

پایش روند تغییرات پوشش زمین در شهر کرمانشاه با مدل CA مارکوف

علی اکبر شمسی‌پور* - دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

سوسن حیدری- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب و هواشناسی ماهواره‌ای، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

کیوان باقری- دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰ تأیید مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

چکیده

برنامه‌ریزی‌های مختلف و توسعه پایدار شهری، مستلزم ارزیابی و پیش‌بینی صحیح مقادیر تغییرات کاربری اراضی نواحی شهری است. همچنین پایش تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پیش‌بینی این تغییرات با مدل‌سازی و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مؤثر، در راستای برنامه‌ریزی مطلوب شهری قرار دارد. هدف پژوهش، پایش، شبیه‌سازی و پیش‌بینی گسترش شهر کرمانشاه با ترکیب مدل سلول خودکار، زنجیره‌ای مارکوف و رگرسیون لجستیک است. با این هدف نخست نقشه‌های کلاس‌های پوشش زمین کرمانشاه با استفاده از تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای لندست سال‌های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۳ تهیه، سپس صحت‌سنجی نقشه‌ها و آشکارسازی تغییرات انجام شده است. آشکارسازی تغییرات دوره اول (۲۰۰۰-۱۹۸۵) و دوره دوم (۲۰۱۳-۲۰۰۰) نشان می‌دهد که در سه دهه اخیر نواحی شهری به مقدار ۶۵۴۱ هکتار افزایش داشته است. براساس این تغییرات و انتخاب ۷ معیار مؤثر در رشد و توسعه شهر، مدل‌سازی پتانسیل تبدیل کاربری برای سال ۲۰۱۳، با استفاده از روش رگرسیون لجستیک انجام شد. در ادامه، برای کالیبره کردن مدل CA مارکوف، نقشه کاربری سال ۲۰۱۳ استفاده شد سپس با روش زنجیره مارکوف برآورد احتمال میزان تغییرات و توزیع مکانی آن‌ها برای سال ۲۰۲۶، و نقشه کلاس‌های پوشش زمین برای چشم‌انداز ۲۰۲۶ با مدل زنجیره CA مارکوف پیش‌بینی شد. نتایج آن هم نشان می‌دهد که به ترتیب مقدار زیادی از مساحت کلاس‌های مناطق کوهستانی، پوشش گیاهی، صخره‌ای و سطوح آبی به کاربری شهری تبدیل خواهند شد.

کلیدواژه‌ها: تغییر کلاس‌های پوشش زمین، کرمانشاه، مدل CA مارکوف.

مقدمه

زمین یکی از منابع طبیعی اولیه است. شهر نه تنها با جمعیت بلکه با تغییر در ابعاد فضایی رشد می‌کند. تحول زمین فرایندی طبیعی است و نمی‌تواند متوقف شود، اما می‌توان آن را مدیریت کرد. نظارت بر چگونگی تفکیک اراضی، ضوابط منطقه بندی شهرها به مناطق مسکونی، تجاری، صنعتی، اداری و ضوابط مربوط به استفاده از اراضی شهری یکی از مهم‌ترین مسائل زندگی شهر است؛ بنابراین، کلاس‌های پوشش زمین یکی از مفاهیم پایه در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای به‌شمار می‌آید (Doygun, 2008: 471). بر اساس این، برنامه‌ریزی کلاس‌های پوشش زمین، مجموعه فعالیت‌هایی است که محیط انسانی را مطابق خواسته‌ها و نیازهای جامعه شهری سامان می‌بخشد و این مقوله، هسته اصلی برنامه‌ریزی شهری را تشکیل می‌دهد (احدنژاد، ۱۳۹۲: ۷). کرمانشاه یکی شهرهای بزرگ و پرجمعیت کشور است که به دلایلی از جمله مرکزیت استان، رشد سریع جمعیت، مهاجرت روستاییان و شهری سایر شهرستان‌های اطراف رشد فیزیکی و به تبع آن تغییرات پوشش زمین از جمله تغییر اراضی مرتع و کشاورزی به مکان‌های شهری است که به‌طور فزاینده‌ای در چند دهه اخیر رخ داده است؛ بنابراین، برای برنامه‌ریزی و توسعه پایدار به درک چگونگی و نحوه تغییرات پوشش اراضی و پیش‌بینی این تغییرات در آینده نیاز است (برات‌علی، ۱۳۹۰).

گفتنی است تغییر کاربری و پوشش اراضی فرایند دینامیک و پیچیده‌ای است که از تلاقی سیستم‌های طبیعی و انسانی به دست می‌آید و آثار مستقیمی بر آب، خاک و هوا دارد. وقوع این پدیده پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در مقیاس محلی، ناحیه‌ای و جهانی به همراه خواهد داشت (Koomen و همکاران، ۲۰۰۷: ۴۱۰)؛ بنابراین، در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه شهری و محیط‌زیست آگاهی از نسبت تغییرات کاربری اراضی/پوشش زمین و عوامل ایجادکننده آن از ضروریات محسوب می‌شود. در این زمینه داده‌های سنجش‌ازدور^۱ به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند پوشش وسیع، به‌هنگام بودن، تکرارپذیری، توان تفکیک بالای مکانی، طیفی و رادئومتریکی قابلیت بالایی برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی تغییر کلاس‌های پوشش زمینی دارد (Jensen, 2007: 592). سنجش‌ازدور ابزار مؤثری برای پایش تغییرات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی شهری است. در این بین، تصاویر دوره‌ای ماهواره‌ای لندست یکی از مهم‌ترین منابع داده‌ای برای مطالعه انواع مختلف تغییر کاربری و پوشش اراضی، از قبیل جنگل‌زدایی (Mayes et al., 2015; Wyman & Stein, 2010)، افزایش و گسترش کشاورزی، بهینه‌سازی کلاس‌های پوشش شهری (Feyisa et al., 2016)، بیابان‌زایی (Dawelbait & Morari, 2012) و بسیاری از مسائل و پدیده‌های دیگر است. استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای به‌وسیله طبقه‌بندی^۲ از پرکاربردترین روش‌های موجود است (میرزایی‌زاده، ۱۳۹۴: ۳۰). یکی از کاربردهای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای بررسی و کشف تغییرات^۳ به‌وجودآمده در پدیده‌هایی است که ماهیت زمانی-مکانی دارند. درواقع، کشف تغییرات به فرایند شناسایی و تعیین نوع و وسعت پوشش یا کلاس‌های پوشش زمین در یک دوره زمانی با استفاده از تصاویر سنجش‌ازدور گفته می‌شود (Coppin et al., 2004: 1575). افزون بر

1. remote sensing
2. Classification
3. Change detection

ارزیابی روند گذشته تغییرات ایجاد شده در شهرها، پیش بینی روند گسترش شهرها و مدل سازی آن در آینده با روش های دقیق برای مدیریت و کنترل گسترش شهری بیش از پیش ضرورت می یابد. مدل سازی رشد شهری و تغییرات صورت گرفته در کاربری جزء جدایی ناپذیر از برنامه ریزی برای توسعه پایدار است (کاظم و همکاران، ۱۳۹۵: ۴۴)؛ بنابراین، پیش بینی و ارزیابی پتانسیل و تغییرات الگوهای کاربری زمین از طریق مدل سازی به برنامه ریزان و مدیران شهری، محیط زیست و منابع طبیعی برای تصمیمات آگاهانه تر کمک می کند.

تحقیقات بسیاری در مورد مدل سازی رشد شهری انجام شده که هریک به نحوی سعی در کشف ارتباط بین رشد شهر و متغیرهای مؤثر در آن داشته است، اما با توجه به ماهیت و پویایی شهر و وابستگی زیاد آن به رفتارهای انسانی، پدیده جدیدی را رقم زده که با پدیده های طبیعی متفاوت است (همان). کاظم و همکاران (۱۳۹۴)، در پژوهشی به مدل سازی رشد شهری با استفاده از تصاویر ماهواره ای پرداختند و با روش سلول های اتومات و پارامترهای طبیعی و انسانی مختلفی از جمله ارتفاع، فاصله از اراضی بایر و مکان های انسان ساخت پیش بینی رشد شهر را بررسی کردند. نمونه هایی دیگر از مطالعات ارزیابی و پیش بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA- Markov انجام شده است؛ مانند منطقه ای در پکن (Yang, 2014)، صحرای ساحلی شمال غربی مصر (Marwa Waseem et al., 2015)، Foshan در چین (Gong et al., 2015)، در چین (Yu et al., 2016) و Seremban واقع در مالزی (Aburas et al., 2017).

نوری و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهش خود به شبیه سازی شهرستان انزلی برای سال ۲۰۲۱ با استفاده از مدل CA مارکوف پرداخته، دریافتند که کاهش ۱۰/۶۴ درصد در جنگل، ۸/۵۲ درصد در تالاب انزلی و ۱۱/۵۴ درصد در زمین بایر در طول سال ۱۹۸۹-۲۰۲۱ و روند رو به رشد ۷/۱ درصد در مناطق شهری برای این مدت زمان رخ خواهد داد. همچنین Deep و Saklani (2014) در پژوهش خود به پیش بینی شهرستان Dehradun واقع در هندوستان با استفاده از مدل CA مارکوف پرداخته که ضریب صحت استخراج شده، نشان دهنده قابلیت بالای این مدل برای شبیه سازی تغییرات کاربری شهری در منطقه مورد مطالعه است (شاخص کاپا= ۰/۹۱). باقری و شتایی جویباری (۱۳۸۹) از رگرسیون لجستیک^۱ برای مدل سازی کاهش گستره جنگل در حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان استفاده کردند. همچنین برای بررسی ارتباط مکانی کاهش جنگل با عوامل فیزیوگرافی و انسانی، رگرسیون لجستیک را با متغیرهای شیب، جهت، ارتفاع و متغیرهای انسانی فاصله از جاده، روستا و مقدار جمعیت به کار بردند. نتایج نشان داد توافق نسبی مدل به دست آمده با نقشه کاهش گستره جنگل است. Arsanjani و همکاران (۲۰۱۳) به منظور مدل سازی رشد، توسعه شهر تهران را برای سال ۲۰۱۶ و ۲۰۲۶ با استفاده ترکیبی شامل رگرسیون لجستیک، مارکوف و سلول های خودکار بررسی کردند. آن ها به صحت ۸۹ درصدی دست یافتند که نشان دهنده دقت بالای مدل بود و بیان کردند که رشد زیادی در دهه های آینده در حاشیه غربی تهران رخ خواهد داد. نمونه هایی دیگر از مطالعات ارزیابی و پیش بینی تغییرات کلاس های پوشش زمین با استفاده از مدل CA- Markov انجام شده است؛ مانند تغییرات پوشش اراضی در شهر اصفهان (فلاح کار، ۱۳۸۸)، تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین در حومه جنوب غربی تهران (علی محمدی، ۱۳۸۹)، تغییرات

پوشش گیاهی منطقه ۴ شهرداری تهران (سرودی و جوزی، ۱۳۹۰)، تغییرات پوشش اراضی منطقه رودخانه آقبالغ (کاوه و ابراهیمی، ۱۳۹۲)، روند تغییرات مکانی کاربری کوهمره سرخی استان فارس (عزیزی قلاتی، ۱۳۹۵)، گسترش فیزیکی شهر رباط کریم و تأثیر آن بر روی اراضی کشاورزی (صیدی‌لو و امینی، ۱۳۹۵)، تغییرات بیابان‌زایی در شرق و جنوب اصفهان (حلییان، ۱۳۹۵).

باقری و شتایی جویباری (۱۳۸۹) از رگرسیون لجستیک^۱ برای مدل‌سازی کاهش گستره جنگل در حوزه آبخیز چهل‌چای استان گلستان استفاده کردند. همچنین برای بررسی ارتباط مکانی کاهش جنگل با عوامل فیزیوگرافی و انسانی، رگرسیون لجستیک را با متغیرهای شیب، جهت، ارتفاع و متغیرهای انسانی فاصله از جاده، روستا و مقدار جمعیت به‌کار بردند و دریافتند که توافق نسبی مدل به‌دست‌آمده با نقشه کاهش گستره جنگل است. Arsanjani و همکاران (۲۰۱۳) برای مدل‌سازی رشد، توسعه شهر تهران را برای سال ۲۰۱۶ و ۲۰۲۶ با استفاده ترکیبی شامل رگرسیون لجستیک، مارکوف و سلول‌های خودکار بررسی کردند و به صحت ۸۹ درصدی دست یافتند که نشان‌دهنده دقت بالایی مدل بود، همچنین بیان کردند که رشد زیادی در دهه‌های آینده در حاشیه غربی تهران رخ خواهد داد.

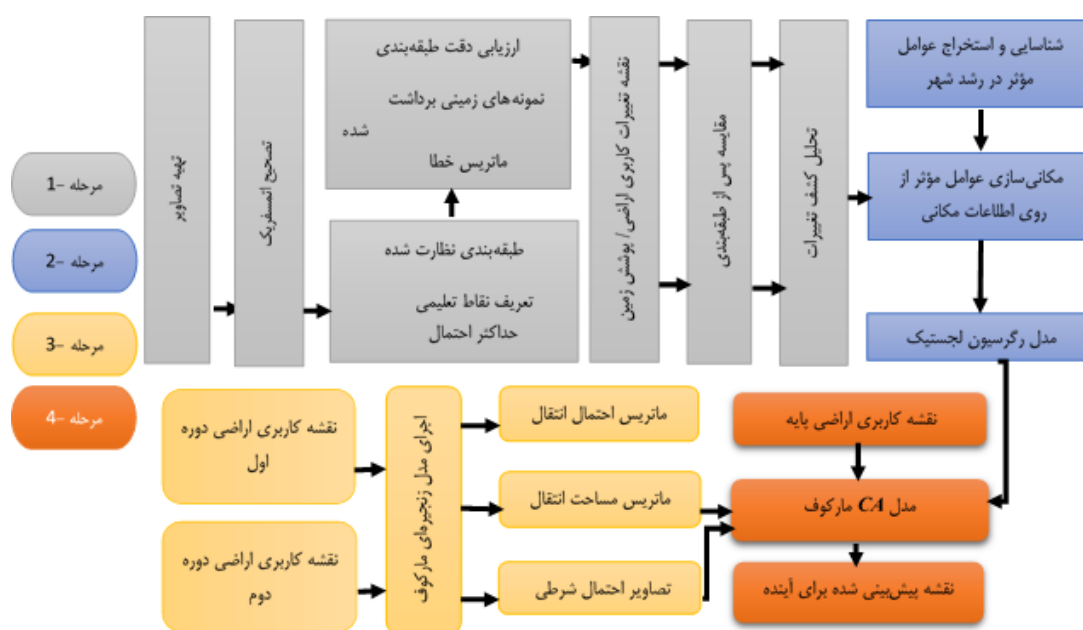
با توجه به بررسی پیشینه تحقیقات انجام‌شده، مطالعه‌ای در ارتباط با پیش‌بینی گسترش شهر با مدل‌سازی CA-Markov در منطقه مورد نظر انجام نشده است؛ بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات مناطق شهر کرمانشاه با تصاویر ماهواره‌ای لندست در سه دهه اخیر (۲۰۱۳-۱۹۸۵) و همچنین پیش‌بینی روند تغییرات در سال ۲۰۲۶ با استفاده از مدل‌های رگرسیون لجستیک، زنجیره‌ای مارکوف و CA-Markov صورت گرفته است.

داده‌ها و روش‌شناسی پژوهش

مراحل کلی اجرای پژوهش شامل چهار دسته کلی زیر است:

۱. تهیه نقشه‌های کلاس‌های پوشش زمین در سه دوره مورد مطالعه و آشکارسازی تغییرات؛
۲. بررسی عوامل مؤثر در رشد شهری و تغییرات کلاس‌های پوشش زمین، همچنین نقشه احتمال گسترش شهری (با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک) برای دوره‌های آتی؛
۳. برآورد میزان تغییرات و توزیع مکانی آن‌ها که برای این کار از روش‌های تحلیل زنجیره‌ای مارکوف استفاده شده است؛

۴. اجرای مدل CA مارکوف و پیش‌بینی تغییرات کلاس‌های پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه (شکل ۱).



شکل ۱. طرح‌واره مراحل اجرای پژوهش

طبقه‌بندی تصاویر و تهیه نقشه کلاس‌های پوشش زمین

یکی از راه‌های تهیه نقشه‌های پوشش زمین استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و فرایند طبقه‌بندی تصاویر است؛ بدین منظور، تصاویر چند زمانه استفاده شده در پژوهش حاضر پس از تصحیح اتمسفری QUAC^۱، برای تهیه نقشه کلاس‌های پوشش زمین طبقه‌بندی، و تعداد کلاس‌ها نیز با توجه به تصاویر و نقشه‌های موجود، شرایط منطقه مورد مطالعه و اهداف پژوهش حاضر انتخاب شد. در نهایت با استفاده از نرم افزار ENVI، تصاویر با الگوریتم حداکثر احتمال^۲ طبقه‌بندی شدند. ماهیت طبقه‌بندی حداکثر احتمال اختصاص یک پیکسل به طبقه‌ای است که احتمال طبقه‌بندی براساس اطلاعات موجود از داده‌های آموزشی در آن حداکثر میزان خود باشد. در این روش ابتدا میزان احتمال هر پیکسل به هر کلاس از قبل تعریف شده و محاسبه می‌شود و کلاسی که بیشترین میزان احتمال را داشته باشد، پیکسل تست مختص آن است (رابطه ۱). فرض روش حداکثر احتمال این است که آمارهای داده‌های آموزشی برای هر کلاس و در هر باند به صورت نرمال (گوسین) توزیع شده‌اند. نخستین مرحله این طبقه محاسبه احتمال $P(X|w_i)$ است؛ یعنی کلاسی به پیکسل مورد نظر انتساب داده می‌شود که بیشترین احتمال تعلق پیکسل به آن کلاس وجود دارد (زنگنه، ۱۳۹۳: ۴۸۸).

$$(x|w_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\hat{\sigma}_i} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu_i)^2}{\hat{\sigma}_i^2}\right] \quad (1)$$

در این فرمول x بردار مقادیر طیفی و w_i کلاس طیفی i در یک طبقه خاص‌اند. $\hat{\sigma}_i$ نیز میزان انحراف معیار و μ مقدار میانگین کلاس طیفی هستند. کلاس مربوط برای اختصاص دادن یک پیکسل به یک کلاس بعد از محاسبه

1. Quick Atmospheric Correction

2. Maximum likelihood Algorithm

احتمال قرارگرفتن پیکسل تست در هر کلاس، کلاسی که بیشترین میزان احتمال را دارد، پیکسل تحت نظر را برای خود در نظر می‌گیرد (Jensen, 2005: 374-379).

شایان ذکر است که برای بیان و ارزیابی صحت طبقه‌بندی از ماتریس خطا^۱ استفاده می‌شود. جدول خطا روابط میان داده‌های یک منبع مشخص با نتایج مربوط به طبقه‌بندی خودکار را به صورت طبقه به طبقه مقایسه می‌کند. این جدول مربع شکل است و تعداد سطر و ستون آن با تعداد طبقاتی که صحت طبقه‌بندی آن‌ها ارزیابی می‌شود برابر است (توماسم و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۸۲). با تقسیم تعداد کل پیکسل‌های طبقه‌بندی در هر طبقه بر تعداد کل پیکسل‌های تحت طبقه‌بندی، دقت کلی^۲ به دست می‌آید. ضریب کاپا یکی دیگر از پارامترهای دقت است که از ماتریس خطا استخراج می‌شود و دقت طبقه‌بندی را در برابر یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند (فاطمی و باقری، ۱۳۸۹: ۲۴۰ به نقل از Richard, 1995). این ضریب از معادله زیر به دست می‌آید.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \quad (2)$$

در این معادله N تعداد کل پیکسل‌های واقعیت زمینی (پیکسل‌های نمونه‌تعلیمی)، r تعداد ردیف‌های جدول خطا، X_{ii} تعداد مشاهدات مربوط به ردیف i و ستون i (در روی قطر بزرگ)، X_{i+} مشاهدات در ردیف i و X_{+i} کل مشاهدات در ستون i است. ضریب کاپا علاوه بر عناصر قطری ماتریس خطا از عناصر غیرقطری نیز برای محاسبه دقت استفاده می‌کند. مقادیر این ضریب بین صفر تا یک قرار می‌گیرد. مقدار صفر یعنی طبقه‌بندی کاملاً تصادفی انجام شده و مقدار یک یعنی طبقه‌بندی کاملاً صحیح و براساس نمونه‌های تعلیمی است (زنگنه، ۱۳۹۳).

آشکارسازی تغییرات

آشکارسازی تغییرات، فرایند شناسایی تفاوت‌ها در وضعیت یک شیء یا پدیده با مشاهده آن در زمان‌های متفاوت است (Lu et al, 2004: 2366). روش‌های گوناگونی برای این آشکارسازی وجود دارد. یکی از این روش‌ها مقایسه پس از طبقه‌بندی^۳ است؛ بنابراین، در پژوهش حاضر برای شناسایی تغییرات از روش مقایسه پس از طبقه‌بندی استفاده شده است. در این روش دو نقشه به صورت پیکسل به پیکسل با استفاده از ماتریس شناسایی تغییرات با هم مقایسه می‌شوند. هر خطا در نقشه‌های طبقه‌بندی شده به نتیجه نهایی نقشه شناسایی تغییرات نیز منتقل می‌شود؛ بنابراین ضروری است نقشه طبقه‌بندی شده به کاررفته در روش مذکور حتی الامکان دقیق باشد. دقت در نقشه خروجی شناسایی تغییرات به دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده بستگی دارد.

پس از آشکارسازی تغییرات عوامل مؤثر بر گسترش شهر نیز با مرور مطالعات قبلی و با توجه به ویژگی‌های منطقه انتخاب شدند. این عوامل عبارت‌اند از ارتفاع و شیب منطقه، فاصله از پوشش گیاهی، فاصله از نواحی ساخته شده شهری، فاصله از نواحی کوهستانی و صخره‌ای، فاصله از شبکه راه‌ها (جاده) و فاصله از رودخانه (عبدی، ۱۳۹۵).

1. Error table

2. Overall accuracy

3. Post-Classification Comparison

رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک یکی از انواع مدل‌های خطی تعمیم‌یافته است که برای تجزیه و تحلیل وجود یا نبود متغیر وابسته بسیار مناسب، و برای پیش‌بینی ناپایداری دامنه‌ای استفاده شده است (Dai & Lee, 2002: 214) به نقل از Rowbotham & Dudycha, 1998). این نوع تحلیل رگرسیونی برای محاسبه رابطه بین یک یا چند متغیر مستقل پیوسته با متغیر وابسته باینری به کار می‌رود. فرض بنیادی این رگرسیون براساس این است که احتمال وابسته‌ای که مقدار یک را به خود می‌گیرد (واکنش مثبت) منحنی لجستیک را دنبال می‌کند (کاظم و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۹). برآورد مقدار آن نیز با استفاده از رابطه ۳ انجام می‌شود:

$$p(y = 1|x) = \frac{\exp(\sum BX)}{1 + \exp(\sum BX)} \quad (3)$$

در این رابطه p احتمال متغیر وابسته‌ای که مقدارش یک است، x متغیرهای مستقل را تشکیل می‌دهد؛ به طوری که $x = (x_0, x_1, x_1, x_2, \dots, x_k), x_0 = 1$ و B پارامترهای برآورد شده هستند، به گونه‌ای که برای خطی کردن مدل فوق معمولاً تبدیل رابطه ۴ اعمال می‌شود، این رابطه به Logit یا لجستیک مشهور است.

$$P' = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) \quad (4)$$

مدل زنجیره‌ای مارکوف

زنجیره‌های مارکوف کاربردهای گسترده‌ای در مدل‌سازی تغییرات کلاس‌های پوشش زمین و پیش‌بینی آن دارد (Wu et al., 2006: 332). در تحلیل این زنجیره‌ها از طبقه‌هایی با عنوان حالت یا همان وضعیت‌های^۱ زنجیر استفاده شده است. این زنجیره برای تعیین احتمال تغییر، حداقل به دو نقشه کلاس‌های پوشش زمین (ورودی‌های مدل) نیاز دارد که معمولاً این نوع داده‌ها با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید (Mitsova et al., 2011: 143). گفتنی است تحلیل زنجیره‌ای مارکوف برای دو منظور تهیه می‌شود. ماتریس اول به منظور کالیبراسیون و ماتریس دوم برای شبیه‌سازی تغییرات احتمالی رخ داده در آینده. خروجی مدل نیز شامل احتمال تبدیل وضعیت، ماتریس مساحت‌های تبدیل شده^۲ هر طبقه و در پایان تصاویر احتمالات شرطی^۳ برای تبدیل کاربری‌های مختلف است (Weng, 2002: 277). براساس احتمال شرطی فرمول بیز، پیش‌بینی تغییر کلاس‌های پوشش زمین در مدل زنجیره‌ای مارکوف با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Sang et al., 2011: 939).

$$s(t+1) = p_{ij} \times s(t) \quad (5)$$

در این رابطه، $s(t)$ و $s(t+1)$ حالت‌های سیستم در زمان t و $t+1$ هستند، و p_{ij} ماتریس احتمال در یک حالت است که از طریق رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

1. States
2. Transition Areas Matrix
3. Conditional Probability Images

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\left(0 \leq p_{ij} < 1 \text{ and } \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, (i, j = 1, 2, \dots, n) \right)$$

مدل سلول‌های خودکار (CA)

مدل‌های خودکار سلولی (CA) و زنجیره‌ای مارکوف مفاهیمی هستند که در شاخه‌های مختلف علوم پایه استفاده می‌شوند (Ghosh, 2017). خودکاره‌های سلولی (CA) سیستم دینامیک گسسته‌ای هستند که در آن فضا به سلول‌های مکانی منظم یا نامنظمی تقسیم شده‌اند و زمان در آن به صورت گام‌های گسسته طی می‌شود. وضعیت هر سلول بر پایه قوانین محلی به صورت هم‌زمان به‌هنگام می‌گردد؛ یعنی وضعیت هر سلول و وضعیت‌های همسایگانش در زمان پیشین است (Wolfram, 1984:34). مدل سلول‌های خودکار را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد (Sang, 2011: 940).

$$S(t, t + 1) = f(s(t), N) \quad (۷)$$

در رابطه فوق، S مجموعه محدود و مجزا از حالت‌های سلولی، N زمینه سلولی، t و $t + 1$ نشان‌دهنده زمان‌های مختلف و f قوانین انتقال حالت‌های سلولی در انتقال حالت‌های سلولی در فضای محلی است.

مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار (CA-Markov)

پس از اجرای مدل زنجیره مارکوف، ماتریس احتمال انتقال به‌دست آمده که ممکن است هر نوع از پوشش زمین را در هر موقعیت مکانی در آینده پیدا کند. اگرچه احتمالات انتقال در هر کاربری دقت زیادی دارد، اطلاعاتی از توزیع مکانی مربوط به کاربری‌ها موجود نیست؛ بنابراین، مدل تصادفی مارکوف هیچ‌گونه اطلاعات وابستگی مکانی ندارد و در مقابل شبکه خودکار عاملی است که توانایی تغییر وضعیتش را براساس به‌کارگیری قانونی که وضعیت جدید را مطابق قبلی و وضعیت همسایگان نشان می‌دهد دارد. در این بین، از فیلتر CA برای تغییر وضعیت سلول‌ها براساس وضعیت همسایه‌اش استفاده خواهد شد؛ بنابراین برای مرتفع کردن مشکلات این دو روش، از روش CA مارکوف استفاده می‌شود (ماهینی، ۱۳۸۹: ۳۵۴).

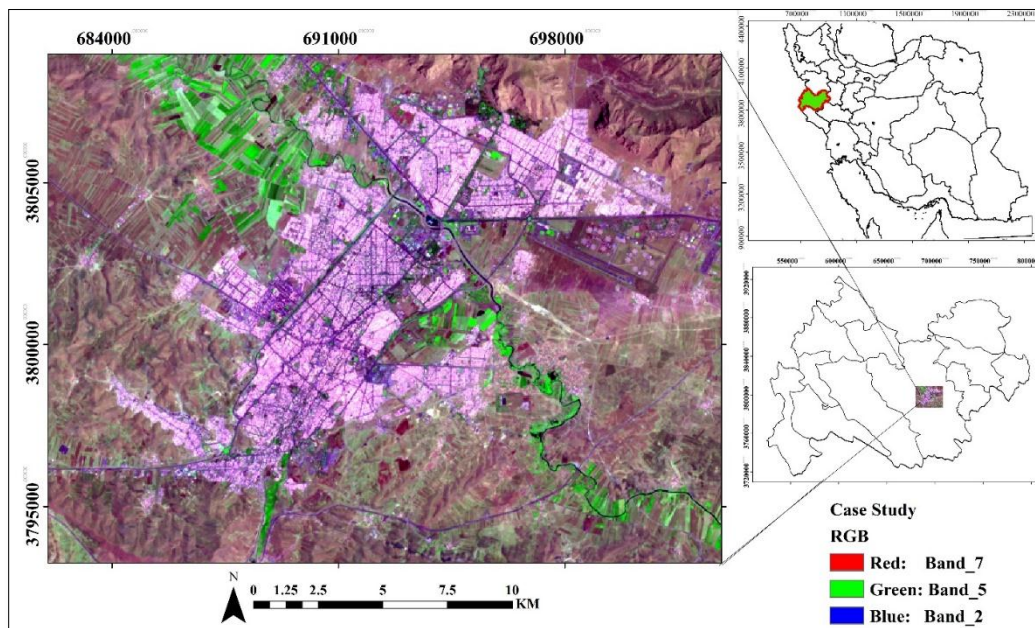
داده و محدوده مورد مطالعه

در پژوهش حاضر از داده‌های هواشناسی ایستگاه همدید کرمانشاه برای روند بارش و از تصاویر سنجنده TM و OLI ماهواره لندست طی دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۳ در ماه جولای برای پایش مساحت کلاس‌های پوشش زمین (<https://earthexplorer.usgs.gov>) اطلاعات مربوط از تصاویر نامبرده در جدول ۱ ارائه شده و درنهایت از لایه‌های GIS (ارتفاع و شیب منطقه، فاصله از پوشش گیاهی، فاصله از نواحی ساخته‌شده شهری، فاصله از نواحی کوهستانی و صخره‌ای، فاصله از شبکه راه‌ها (جاده) و فاصله از رودخانه) استفاده شده است.

جدول ۱. مجموعه داده‌های سنجش‌ازدور کاربردی در پژوهش

تعداد باند	تفکیک باندهای پن کروماتیک	تفکیک مکانی باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی	تفکیک باندهای حرارتی	تفکیک رادیومتریکی	Path: Row	تاریخ	داده‌های سنجش‌ازدور
۷	ندارد	30 × 30 m	120 × 120 m	۸ بیت	167:36	1985	Landsat 5 Thematic Mapper (TM)
۷	ندارد	30 × 30 m	120 × 120 m	۸ بیت	167:36	2000	Landsat 5 Thematic Mapper (TM)
۱۱	15 × 15 m	30 × 30 m	100 × 100 m	۱۶ بیت	167:36	2013	Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)

شهر کرمانشاه در غرب کشور ایران، به‌عنوان مرکز استان کرمانشاه با موقعیت ۴۷ درجه، ۴ دقیقه شرقی و ۱۹ درجه و ۲۴ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا اهمیتی راهبردی دارد. این شهر با جمعیت ۱۰۳۰۰۹۷۸ نفر که ۸۲/۱ درصد از جمعیت شهرنشین استان را شامل می‌شود، بیشترین جمعیت شهری استان را در خود جای داده است (مرکز آمار ایران ۱۳۹۰). در دهه‌های اخیر در این شهر شاهد رشد و توسعه فیزیکی بوده‌ایم که در جریان این توسعه بیش از ۱۰ هزار هکتار از زمین‌های کشاورزی و باغات با تغییر کاربری به زیر ساخت و ساز رفته و تخریب شده است (ثروتی، ۱۳۹۰).



شکل ۲. موقعیت شهر کرمانشاه در ایران، استان کرمانشاه و تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ (سنجنده OLI) محدوده مورد مطالعه: ۲۰۱۵

یافته‌های پژوهش

به منظور استخراج نقشه‌های کلاس‌های پوشش زمین از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ با سنجنده TM و لندست ۸ با سنجنده OLI با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده می‌شود. این تصاویر به سال‌های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۳، و همه به ماه جولای مربوط هستند. همان‌طور که در شکل ۱ اشاره شد مرحله اول، تهیه نقشه‌های کلاس‌های پوشش زمین تصاویر است؛ بنابراین، ابتدا بر روی تصاویر مذکور، تصحیحات اتمسفری با روش QUAC انجام شد. در ادامه این تصاویر با توجه به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه به کلاس‌های ساخت‌وساز شهری، جاده‌ها، اراضی کشاورزی، باغ‌ها، اراضی بایر، سطوح آبی و نواحی کوهستانی و صخره‌ای تفکیک شدند. سپس برخی از کلاس‌های مختلف با هم ترکیب و در نهایت چهار کلاس استخراج شد:

۱. کلاس کاربری ساخت‌وساز شهری که از ترکیب دو کلاس جاده و کلاس ساخت‌وساز شهری است؛

۲. کلاس پوشش گیاهی که شامل کلاس باغ، کلاس پارک و کلاس اراضی کشاورزی است؛

۳. کلاس سطوح آبی؛

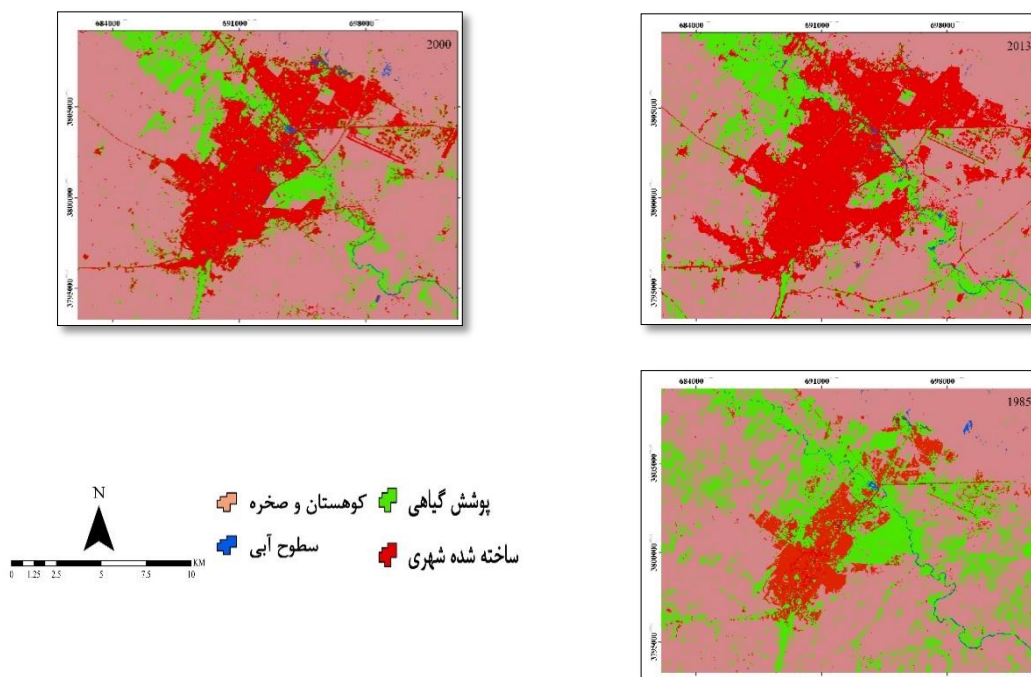
۴. کلاس کوهستان و صخره‌ای که شامل کلاس زمین‌های بایر و کلاس نواحی کوهستانی و صخره‌ای هستند.

در ادامه، تصاویر با الگوریتم حداکثر احتمال طبقه‌بندی شدند (شکل ۳).

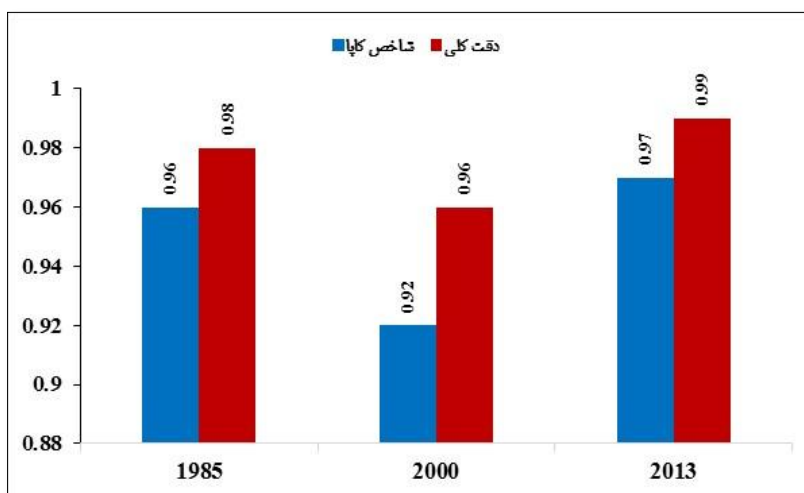
پس از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نمونه‌هایی تعلیمی، صحت تصاویر طبقه‌بندی شده ارزیابی شد.

نتایج مربوط به برآورد دقت طبقه‌بندی‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. دقت طبقه‌بندی‌ها به‌طور کلی بیش از ۰/۷۵، برای

استفاده در مدل مارکوف و سلول‌های خودکار آن مناسب است (کریمی، ۱۳۹۴: ۸۳).

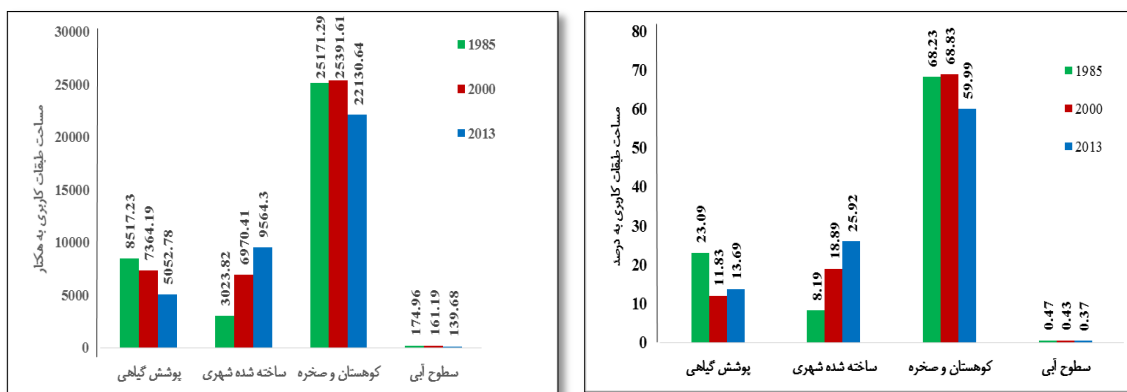


شکل ۳. نقشه‌های کلاس‌های پوشش زمین در سال‌های مورد مطالعه



شکل ۴. دقت کلی و شاخص کاپا برای سه تصویر مورد استفاده

پس از تهیه نقشه‌های کلاس‌های پوشش زمین (شکل ۱)، تغییرات و بررسی تغییرات ایجادشده طی دوره زمانی مورد مطالعه آشکار شد؛ به عبارت دیگر این مرحله تعیین میزان مساحت (هم برحسب هکتار و هم برحسب درصد) و میزان تغییرات کلاس‌های مختلف طی دوره‌های (هر دو دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۰ و ۲۰۰۰-۲۰۱۳) مورد بررسی است که در شکل ۵ و جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. این تغییرات شامل کاهش‌ها، افزایش‌ها و تغییرات خالص برای هر کلاس و انتقال از یک کلاس به کلاس‌های دیگر است.



شکل ۵. هیستوگرام تحلیل مقایسه پس از طبقه‌بندی

جدول ۲. ماتریس تغییرات کلاس‌های پوشش زمین سال ۱۹۸۵ و ۲۰۰۰ بر مبنای هکتار

نقشه سال ۱۹۸۵					
نقشه سال ۲۰۰۰	پوشش گیاهی	ساخته شده شهری	کوهستان و صخره	سطوح آبی	مجموع
پوشش گیاهی	۲۳۶۹/۹۷	۶۶/۰۶	۱۸۹۱/۲۶	۳۶/۹	۴۳۶۴/۱۹
ساخته شده شهری	۱۹۳۶/۹۸	۲۸۶۵/۹۶	۲۱۲۶/۹۷	۴۰/۵	۶۹۷۰/۴۱
کوهستان و صخره	۴۱۷۹/۶۹	۶۲/۸۲	۲۱۱۳۵/۸۷	۱۳/۲۳	۲۵۳۹۱/۶۱
سطوح آبی	۳۰/۶۹	۲۸/۹۸	۱۷/۱۹	۸۴/۳۳	۱۶۱/۱۹
مجموع	۸۵۱۷/۳۳	۳۰۲۳/۸۲	۲۵۱۷۱/۲۹	۱۷۴/۹۶	۳۶۸۸۷/۴

جدول ۳. ماتریس تغییرات کلاس‌های پوشش زمین سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۳ بر مبنای هکتار

نقشه سال ۲۰۰۰					
نقشه سال ۲۰۱۳	پوشش گیاهی	ساخته شده شهری	کوهستان و صخره	سطوح آبی	مجموع
پوشش گیاهی	۲۱۱۸/۶	۲۶۰/۸۲	۲۶۵۵/۴۵	۱۷/۹۱	۲۰۵۲/۷۸
ساخته شده شهری	۱۱۲۵	۶۴۲۰/۶۹	۱۹۴۸/۸۶	۶۹/۷۵	۹۵۶۴/۳
کوهستان و صخره	۱۰۷۵/۴۱	۲۵۵/۶	۲۰۷۷۲/۰۹	۲۷/۵۴	۲۲۱۳۰/۶۴
سطوح آبی	۴۵/۱۸	۳۳/۳	۱۵/۲۱	۴۵/۹۹	۱۳۹/۶۸
مجموع	۴۳۶۴/۱۹	۶۹۷۰/۴۱	۲۵۳۹/۷۱	۱۶۱/۱۹	۳۶۸۸۷/۴

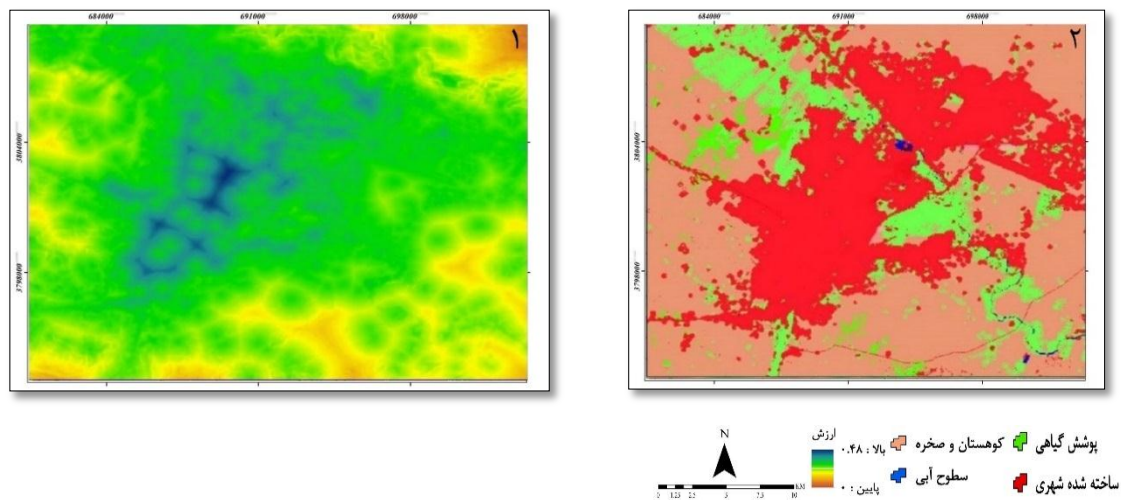
جدول ۴. میزان کل تغییرات کلاس‌های حاصل از طبقه‌بندی در طول سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۱۳

سال/کلاس	پوشش گیاهی	ساخته شده شهری	کوهستان و صخره	سطوح آبی
۱۹۸۵	۸۵۱۷/۳۳	۳۰۲۳/۸۲	۲۵۱۷۱/۲۹	۱۷۴/۹۶
۲۰۱۳	۲۰۵۲/۷۸	۹۵۶۴	۲۲۱۳۰/۶۴	۱۳۹/۶۸
میزان تغییرات کل	-۶۵۶۵	۶۵۴۱	-۳۰۴۱	-۳۵

رگرسیون لجستیک

با توجه به اینکه علل رشد هر شهر با سایر شهرها تفاوت‌های زیادی دارد، همچنین قوانین و مقررات ساخت‌وساز در شهرها با هم متفاوت است، تأثیرات چشمگیری در میزان و چگونگی رشد شهر مشاهده می‌شود. حال با توجه به تحقیقات پیشین و ویژگی‌های منطقه مورد نظر در دوره‌های مورد مطالعه متغیرهای مؤثر در رابطه با گسترش شهری به صورت زیر معرفی شدند:

ارتفاع و شیب منطقه، فاصله از پوشش گیاهی، فاصله از نواحی ساخته‌شده شهری، فاصله از نواحی کوهستانی و صخره‌ای، فاصله از شبکه راه‌ها (جاده) و فاصله از رودخانه. از سوی دیگر تأثیر این پارامترها با هم یکسان نیست؛ بنابراین، باید میزان اهمیت (وزن) هر پارامتر تعیین شود که بدین منظور از مدل رگرسیون لجستیک استفاده می‌شود. منطبق این مدل بر پایه دوره‌های گذشته است؛ مثلاً تغییری که تأثیر زیادی در رشد و توسعه شهر در دوره‌های گذشته مورد بررسی نداشته است، وزن کمتری در مدل‌سازی به آن تعلق می‌گیرد. بالعکس متغیری که تأثیر بیشتری داشته است وزن و ضریب بیشتری دریافت می‌کند. متغیرهای ذکرشده در بالا به‌عنوان متغیر مستقل وارد مدل رگرسیون منطقی شدند، از طرفی دیگر متغیر وابسته مدل تغییرات ایجادشده در شهر است. در نهایت پس از آماده‌سازی متغیرهای مؤثر، مدل رگرسیون لجستیک اجرا شد که نقشه حاصل از آن در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در واقع این نقشه، نقشه پتانسیل تغییر تناسب هر پیکسل را برای تغییر به کاربری شهری نشان می‌دهد که با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک تولید شده است؛ به عبارت دیگر با استفاده از رگرسیون لجستیک ارتباط بین نقشه تغییر به کاربری شهری و عوامل مؤثر بر گسترش شهر بررسی و براساس آن، نقشه پتانسیل تغییر تهیه می‌شود. ارزش بالا نشان‌دهنده تناسب بیشتر هر پیکسل برای تغییر کاربری شهری است، در صورتی که ارزش پایین نشان‌دهنده تناسب و احتمال کمتر تغییر برای هر پیکسل است (عبدی، ۱۳۹۴: ۴۳۷).



شکل ۶. شبیه‌سازی گسترش شهر کرمانشاه برای سال ۲۰۱۳ بر اساس داده‌های ۲۰۰۰-۱۹۸۵

۱. نقشه پتانسیل تغییر مستخرج رگرسیون لجستیک ۲. نقشه شبیه‌سازی گسترش شهر در سال ۲۰۱۳

پس از اجرای مدل رگرسیون لجستیک به منظور پیش‌بینی تغییرات کلاس‌های پوشش زمین برای دوره ۱۳ ساله آینده (۲۰۲۶) از تحلیل زنجیره‌ای مارکوف استفاده شد. پیش‌بینی تغییرات با استفاده از تحلیل زنجیره‌ای مارکوف، بر وضعیت کلاس‌های پوشش زمین در سال ۲۰۲۶ و تغییرات زمین در دوره ۱۳ ساله قبلی بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۶ متکی است. بعد از اجرای تحلیل زنجیره‌ای مارکوف بر روی دو نقشه کلاس‌های پوشش زمین به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، یک ماتریس احتمال انتقال، یک ماتریس مساحت انتقال یافته و چند تصویر شرطی ایجاد شد (جدول‌های ۵ و ۶). تصاویر احتمال شرطی حاصل از تحلیل زنجیره‌ای مارکوف که از ماتریس احتمال انتقال به‌دست آمده است، احتمال اینکه هر نوع پوشش زمین در هر موقعیت مکانی در آینده پیدا شود بیان می‌کند که براساس دو تصویر پوشش زمین قبلی نقشه‌سازی شده است.

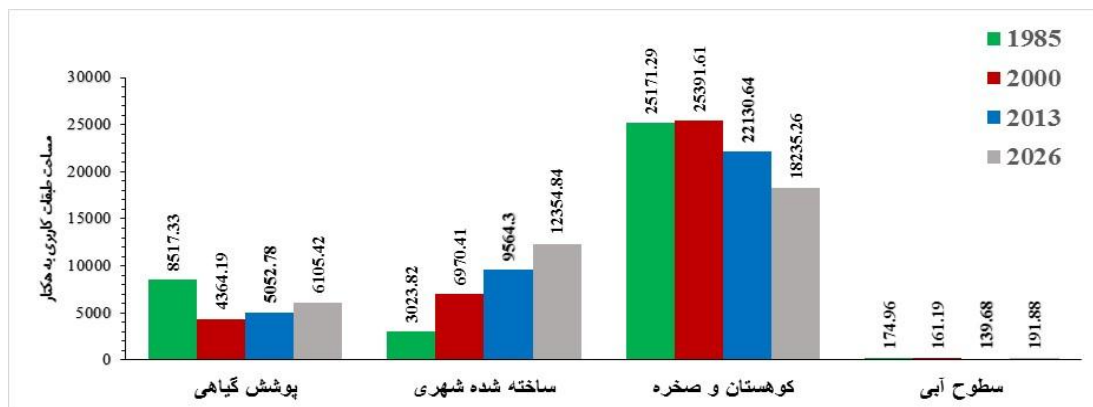
جدول ۵. ماتریس احتمال انتقال تغییر کاربری تحت مطالعه سال تا ۲۰۲۶ با استفاده از مدل زنجیره‌ای مارکوف

کاربری	پوشش گیاهی	ساخته‌شده شهری	کوهستان و صخره	سطوح آبی
پوشش گیاهی	۴۳/۶۹	۳/۸۶	۱۵/۱۶	۱/۱۳
ساخته‌شده شهری	۲۸/۲۱	۹۲/۷۲	۱۱/۱۲	۲/۷
کوهستان و صخره	۲۶/۹۷	۶/۶۷	۷۳/۶۳	۰/۰۹
سطوح آبی	۱/۱۳	۰/۱۷	۰/۰۹	۲۵/۶۸

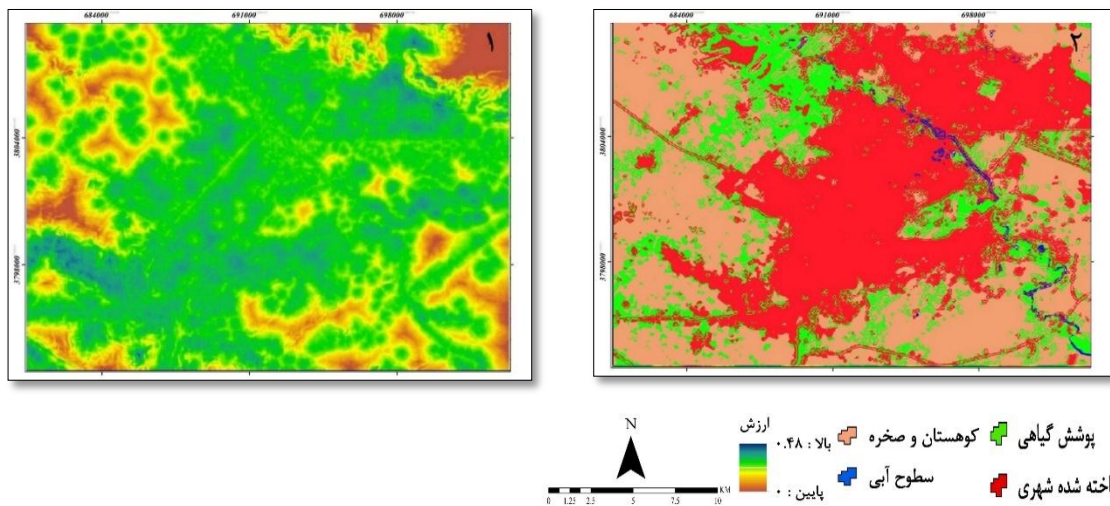
جدول ۶. ماتریس مساحت انتقال یافته تغییر کاربری تحت مطالعه سال تا ۲۰۲۶ با استفاده از مدل زنجیره‌ای مارکوف

کاربری	پوشش گیاهی	ساخته‌شده شهری	کوهستان و صخره	سطوح آبی	مجموع
پوشش گیاهی	۲۲۰۷/۶۱	۱۴۲۵/۴۲	۱۳۶۲/۶	۵۷/۲۴	۵۰۵۲/۷۸
ساخته‌شده شهری	۷۷۵/۸۹	۷۹۲۹	۷۶۰/۳۲	۹۹/۰	۹۵۶۴/۳
کوهستان و صخره	۳۳۵۵/۱۱	۲۴۶۲/۳۱	۱۶۲۹۳/۹۶	۱۹/۲۶	۲۲۱۳۰/۶۴
سطوح آبی	۱۶/۱۱	۶۲/۸۲	۲۴/۸۴	۳۵/۹۱	۱۳۹/۶۸
مجموع	۶۳۵۴/۷۲	۱۱۸۷۹/۵۵	۱۸۴۴۱/۷۲	۲۱۱/۵	۳۶۸۱۷/۴

پس از اجرای مدل زنجیره‌ای مارکوف، به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کلاس‌های پوشش زمین با استفاده از مدل CA مارکوف، از ماتریس مساحت انتقال یافته و ترکیب تصاویر احتمال شرطی و خروجی مدل رگرسیون لجستیک استفاده شد. شکل ۸ نقشه پیش‌بینی شده را برای سال ۲۰۲۶ با استفاده از مدل تلفیقی زنجیره‌ای مارکوف و CA مارکوف نشان می‌دهد. ضریب کاپای حاصل از ماتریس خطا بین نقشه به‌دست‌آمده از مدل‌سازی و نقشه کلاس‌های پوشش زمین به‌دست‌آمده از تصویر ماهواره‌ای لندست سال ۲۰۱۳، ۷۳ درصد بوده است.



شکل ۷. هیستوگرام مقایسه تغییرات کاربری در سال‌های مورد مطالعه



شکل ۸. شبیه‌سازی گسترش شهر کرمانشاه برای سال ۲۰۲۶ براساس داده‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۰. (۱) نقشه پتانسیل تغییر مستخرج رگرسیون لجستیک ۲. نقشه شبیه‌سازی گسترش شهر در سال ۲۰۲۶

بحث و نتیجه‌گیری

یکی از ویژگی‌های اصلی شهرهای در حال توسعه، به‌ویژه کلان‌شهرها، شهرنشینی سریع و بی‌برنامه است که از عوامل اصلی تغییرات کلاس‌های پوشش زمین سطح کره زمین به‌شمار می‌رود. از آنجا که هدف نهایی برنامه‌ریزی کلاس‌های پوشش زمین ایجاد نوعی تعادل اکولوژیک و عدالت اجتماعی در روند توسعه و عمران شهری است، این امر در عمل بدون راهبردی مناسب و مدیریت قوی امکان‌پذیر نخواهد بود. ایجاد شبیه‌سازی دقیق از رشد آینده شهری یکی از مهم‌ترین مسائل در مطالعات شهری است که شامل مدل‌سازی فضایی است (Aburas et al., 2017)؛ بنابراین، شناخت و ارزیابی روند تغییرات کاربری شهری و پیش‌بینی آن‌ها در هر منطقه، زمینه را برای مدیریت بهینه محیط فراهم می‌کند. در واقع، داشتن آمار و اطلاعات از کلاس‌های پوشش اراضی در گذشته و حال، همچنین میزان تغییرات این کلاس‌ها و پیش‌بینی این تغییرات یکی از مبانی لازم برای مدیریت صحیح عرصه‌های طبیعی و انسانی است.

این تغییرات شامل کاهش‌ها، افزایش‌ها و تغییرات خالص برای هر کلاس و انتقال از یک کلاس به کلاس دیگر است. میزان کلاس پوشش گیاهی در دوره اول (سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۸۶) ۴۱۵۳ هکتار کاهش داشته و بیشتر به زمین بایر بدون پوشش گیاهی (۱۸۹۱ هکتار) تبدیل شده است که از خشک‌سالی‌های مربوط به سال‌های ۱۹۹۵، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ ناشی می‌شود؛ طوری که بارش سالانه شهر کرمانشاه از میانگین سالانه ۴۶۰ میلی‌متر به ۲۱۵/۸، ۳۱۴ و ۳۵۲ میلی‌متر کاهش یافته است. همچنین خشک‌سالی‌های مذکور بر روی کلاس سطوح آبی نیز تأثیر گذاشته و ۱۴ هکتار کاهش یافته است. در این دوره کلاس نواحی کوهستانی و صخره‌ای افزایش یافته که دلیل آن کاهش پوشش گیاهی بوده است؛ به طوری که خیلی از اراضی دارای پوشش گیاهی به اراضی بایر و بدون پوشش گیاهی تبدیل شده‌اند. این مهم سبب شده است که حدود ۴۲۰۰ هکتار کلاس نواحی کوهستانی افزایش داشته باشد. در دوره دوم (سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۰) پوشش گیاهی به مقدار ۶۸۹ هکتار افزایش داشته که دلیل آن درختکاری در داخل و اطراف شهر است (گزارش منابع طبیعی و آب‌خیزداری شهر کرمانشاه، ۱۳۹۴)؛ زیرا در این دوره در مقایسه با دوره قبل میزان خشک‌سالی‌ها به مراتب کاهش یافته است. متقابلاً کلاس مناطق کوهستانی و صخره‌ای نیز کاهش یافته که دلیل آن کاشت درخت و ایجاد فضایی سبز در مناطق مذکور و تبدیل اراضی بایر لخت به مرتع است که این مقدار حدود هزار هکتار است، اما در این دوره سطوح آبی به مقدار ۲۲ هکتار کاهش داشته است که بیشتر به کلاس باغ و کشاورزی و کلاس ساخت‌وساز انسانی تبدیل شده است و شاید یکی از دلایل آن استفاده از کشت مکانیزه کشاورزی و حفر چاه‌های آب مجاز و غیرمجاز موجود در منطقه و پیشروی شهر باشد؛ زیرا یکی از دلایل کاهش منابع آب سطحی حفر چاه‌های آب است. در ادامه، نوبت به بررسی پیشروی شهر به سمت محیط اطراف می‌رسد؛ بدین منظور کلاس ساخت ساز شهری را بازنگری می‌کنیم. در دوره اول حدود ۳۹۰۰ هکتار به مساحت شهر اضافه شده که در این مدت بیشتر زمین‌های بایر، کشاورزی و باغات به زیر ساخت‌وساز رفته‌اند. در دوره دوم هم حدوداً ۲۶۰۰ هکتار شهر به اطراف پیشروی داشته و به عبارت دیگر ۲۶۰۰ هکتار به مساحت شهر اضافه شده است. بیشتر اراضی بایر و تپه‌ها نیز به مکان شهری تبدیل شده است که هر دو دوره نشان از رشد زیاد توسعه کلان‌شهر کرمانشاه دارد. در کل دوره ۲۸ ساله مورد بررسی، میزان کلاس پوشش گیاهی و کلاس ساخت‌وساز شهری تغییرات زیادی در مقایسه با دو کلاس دیگر داشته‌اند؛ به طوری که ۶۵۶۵ هکتار از مساحت کلاس پوشش گیاهی کاهش، و کلاس اراضی ساخته‌شده شهری به میزان ۶۵۴۱ هکتار افزایش مساحت داشته و با رشد و توسعه شهری همراه بوده است که اولی بیشتر به دلیل خشک‌سالی‌های موجود در این بازه زمانی بوده و دلیل دومی هم رشد سریع جمعیت شهری و توسعه آن بوده است. در ادامه به منظور پیش‌بینی در سال ۲۰۲۶ که براساس تحلیل زنجیره‌ای مارکوف انجام شد، ۱۴۲۵ هکتار (۳/۸۶ درصد) از پوشش گیاهی، ۲۴۶۲ هکتار (۶/۶۷ درصد) از مناطق کوهستانی و صخره‌ای و ۶۲ هکتار (۰/۱۷ درصد) از سطوح آبی به کاربری شهری تبدیل خواهند شد. از سوی دیگر نتایج پیش‌بینی تغییرات با استفاده از روش سلول‌های خودکار نشان داد که بیشترین تغییرات با توجه به روند گذشته در مناطق ساخته‌شده شهری اتفاق خواهد افتاد؛ به طوری که این کاربری ۹۵۶۵ هکتار در سال ۲۰۱۳ به ۱۲۳۵۵ در سال ۲۰۲۶ خواهند رسید و ۲۷۹۰ هکتار افزایش خواهد داشت. بعد از کاربری مذکور با توجه به نتایج مدل، مناطق پوشش گیاهی نیز به مقدار ۱۰۵۳ هکتار در مقایسه با سال ۲۰۱۳ افزایش خواهد داشت (البته طرح جنگل‌کاری شهر کرمانشاه از سوی

سازمان پارک ها و فضای سبز شهرداری کرمانشاه در حال اجراست، ۱۳۹۴). متقابلاً مناطق کوهستانی و صخره‌ای به دلیل افزایش پوشش گیاهی (ایجاد فضایی سبز و کاشت درخت) از لخت بودن خارج خواهد شد و سطح مناطق کاربری آن کاهش می‌یابد، اما در سال ۲۰۲۶ سطوح آبی در حدود ۵۲ هکتار بیشتر می‌شود و چون بیشتر این سطوح آبی اضافه‌شده در محدوده رودخانه قره‌سو است می‌توان گفت که ممکن است به دلیل تخلیه حجم عظیمی از شبکه فاضلاب‌های خانگی وارد رودخانه قره‌سو، و سبب افزایش این طبقه شده است.

پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی روند توسعه شهر کرمانشاه برای برنامه‌ریزی منسجم به منظور توسعه آتی این شهر با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی صورت گرفت و برای این کار از تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. باید توجه داشت توسعه فیزیکی شهر کرمانشاه زمانی مؤثر است که به صورت کنترل شده و هدایت شده صورت بگیرد و قبل از مکان‌گزینی آن‌ها، گزینه‌های مناسب بدین منظور بررسی و ارزیابی شود. با استفاده از چنین نتایجی در طرح‌ها و تصمیم‌گیری‌های شهر کرمانشاه می‌توان از گسترش شهر به سمت نواحی نامناسب برای استقرار در آینده، و درنهایت از بروز مشکلات ناخواسته زیست‌محیطی و اقتصادی جلوگیری کرد. نتایج این مطالعه گویای آن است که تلفیق فنون سنجش‌ازدور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در اجرای مدل‌های ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کلاس‌های پوشش زمین و پیش‌بینی، به منظور آگاهی از نوع و درصد کلاس‌های پوشش زمین و میزان تغییرات آن‌ها، در منابع طبیعی، انسانی و بخش‌های دیگر بسیار کارآمد است. در این بین، هدف مدل‌سازی انجام‌شده کمک به طراحان شهری و سایر پژوهشگران است تا بتوانند وضعیت محدوده شهرها و دیگر تغییرات کلاس‌های پوشش زمین را در آینده پیش‌بینی کنند. از سوی دیگر، رشد برنامه‌ریزی شده شهر و کنترل آن با استفاده از مشخصه‌های فوق در میزان هزینه‌های عمرانی و زیست‌محیطی نیز صرفه‌جویی کند.

منابع

- احدنژاد، محسن، قاسمی، اکرم و لیلا کاظمی (۱۳۹۲)، «استفاده از الگوی راهبردی توسعه شهری در برنامه‌ریزی کاربری فضای سبز (مطالعه موردی: منطقه یک شهر زنجان)»، فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی چشم‌انداز زاگرس، سال ۶، شماره ۱۹، صص ۷-۲۱.
- باقری، رضا و شتایی جویباری، شعبانی (۱۳۸۹)، «مدل‌سازی کاهش گسترده جنگل با استفاده از رگوسیونلجستیک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان)»، جنگل ایران، دوره ۲، شماره ۳، صص ۲۴۳-۲۵۲.
- برات‌علی، خاکپور، ملک‌پور، محسن و کیومرث ایران‌دوست (۱۳۹۰)، نقش مهاجرت روستا-شهری در توسعه فیزیکی بدون برنامه شهر کرمانشاه، پایان‌نامه دانشگاه فردوسی مشهد.
- ثروتی، محمدرضا و همکاران (۱۳۹۰)، بررسی روند شهرنشینی و توسعه فیزیکی شهر کرمانشاه، نخستین همایش ملی آرمان‌شهر ایران، نور، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور.
- جلیبان، امیرحسین و محمود سلطانیان (۱۳۹۵)، «ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات بیابان‌زایی در شرق و جنوب اصفهان با مدل CA-Markov»، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۴، صص ۷۱-۸۸.
- زنگنه شهرکی، سعید، کاظم‌زاده، علی و سیروس هاشمی دره بادامی (۱۳۹۳)، «تحلیل زمانی-مکانی گسترش کالبدی شهر مشهد و پایش تغییرات کاربری اراضی اطراف»، جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، دوره ۲، شماره ۴، صص ۴۸۳-۴۹۹.
- سرودی، مونا و سیدعلی جوزی (۱۳۹۰)، «پیش‌بینی تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از مدل مارکوف (مطالعه موردی: منطقه ۴ شهرداری تهران)»، کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در علوم منابع طبیعی، شماره ۲، صص ۸۳-۹۶.
- صیدی‌لو، محمود، امینی، الهام و فرهاد حمزه (۱۳۹۵)، ارزیابی گسترش فیزیکی شهر رباط‌کریم و تأثیر آن بر روی اراضی کشاورزی با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، کنفرانس بین‌المللی مهندس معماری و شهرسازی، تهران.
- عبدی، ناصح و همکاران (۱۳۹۴)، «ارزیابی و پیش‌بینی مسیر بهینه گسترش شهری سنندج با استفاده از سلول‌های خودکار-مارکوف»، پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، دوره ۳، شماره ۴، صص ۴۳۱-۴۴۶.
- عزیزی قلاتی و همکاران (۱۳۹۵)، «پیش‌بینی روند تغییرات مکانی کاربری اراضی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف-CA (مطالعه موردی: منطقه کوهمره سرخی استان فارس)»، سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، شماره ۱، صص ۵۹-۷۱.
- علی‌محمدی سراب و همکاران (۱۳۸۹) «ارزیابی کارایی مدل سلول‌های خودکار در شبیه‌سازی گسترش اراضی شهری در حومه جنوب غرب تهران»، برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، شماره ۲، صص ۸۱-۱۰۲.
- فلاح‌کار، سامره و همکاران (۱۳۸۸)، بررسی توانایی مدل CA مارکوف در پیش‌بینی نقشه پوشش اراضی (مطالعه موردی: شهر اصفهان)، همایش ژئوماتیک ۸۸، تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور.
- کاظم، امیرحسین، حسینعلی، فرهاد و علی‌اصغر آل‌شیخ (۱۳۹۴)، «مدل‌سازی رشد شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای متوسط مقیاس و مبتنی بر روش خودکارهای سلولی (مطالعه موردی: شهر تهران)»، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۴، شماره ۹۴، صص ۴۴-۵۸.
- کاوه، ندا و عطالله ابراهیمی (۱۳۹۲)، «پیش‌بینی تغییرات کاربری/پوشش اراضی با مدل CA مارکوف (مطالعه موردی: رودخانه آق‌بلاغ)»، کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در علوم منابع طبیعی، شماره ۲، صص ۴۱-۵۱.

کریمی، کامران و چوقی بایرام کمکی (۱۳۹۴)، «پایش، ارزیابی و پیش‌بینی روند تغییرات مکانی کاربری اراضی / پوشش زمین با استفاده از مدل زنجیره‌ای مارکوف»، *سنجش‌ازدور و دور سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، سال ۶، شماره ۲، صص ۷۵-۸۸.

ماهینی، عبدالرسول (مترجم)، کامیاب، حمیدرضا (مترجم)، رونالد ایستمن، ج (۱۳۸۹)، *سنجش‌از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی کاربردی با نرم‌افزار ایدریسی*، تهران، نشر مهر مهدیس.

میرزایی‌زاده، وحید، نیک‌نژاد، اولادی قادیکلایی، جعفر (۱۳۹۴)، «ارزیابی الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده غیرپارامتریک در تهیه نقشه پوشش زمین با استفاده از تصاویر لندست ۸» *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، سال ۶، شماره ۳، صص ۲۹-۴۴.

Asanjani, J.J, Helbich, M, Kainz, W, and Darvishi Bolorani, A, (2013), Integration of regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*, No. 2: 265-275.

Coppin, P; Jonckheere, I; Nackaerts, K; Muys, B; (2004), *Digital change detection methods in ecosystem monitoring*, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 9: 1565-1596.

Dai, F.C, and Lee, CF, (2002), Landslid characteristics and slope instability modeling using GIS, *Lantau Isiland, Hong kong. Geomorphology*. NO.4: 213-228.

Dawelbait, M, and Morai, F, (2012), Monitoring desertification in a savannah region in Sudan using Landsat images and spectral mixture analysis. *Journal of Arid Environments*. 8: 45-55.

Deep, SH; Saklani, A, (2014), Urban sprawl modeling using cellular automata. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. No.17, 179-187.

Doygun, H, (2008), Effects of urban sprawl on agricultural land: a case study of Kahramanmaras, Turkey. *Environ Monit Assess*, No. 1: 471-478.

Feyisa, G.L; Meilby, H, Jenerette, G.D, and Pauliet, S, (2016), locally optimized separability enhancement indices for urban land cover mapping: Exploring thermal environmental consequences of rapid urbanization in Addis Ababa, Ethiopia. *Remote Sensing of Environment*, No. 1: 14-31.

Jensen, J. R; (2005), *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (3rd Edn), Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.

Jensen, J.R, (2007), *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, Pearson Prentice Hall, p: 592.

Koomen, E; Stillwell, J; Bakema, A; and Scholten, H.J (2007), *Modelling Land-use Change, Progress and Applications*, Netherlands, Springer, p: 410.

Lu, D; Mausel, P; Brondizio, E; Moran, E, (2004), *Change detection techniques*, *International Journal of Remote sensing*, Vol. 25, No.12: 2365- 2401.

Mayes, M.T, Mustard, J.F. and Melillo, J.M, (2015), Forest cover change in Miombo Woodlands: Modeling land cover of Africa dry tropical forests with linear spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*. No.165: 203-215.

Mitsova, D; Shuster, W; Wang, X, (2011), A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 99, No. 2: 141-153.

- Nouri, J; Gharagozlou, A; and Arjmandi, R, (2014), Predicting urban Land Use Changes Using a CA-Markov Model. Research ARTICLE – Earth Sciences. 1-9.
- Rowbotham, D.N; and Dudycha, D, (1998), GIS modelling of slope stability in Phewa Tal watershed, Nepal. *Geomorphology*, No. 2: 151-170.
- Sang, L; Zhang, C; Yang, J; Zhu, D; Yun, W, (2011), Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 54, No.3: 938-943.
- Wolfram, Stephen. (1984), "Cellular automata as models of complexity." *Nature* 311.5: 419-424.
- Weng, Q, (2022), *Land use change analysis in the remote sensing, GIS and stochastic modelling*, *Journal of Environmental Management*, Vol.64, No. 3: 273-284.
- Wyman, M. S; Stein, T.V; (2010), Modeling social and land-use/land-cover change data to assess drivers of smallholder deforestation in Belize, *Applied Geography*, Vol. 30, No.3: 329-342.
- Wu, Qiong, Li, Hong-qing, Wang, Ru-song, Paulussen, Juergen, He, Yong, Wang, Min, Wang, Bi-hui, Wang, zhen (2006), Monitoring and predicting land use change in Beijing using remote sensing and GIS, *Landscape and urban planning*, Article in press.
- Marwa Waseem A. Halmy, Paul E. Gessler, Jeffrey A. Hicke, Boshra B. Salem (2015), Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA. *Applied Geography* No.6: 101-112.
- Aburas M. M, Hoa Y. M, Ramlib M. F, Ash'aari Z. H. (2017), Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, NO. 5: 65-78.
- Yang X, Zheng X. O, Chen R. (2014), A land use change model: Integrating landscape pattern indexes and Markov-CA. *Ecological Modelling* No.2: 1-7.
- Gonga W, Yuanb L, Fanc W, Stottda College Ph. Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata—Markov modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, No. 3: 207-216.
- u Han, Haifeng Jia. (2016), Simulating the spatial dynamics of urban growth with an integrated modeling approach: A case study of Foshan, China. *Ecological Modelling* No.3: 107-116.
- Ghosh P, Mukhopadhyay A, Chanda A, Mondal P, Akhand A, Mukherjee S, Nayak S.K, Ghosh S, Mitra D, Ghosh T, Hazra S. Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling- A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* No.5: 64-77.