2016. Land use change prediction using LCM. *Environment Research*. 7(13): 163–174. (In Persian).
- Gounaridis D, Choriantopoulos I, Symeonakis E, Koukoulas S. 2019. A random forest-cellular automata modelling approach to explore future land use/cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales. *Science of the Total Environment*. 646: 320–335. <https://10.1016/j.scitotenv.2018.07.302>.
- Guan D, Zhao Z, Tan J. 2019. Dynamic simulation of land use change based on logistic-CA-Markov and WLC-CA-Markov models: A case study in three gorges reservoir area of Chongqing, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 26(20): 20669–20688. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05127-9>.
- Gupta R, Sharma LK. 2020. Efficacy of spatial land change modeler as a forecasting indicator for anthropogenic change dynamics over five decades: A case study of Shoolpaneshwar Wildlife Sanctuary, Gujarat, India. *Ecological Indicators*. 112(106171):1–19 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106171>.
- Jagarnath M, Thambiran T, Gebreslasie M. 2019. Modelling urban land change processes and patterns for climate change planning in the Durban metropolitan area, South Africa. *Journal of Land Use Science*. 14(1):81–109. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1610809>.
- Jande JA, Nsofor GN, Abdulkadir A. 2020. Modelling of urban growth with land change modeler in Otukpo Metropolis of Benue State, Nigeria. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 4(9): 26–40. <https://10.33564/IJEAST.2020.v04i09.004>.
- Hasan S, Wenzhong Shi, Xiaolin Zhu, Sawaid Abbas, Ahmed Khan HU. 2020. Future simulation of land use changes in rapidly urbanizing south China based on land change modeler and remote sensing data. *Sustainability*. 12(11):1–24; <https://doi.org/10.3390/su12114350>.
- Kavyan A, Zargosh Z, Jaffaryan Jolodar Z, Darabi H. 2017. Land use changes modelling using logistic regression and Markov Chain in the Haraz Wa-

- tershed. *Journal of Natural Environment*. 70(2): 397–411. <http://10.22059/jne.2017.116904.850>.
- Khoi DD, Murayama Y. 2010. Forecasting areas vulnerable to forest conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam. *Remote Sensing*. 2(5): 1249–1272. <https://doi.org/10.3390/rs2051249>.
- Li K, Feng M, Biswas A, Su H, Niu Y, Cao J. 2020. Driving factors and future prediction of land use and cover change based on satellite remote sensing data by the LCM Model: A case study from Gansu Province, China. *Sensors*. 20(10):1–20. <https://doi.org/10.3390/s20102757>.
- Lillesand TM, Kiefer RW, Chipman JW. 2015. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, Inc. 770 p.
- Losiri C, Nagai M, Ninsawat S, Shrestha RP. 2016. Modeling urban expansion in Bangkok Metropolitan Region using demographic-economic data through cellular automata-markov chain and multi-layer perceptron-markov Chain Models, *Sustainability*. 8(7):1–23. <https://doi.org/10.3390/su8070686>.
- Megahed Y, Cabral P, Silva J, Caetano M. 2015. Land cover mapping analysis and urban growth modelling using remote sensing techniques in greater Cairo Region-Egypt. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 4(3):1750–1769. <https://doi.org/10.3390/ijgi4031750>.
- Meteorology Administration of Mazandaran Province, 2020, Meteorological data for the period 2006 to 2020.
- Mishra VN, Rai PK, Mohan K. 2014. Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing: A case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA*. 64 (1):111–127. <https://doi.org/10.2298/IJGI1401111M>.
- Nath B, Wang Z, Ge Y, Islam K, Singh RP, Niu Z. 2020. Land use and land cover change modeling and future potential landscape risk assessment using Markov-CA Model and analytical hierarchy process. *International Journal of Geo-Information*. 9(134): 1–25. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020134>.
- Saadani S, Laajaj R, Maanan M, Rhinane H, Aaroud A. 2020. Simulating spatial-temporal urban growth of a Moroccan metropolitan using CA-Markov model. *Spatial Information Research* volume. 28(5):609–621. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00322-0>.
- Shade C, Kremer P. 2019. Predicting land use changes in Philadelphia following green infrastructure Policies. *Land*. 8(28): 1–19. <https://doi.org/10.3390/land8020028>.
- Shooshtari, SJ, Shayesteh K, Gholamalifard M, Azari M, López-Moreno JI. 2018. Land cover change modelling in Hyrcanian forests, northern Iran: A landscape pattern and transformation analysis perspective. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 44(2):743–761. <https://doi.org/10.18172/cig.3279>.
- Tanhapour M, Banihabib ME. 2018. Artificial neural network model of multilayer perceptron for prediction of daily discharge suspended sediment load and assessment of factors affecting sediment estimation. *Watershed Engineering and Management*. 10(2): 249–255. (In Persian). <https://10.22092/ijwmse.2017.108115.1215>.
- Watershed Management Department of Mazandaran Jihad Sazandegi Organization, 2002, Justification and Implementation studies report of Siahroud Watershed, 757 p.
- Yousefi M, Pajooesh M, Honarbakhsh A. 2020. Modeling trends land use changes local by using LCM Model based on artificial neural networks and Markov Chain analysis (Case study: BeheshtAbad Watershed). *Journal of Watershed Management Research*. 11(21):129–142. (In Persian). <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-977-en.html>.
- Zabihi M, Moradi HR, Gholamalifard M, Khaledi Darvishan A. 2019. Effects of land use/land cover change scenarios on landscape metrics on the Talar Watershed. *Watershed Management Research*. 32(1):84–99. (In Persian).
- Zare Garizi A, Sheikh V, Sadoddin A, Mahiny S. 2012. Simulating the spatiotemporal changes of forest extent for the Chehelchay watershed (Golestan province), using integrated CA-Markov model. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 20(2): 273–285. (In Persian).



Modeling LandUse Changes Using Land Change Modeler for Prediction of the 2030 LandUse on the upstream area of the Siahroud River Basin

Behnoush Jafari Gorzin

Ph.D. Student, Watershed Management Science and Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Ataollah Kavian

(Corresponding Author)* Professor, Department of the Watershed Management Science and Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Karim Solaimani

Professor, Department of the Watershed Management Science and Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

*Corresponding Authors Email: ataollah.kavian@gmail.com

Received: 11 December 2019 Accepted: 20 December 2020

Abstract

An optimized land management and the planning requires updating information on the land use changes over time. The application of remote sensing capabilities and land use change modeler (LCM) may provide a suitable platform for simulating land use changes. The LCM, land use changes in the upstream area of the Siahroud River Basin were evaluated in the 1977-2015 period and simulated for 2030. The land use maps of 1977, 1988, 1998, 2009 and 2015 were prepared, using the unsupervised and supervised classification methods of the Landsat satellite images, and the LCM, for the 1977-1988, 1988-1998 and 1998-2009 periods were implemented in the form of three models. After evaluation the performance of these models, the most appropriate one was selected. Using the data for the 2009-2015 periods a prediction was made for the year 2030. The results indicate that the use of appropriate inputs for the LCM, the application of the combined methods in classification, and utilizing expert knowledge, can be effective in improving the classification results and increasing the efficiency of the LCM. (Kappa coefficient 0.82 to 0.91). Predicting land use changes in the Siahroud River Basin during the 1977 to 2030 period indicates a 67% decrease in paddy fields and 12% decrease in forest area and a 34-fold increase in the extent of the mixed agricultural and orchards, and threefold increase in the extent of the residential areas.

■ **Keywords:** Change detection, multi-temporal analysis, satellite images, Siahroud River ■