

## Original Article



# Land Use/Cover Change Modeling with Emphasis on Built-Up Land Growth with the Help of CA-Markov Model Integration and Multi-Criteria Decision Analysis Based on GIS.(Case Study: Aras River Watershed)

Sadegh Boulaghi<sup>1</sup>, Haniyeh Afsahi<sup>1</sup>, Masoud Minaei<sup>2\*</sup> 

## Affiliation

1. M.Sc. Student, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Geographic Information Science/System and Remote Sensing Laboratory (GISSRS: Lab), Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Associate Prof., Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Geographic Information Science/System and Remote Sensing Laboratory (GISSRS: Lab), Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

**Citation:** Boulaghi, S., Afsahi, H., Minaei, M., Land Use/Cover Change Modeling with Emphasis on Built-Up Land Growth with the Help of CA-Markov Model Integration and Multi-Criteria Decision Analysis Based on GIS.(Case Study: Aras River Watershed), Iran J Remote Sens GIS. 16(2):137-158.

## ABSTRACT

**Introduction:** In recent years, global population growth and urban expansion have led to significant land use and cover changes. These changes have numerous detrimental consequences, such as increasing surface temperatures, deforestation, desertification, degradation of ecosystem services, biodiversity loss, and threats to food security. Therefore, monitoring and modeling these changes are essential for optimal land management and sustainable utilization of natural resources. Given that the Aras River Basin has undergone significant transformations over time, particularly in built-up land developments, this research focuses on modeling land use/land cover changes in this area.

**Materials and Methods:** Initially, land use maps for the region were extracted for the years 2000 and 2020 from the Globeland30 project of the China National Geomatics Center. Subsequently, two maps were prepared to illustrate the potential growth of built-up land based on a land development scenario. This was achieved using advanced decision-making analysis methods based on GIS, including BWM and MEREC. Finally, these two maps, along with the land use maps, were combined to form the input for the CA-Markov model. The modeling process was carried out twice: once using the BWM + CA-Markov combination, and again using the CA-Markov + MEREC combination for the year 2040.

**Results and Discussion:** The examination of the results demonstrated that in the output of the combined BWM + CA-Markov model, the extent of built-up land increased from 603 square kilometers in 2020 to over 930 square kilometers in 2040. Meanwhile, this figure was approximately 829 square kilometers in the output of the MEREC + CA-Markov model. Furthermore, the final results obtained from the intersection of these combined models also indicated an increase in the extent of this land from 603 square kilometers in 2020 to 930 square kilometers in 2040.

**Conclusion:** The continuous growth of built-up land in this basin can lead to the destruction of environmental resources and pose threats to ecosystems. The findings of this study provide relevant managers with valuable insights for optimal management of future conditions and the provision of necessary infrastructure.

**Keywords:** Land Use/Cover, Built-Up Land, Markov Chain, Cellular Automata, Multi-Criteria Decision Analysis (MCDM), Aras River watershed.



# مدل‌سازی تغییرات کاربری / پوشش اراضی با تأکید بر رشد اراضی انسان‌ساخت به کمک تلفیق مدل CA-Markov و تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه ارس)

صادق بولاچی<sup>۱</sup>، حانیه افصیحی<sup>۱</sup>، مسعود مینائی<sup>۱،۲</sup>



سمت

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جغرافیا دانشگاه فردوسی مشهد، آزمایشگاه علم/سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
۲. دانشیار گروه جغرافیا دانشگاه فردوسی مشهد، آزمایشگاه علم/سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

## چکیده

**سابقه و هدف:** در سال‌های اخیر افزایش جمعیت جهان و گسترش شهرنشینی، به ایجاد تغییرات گسترده‌ای در کاربری و پوشش اراضی منجر شده است. این فرایند پیامدهای زیان‌بار متعددی مانند افزایش دمای سطح زمین، جنگل‌زدایی و بیابان‌زایی، کاهش کیفیت خدمات اکوسیستم، کاهش تنوع زیستی و تهدید امنیت غذایی خواهد داشت. از این رو پایش و مدل‌سازی این تغییرات ضروری است و می‌توان با مدیریت بهینه اراضی گام مهمی در بهره‌وری صحیح از منابع طبیعی و توزیع امکانات برداشت. نظر به این مهم که حوضه آبریز رودخانه ارس در طول زمان دچار تحولات بسیاری به‌خصوص در اراضی انسان‌ساخت شده است، تمرکز پژوهش حاضر بر مدل‌سازی تغییرات کاربری/پوشش اراضی در این حوزه است.

**مواد و روش‌ها:** در این راستا ابتدا نقشه‌های کاربری اراضی منطقه برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ از پروژه Globeland30 مرکز ملی ژئوماتیک چین استخراج شدند. در ادامه نیز با توجه به سناریوی رشد اراضی انسان‌ساخت و به کمک روش‌های BWM و MEREC که از جمله روش‌های نوین تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS به‌شمار می‌روند، دو نقشه برای نمایش پتانسیل رشد اراضی انسان‌ساخت منطقه تهیه شده است. در انتها این دو نقشه و نقشه‌های کاربری اراضی ورودی‌های مدل CA-Markov را تشکیل داده و فرایند مدل‌سازی یک‌بار با ترکیب CA-Markov + BWM و بار دیگر با ترکیب CA-Markov + MEREC برای سال ۲۰۴۰ انجام شده است.

**نتایج و بحث:** بررسی نتایج نشان داد که در خروجی مدل ترکیبی CA-Markov + BWM وسعت اراضی انسان‌ساخت از ۶۰۳ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۰ به بیش از ۹۳۰ کیلومتر مربع در سال ۲۰۴۰ افزایش یافته است. در حالی که این رقم در خروجی مدل CA-Markov + MEREC حدود ۸۲۹ کیلومتر مربع است. از طرفی نتایج نهایی حاصل از اشتراک خروجی مدل‌های ترکیبی مذکور نیز نشان داد که وسعت این اراضی از ۶۰۳ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۰ به ۹۳۰ کیلومتر مربع در سال ۲۰۴۰ افزایش خواهد یافت.

**نتیجه‌گیری:** رشد فزاینده اراضی انسان‌ساخت در این حوضه می‌تواند به تخریب منابع زیست‌محیطی و تهدید اکوسیستم منجر شود. نتایج این پژوهش مدیران مربوطه را در راستای مدیریت بهینه شرایط پیش رو و فراهم آوردن زیرساخت‌های مقتضی یاری می‌رساند.

**واژه‌های کلیدی:** کاربری/پوشش اراضی، اراضی انسان‌ساخت، زنجیره مارکوف، سلول‌های خودکار، تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، حوضه آبریز رودخانه ارس.

**استناد:** بولاچی، ص.، افصیحی، ح.، مینائی، م.، مدل‌سازی تغییرات کاربری/پوشش اراضی با تأکید بر رشد اراضی انسان‌ساخت به کمک تلفیق مدل CA-Markov و تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه ارس)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ۱۵۸-۱۳۷.



## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر جمعیت جهان به شدت رو به افزایش بوده و به‌تازگی نیز از مرز ۸ میلیارد نفر عبور کرده است (Ngo, 2023). یکی از پیامدهای رشد روزافزون جمعیت، تغییر در سیمای زمین است که در قالب تغییرات کاربری/ پوشش زمین (LULC)<sup>۱</sup> ظاهر می‌شود (Shukla et al., 2018). علاوه بر رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی نیز به‌عنوان دیگر عامل محرک وقوع این تغییرات شناخته می‌شود (Latue & Rakuasa, 2023). از این رو می‌توان گفت که تغییرات LULC از فرایندی زمانمند و متأثر از فعالیت‌های انسانی تبعیت می‌کند که تعاملات بین انسان و محیط پیرامون آن را نشان می‌دهد (Chen et al., 2022). این فرایند می‌تواند در مقیاس محلی تا جهانی پیامدهای زیان‌باری همچون افزایش دمای سطح زمین (Pertuack & Latue, 2023)، جنگل‌زدایی و بیابان‌زایی (Minaei & Kainz, 2016)، کاهش کیفیت خدمات اکوسیستم (Li et al., 2022)، کاهش تنوع زیستی (Shah et al., 2023)، تخریب منابع طبیعی (Mostafazadeh & Talebi khiavi, 2022) و تهدید امنیت غذایی (Talebi khiavi et al., 2022) را به بار آورد. در این بین، حوضه‌های آبریز یکی از مناطق درگیر با این مسئله به‌شمار می‌روند که تغییر LULC در آن معمولاً به‌صورت کاهش وسعت اراضی مرتعی، جنگلی و زراعی و افزایش اراضی بایر و انسان‌ساخت ظاهر می‌شود (Xiao et al., 2023). سهم عمده‌ای از تغییرات LULC در حوضه‌های آبریز ناشی از گسترش شهرنشینی و اراضی انسان‌ساخت است که می‌تواند اکوسیستم آن منطقه را تحت الشعاع قرار دهد (Sohail et al., 2023). در این راستا و به‌منظور دستیابی به اهداف توسعه پایدار و کاهش تلفات منابع طبیعی در این حوضه‌های آبریز، مدیریت کاربری و پوشش اراضی بسیار ضروری بوده و به چالشی مهم برای متولیان حوزه مربوطه تبدیل شده است (Christensen & Jokar Arsanjani, 2020). گفتنی است که مدل‌سازی زمانی- مکانی تغییرات LULC مدیران مربوطه را در راستای فراهم

آوردن زیرساخت‌های مورد نیاز یاری می‌رساند و از گذشته تا کنون یکی از اصلی‌ترین راه‌حل‌های این چالش، قلمداد می‌شود (Zarandian et al., 2018). امروزه روش‌های مبتنی بر سنجش‌از‌دور<sup>۲</sup> و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)<sup>۳</sup> از جمله روش‌های کارآمد برای مدل‌سازی تغییرات LULC به‌شمار می‌روند (Gurbuz & Cilek, 2023). تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای و تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)<sup>۴</sup> مبتنی بر GIS می‌توانند در زمینه مورد بحث بسیار کارساز باشند (Rahman & Szabó, 2022). از طرفی یکی از مدل‌های منطبق بر سنجش‌از‌دور و GIS که از اعتبار بسیار بالایی در زمینه مدل‌سازی تغییرات LULC برخوردار است، مدل ترکیبی CA-Markov است (Zhang et al., 2023). از این رو مطالعات زیادی با بهره‌مندی از این مدل انجام شده است. اما غالب مطالعات انجام‌شده بر مدل‌سازی تغییرات LULC پیرامون شهرها تمرکز داشته و مطالعات اندکی به کلیت حوضه‌های آبریز پرداخته‌اند. از جمله این مطالعات می‌توان به (Hua, 2017) اشاره کرد که در آن با استفاده از همین مدل و تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای Landsat، تغییرات LULC حوضه آبریز رودخانه مالاکا<sup>۵</sup> در کشور مالزی را برای سال ۲۰۲۹ شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد اراضی انسان‌ساخت در منطقه به‌شدت رو به افزایش است که می‌تواند به آلودگی این رودخانه منجر شود و به‌طور کلی اکوسیستم منطقه را تهدید کند. در مطالعه‌ای مشابه که در منطقه جیانگل<sup>۶</sup> در چین انجام شده است (Liping, Yujun, & Saeed, 2018)، به‌منظور مدل‌سازی تغییرات LULC منطقه برای سال ۲۰۳۶، از مدل CA-Markov بهره بردند. نتایج این پژوهش نیز حاکی از رشد روزافزون اراضی انسان‌ساخت

1. Land Use Land Cover
2. Remote Sensing
3. Geographic Information System
4. Multi-Criteria Decision Analysis
5. Malacca
6. Jeongal

و مدل CA-Markov تغییرات LULC حوضه آبریز نکارود در گیلان را برای سال ۲۰۳۰ شبیه‌سازی کردند. نتایج حاکی از افزایش ۳۴ درصدی اراضی انسان‌ساخت بود. در همین زمینه کریم‌زاده مطلق و همکاران (Karimzadeh Motlagh et al., 2022) با استفاده از مدل یادشده تغییرات LULC حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود را برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که فعالیت‌های شهری و صنعتی در منطقه به‌شدت در حال افزایش است که این امر می‌تواند تهدیدی جدی برای اکوسیستم منطقه باشد. مطالعه مکرم و فام (Mokarram & Pham, 2023)، در حوضه آبریز دریاچه بختگان از نمونه‌های اخیر مطالعاتی است که با استفاده از مدل CA-Markov و داده‌های ماهواره‌ای Landsat در ایران انجام شده است. در این پژوهش محققان که به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در سال ۲۰۴۰ پرداخته‌اند. نتیجه این مطالعه نشان داد کاربری‌های جنگلی و کشاورزی روند کاهشی داشته و در عوض اراضی بایر و انسان‌ساخت از روندی افزایشی برخوردار بوده که هشدار مهمی در خصوص احتمال بروز خشکسالی در منطقه است.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اکثر مطالعاتی که در این زمینه انجام شده در مقیاس یک حوضه آبریز داخلی و کوچک بوده است؛ اما پژوهش حاضر سعی دارد با ارائه رویکردی کارآمد تغییرات LULC حوضه آبریز رودخانه ارس به‌عنوان یک حوضه بزرگ و مهم مرزی کشور را برای سال ۲۰۴۰ مدل‌سازی کند. در این راستا از مدل‌های BWM<sup>۱</sup> و MEREC<sup>۲</sup> که از روش‌های نوین تحلیل‌های MCDM مبتنی بر GIS هستند نیز استفاده شده است. در ادامه منطقه مورد مطالعه، داده‌ها و روش انجام پژوهش، معیارهای تصمیم‌گیری، روش‌های تلفیق داده‌ها و نتایج و ارزیابی آن‌ها ارائه شده است.

در منطقه بود. در همین راستا، یولیانتو و همکاران (Yulianto, Maulana, & Khomarudin, 2018) از مدل مذکور برای شبیه‌سازی تغییرات اراضی حوضه آبریز رودخانه سیتاروم<sup>۱</sup> در اندونزی استفاده کردند. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که تا سال ۲۰۵۰ سطوح انسان‌ساخت در این حوضه به‌طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. در طرف مقابل کاهش محسوسی در اراضی جنگلی منطقه قابل مشاهده بود. در نمونه‌ای دیگر (Camara et al., 2020) در حوضه آبریز سلانگور<sup>۲</sup> در مالزی با تکیه بر مدل CA-Markov و نقشه‌های زمانی LULC منطقه برای سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۶، ۲۰۱۵ ضمن پایش تغییرات اراضی منطقه، روند این تغییرات منطقه را به‌ترتیب برای سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۳۲ مدل‌سازی کردند. ایشان دریافتند که در آینده اراضی انسان‌ساخت منطقه به‌طرز چشمگیری افزایش خواهد داشت و به‌تبع آن، مساحت جنگلی در حوضه گرمسیری کاهش خواهد یافت. به‌تازگی نیز کیسامبا و لی (Kisamba & Li, 2023)، در تحقیق خود به شبیه‌سازی تغییرات LULC حوضه آبریز ماهی<sup>۳</sup> در ایالت راجستان کشور هند پرداختند. ایشان با به‌کارگیری مدل CA-Markov و تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره GIS دریافتند که در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰، ۲۱ کیلومتر مربع به وسعت اراضی انسان‌ساخت پیرامون این حوضه اضافه خواهد شد.

در ایران نیز مطالعاتی در این زمینه انجام شده است، از جمله پژوهش کوروش‌نیا و همکاران (Kourosh, Niya et al., 2020)، نمونه‌ای از چنین مطالعاتی است که در آن از مدل مورد بحث برای مدل‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی جزیره قشم (به‌عنوان یک حوضه مستقل) در سال ۱۴۰۴ استفاده کرده است. یافته‌های این مطالعه نتایجی مبتنی بر کاهش وسعت جنگل‌های حرا و افزایش وسعت اراضی انسان‌ساخت منطقه ارائه داد. همسو با این مطالعه توانگر و همکاران (Tavangar et al., 2021)، در پژوهش خود با بهره‌مندی از تصاویر ماهواره‌ای Landsat در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴

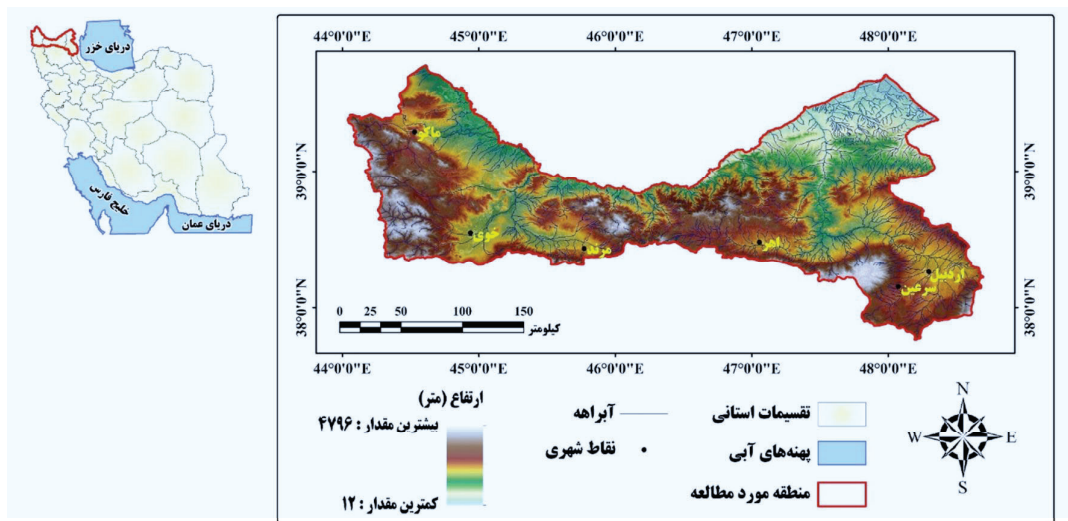
1. Citarum
2. Selangor
3. Mahi
4. Best-Worst Method
5. Method Based on the Removal Effects of Criteria

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه ارس، مجموعاً ۲۲۰۱۰۰ کیلومترمربع وسعت دارد که از این مقدار، ۳۹۵۳۴ کیلومترمربع در کشور ایران، ۲۳۰۹۲ کیلومترمربع در خاک ترکیه و مابقی آن در دو کشور ارمنستان و آذربایجان واقع شده است (Mustafa & Ghasemlounia, 2021). منطقه مورد مطالعه این پژوهش قسمت جنوبی این حوضه است که با مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۱ دقیقه و ۴۲ ثانیه تا ۴۰ درجه و ۴۲ دقیقه و ۳۳ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه تا ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه و ۷ ثانیه عرض شمالی در شمال غرب کشور ایران واقع شده است (شکل ۱). این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی ایران دربرگیرنده بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل می‌شود. توپوگرافی حوضه آبریز رودخانه ارس شامل مناطق مسطح و کوهستانی است که به‌عنوان اراضی کشاورزی و دام‌پروری استفاده می‌شود (Sanakhan et al., 2020). قله‌های سبلان، هرم داغ، قیه و قره داش از ارتفاعات شاخص این منطقه به‌شمار می‌رود (Moradi & Sharifi, 2023). از آنجاکه حوضه آبریز رودخانه ارس در عرض‌های جغرافیایی بالا و ارتفاع زیاد واقع شده است،

میانگین سالانه دمای آن کمتر است و از مناطق با اقلیم سردسیر کشور به حساب می‌آید (Aalijahan & Hatami, 2021). رودخانه‌های ارس، کلبرچای و آغ‌چای عمده منابع آبی این منطقه را تشکیل می‌دهند. خشکسالی و برداشت بیش‌ازحد از منابع آبی سبب کمبود منابع آبی در این منطقه شده است (Hajihoseini et al., 2023). به‌لحاظ ذخایر معدنی نیز این حوضه منابع غنی از مس، آهن، آلومینیوم، سرب و روی را در اختیار دارد (Nasehi et al., 2013). این منابع معدنی نقش بسزایی در توسعه اقتصادی و صنعتی این منطقه داشته و سبب رونق تولید و اشتغال‌زایی در این منطقه شده است (Geranian, 2022). یکی از پیامدهای اصلی چنین وضعیتی گسترش شهرنشینی است، آمارها نشان می‌دهد که حوضه آبریز رودخانه ارس، یکی از مناطق پرجمعیت در ایران است و تخمین زده می‌شود که تا سال ۱۴۰۱ بیش از پنج میلیون نفر در این منطقه سکنا گزیده‌اند. مناطق شهری همچون اردبیل، اسفراین، اهر، خوی، ماکو و مرند و همچنین مناطق روستایی فراوانی در این حوضه واقع شده‌اند (Aslami & Ghorbani, 2018).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه.

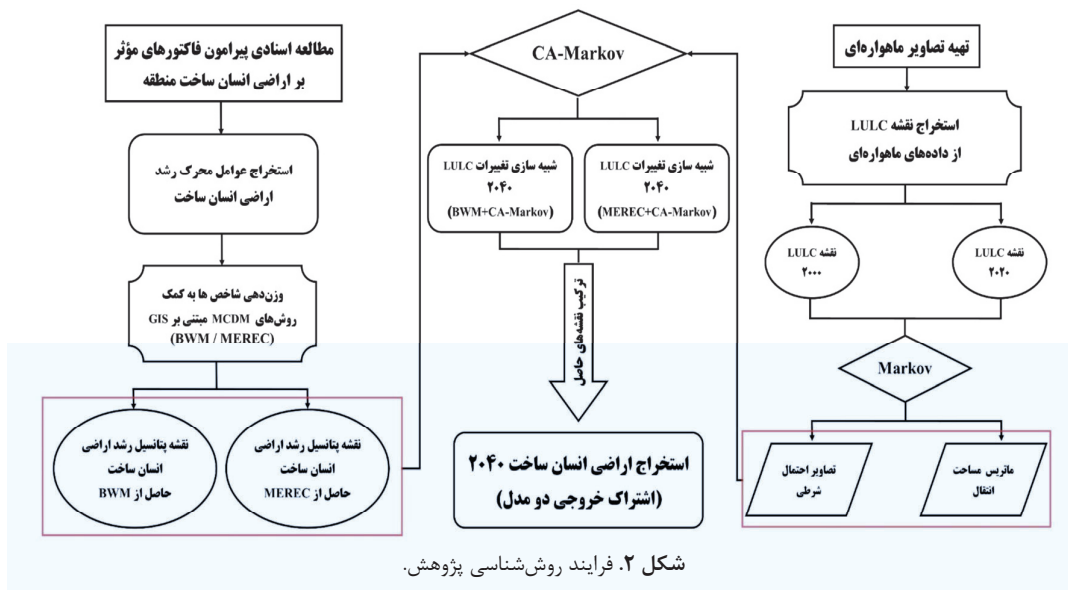
## ۲-۲- داده‌ها و روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش که با هدف مدل‌سازی تغییرات کاربری / پوشش اراضی در حوضه آبریز رودخانه ارس انجام شده است، ابتدا با بررسی اسناد و منابع موجود در کتابخانه‌ها، عوامل محرک رشد اراضی انسان ساخت به‌عنوان سناریوی مدل‌سازی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. در ادامه نقشه‌های هر یک از این شاخص‌ها در محیط GIS تهیه شد. سپس با استفاده از روش BWM و روش MERERC که از روش‌های نوآورانه تصمیم‌گیری چندمعیاره هستند، معیارها وزن‌دهی شد و با تلفیق لایه‌ها در GIS، دو نقشه برای پتانسیل رشد اراضی انسان ساخت تولید شد. یکی از ورودی‌های مورد نیاز برای انجام این پژوهش نقشه‌های چندزمانه LULC است که در این مطالعه از نقشه‌های LULC پروژه Globeland30 استفاده شده است. پس از تهیه ورودی‌های لازم، برای اجرای مدل CA-Markov، یکبار شبیه‌سازی تغییرات LULC با ترکیب BWM + CA-Markov و بار دیگر با ترکیب MEREC + CA-Markov برای سال ۲۰۴۰ انجام شد. در انتها نیز به‌منظور دستیابی به

بیشترین دقت، با برهم‌گذاری خروجی‌های حاصل از این دو مدل و استخراج پیکسل‌های مشترک، اراضی انسان‌ساخت این حوضه در سال ۲۰۴۰ واکاوی شده است. شایان ذکر است که الگوریتم‌های فوق در محیط نرم‌افزار TerrSet پیاده‌سازی شده است. فرایند انجام پژوهش در شکل ۲ آمده است. جزئیات داده‌ها و مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در ادامه تشریح شده است.

## ۱-۲-۲- عوامل محرک رشد اراضی انسان‌ساخت

در این بخش از پژوهش به‌منظور تعیین عوامل محرک تغییرات LULC (تحت سناریوی رشد اراضی انسان‌ساخت) پس از مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای انجام‌شده پیرامون موضوع مورد بحث، فاکتورهای فاصله از گسل (Rabby et al., 2022)، فاصله از جاده‌ها (Chen et al., 2021)، فاصله از مناطق صنعتی (Zhang et al., 2022)، فاصله از اراضی بایر (Alsharif et al., 2022)، فاصله از اراضی کشاورزی (Zarandian et al., 2022)، فاصله از اراضی انسان‌ساخت (Vu & Shen, 2023)، شیب (Vaddiraju et al., 2023) و ارتفاع (Arif et al., 2023) استخراج شده‌اند.



شکل ۲. فرایند روش‌شناسی پژوهش.

## ۲-۲-۲- نقشه‌های LULC

یکی دیگر از ورودی‌های مورد نیاز برای پایش و مدل‌سازی تغییرات کاربری/ پوشش اراضی حوضه آبریز رودخانه ارس، نقشه‌های LULC منطقه برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ است (شکل ۴). در پژوهش پیش رو برای تهیه این نقشه‌ها از پروژه Globeland30 مرکز ملی ژئوماتیک چین (NGCC)<sup>۱</sup> ارائه کرده، استفاده شده است (Shafizadeh-Moghadam et al., 2019). (جدول ۱) اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده برای تهیه این نقشه‌ها را نشان می‌دهد. صحت کلی<sup>۲</sup> این نقشه‌ها ۸۰/۳٪ گزارش شده است (Chen et al., 2015)، که برای منطقه وسیعی مانند حوضه آبریز رودخانه ارس دقت مطلوبی به نظر می‌رسد.

با توجه به ماهیت متفاوت معیارها و نظر به اینکه روش‌های BWM و MEREC فقط قابلیت اجرا بر روی معیارهای یکپارچه را دارند، داده‌ها باید نرمال شوند. در اینجا پس از تهیه لایه دیجیتال هر کدام از شاخص‌ها در محیط GIS از تابع فازی Linear برای نرمال‌سازی آن‌ها استفاده شده است (شکل ۳). مطلوبیت هر شاخص به اندازه مقادیر حداکثر و حداقل آن است و مقدار پیکسل استاندارد شده (ij, x) بین «۰» و «۱» تعریف می‌شود. در این مطالعه برای معیار فاصله از گسل حداکثر مقادیر مطلوب است که به صورت زیر بیان می‌شود:

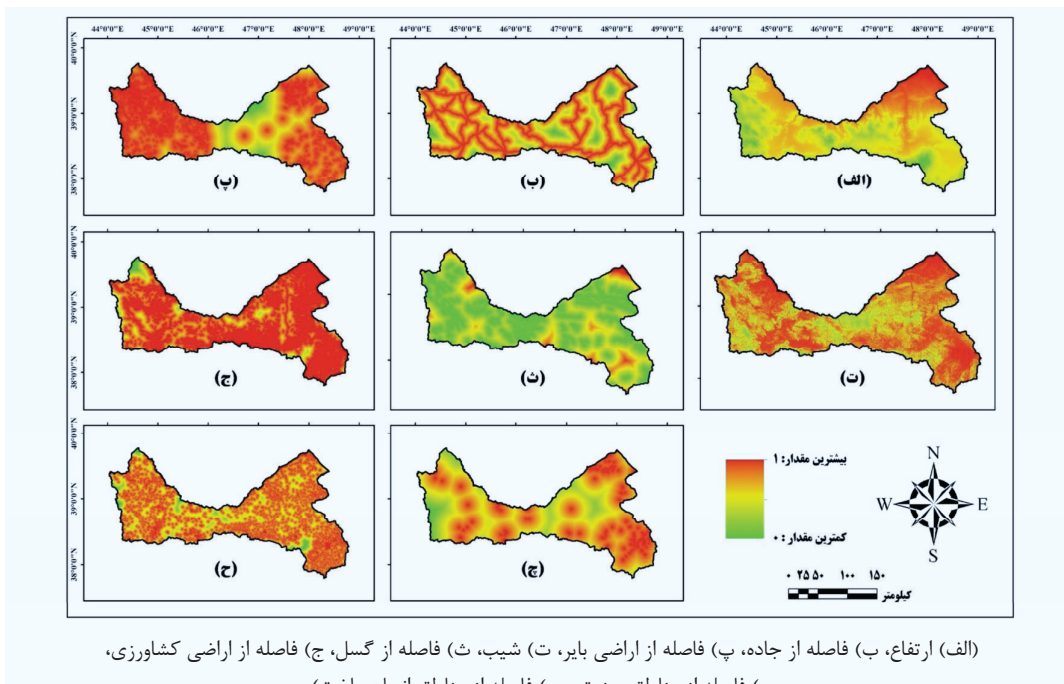
$$X'_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$$

رابطه (۱)

برای سایر معیارها نیز حداقل مقادیر مطلوب است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$X'_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$$

رابطه (۲)

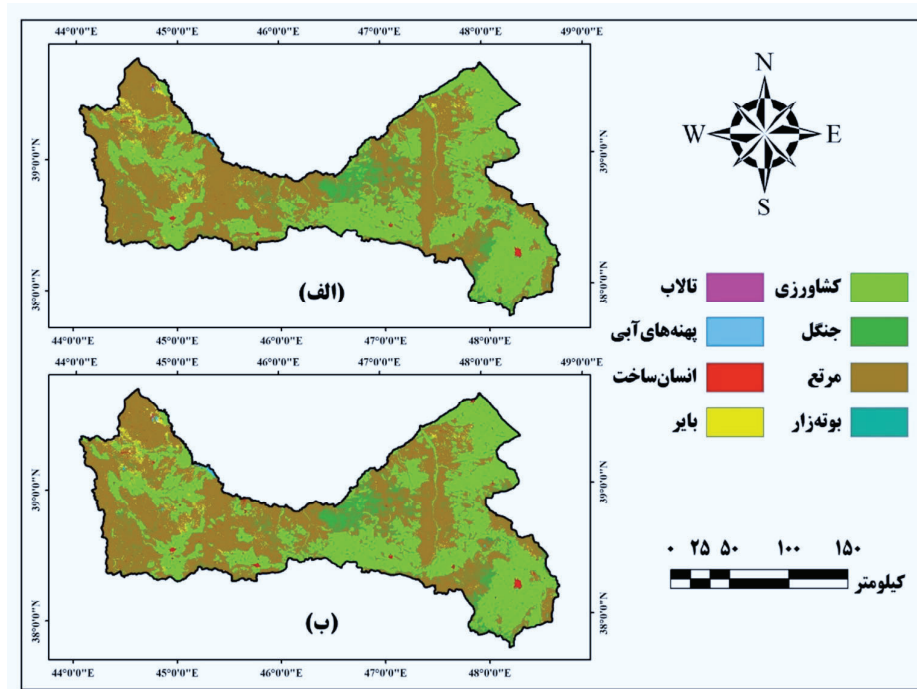


شکل ۳. لایه‌های نرمال‌سازی شده مورد استفاده در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی سال ۲۰۲۰.

1. National Geomatics Center of China
2. overall accuracy

جدول ۱. اطلاعات مربوط به نقشه‌های کاربری/ پوشش اراضی

شماره تصویر	ماهواره Satellite	سنجنده Sensor	تاریخ اخذ تصویر Date of acquisition	قدرت تفکیک مکانی (متر) Spatial resolution
۱	Landsat 7	ETM	۲۰۰۰	۳۰
۲	Landsat 8	OLI	۲۰۲۰	۳۰



شکل ۴. نقشه کاربری/ پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه. الف) سال ۲۰۰۰، ب) سال ۲۰۲۰

جدول ۲. اطلاعات مربوط به نقشه‌های کاربری/ پوشش اراضی

کاربری/ پوشش اراضی LULC2020		کاربری/ پوشش اراضی LULC2000		LULC
مساحت Area (km <sup>2</sup> )	درصد Percentage	مساحت Area (km <sup>2</sup> )	درصد Percentage	
۳۵/۰۶	۱۳۸۵۶/۴۸	۳۳/۸۶	۱۳۳۴۸/۷۸	کشاورزی
۵/۳۵	۲۱۳۵/۹۲	۵/۴۵	۲۱۷۲/۹۱	جنگل
۵۶/۳۲	۲۲۲۳۱/۲۹	۵۸/۳۶	۲۳۰۴۲/۳۵	مرتع
۰/۱۶	۶۴/۷۲	۰/۱۸	۷۵/۲۹	بونه‌زار
۰/۰۲	۱۰/۸۷	۰/۰۱	۷/۳۵	تالاب
۰/۳۷	۱۴۷/۵۹	۰/۲۴	۹۹/۳۸	پهنه‌های آبی
۱/۵	۶۰۳/۹۸	۰/۷۰	۲۷۹/۴۷	انسان‌ساخت
۱/۱۶	۴۷۲/۰۴	۱/۱۵	۴۶۹/۱۴	بایر



## ۲-۲-۲- روش BWM

یکی از روش‌های MCDM مبتنی بر GIS که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است روش BWM است. در پژوهش کنونی از این مدل برای وزن‌دهی عوامل محرک رشد اراضی انسان‌ساخت استفاده شده است. برتری این روش نسبت به روش‌های مرسوم مانند AHP مقایسه‌های زوجی و پیچیدگی‌های کمتر آن است ( Minaei et al., 2021). در این روش از دو بردار مقایسه‌ی زوجی برای تعیین وزن معیارها استفاده می‌شود. ابتدا بهترین (مثلاً مطلوب‌ترین، مهم‌ترین) و بدترین (مثلاً حداقل مطلوب‌ترین، کم‌اهمیت‌ترین) معیار را تصمیم‌گیرنده شناسایی می‌کند و پس از آن، مقایسه‌های زوجی بین هریک از این دو معیار (بهترین و بدترین) و سایر معیارها انجام می‌شود. در ادامه نیز از یک مدل minmax غیرخطی برای شناسایی وزن‌ها استفاده می‌شود (Rezaei, 2015). مراحل روش BWM به قرار زیر است:

**مرحله ۱.** شناسایی و استخراج معیارهای تصمیم‌گیری.

**مرحله ۲.** انتخاب بهترین و بدترین معیار از میان معیارهای موجود.

**مرحله ۳.** مقایسه‌ی زوجی معیارها. در این راستا، تصمیم‌گیرنده میزان ارجحیت بهترین معیار را نسبت به سایر معیارها با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌کند. در اینجا عدد ۹ نشان‌دهنده‌ی کمترین و عدد ۱ نشان‌دهنده‌ی بالاترین ارجحیت است. نتیجه‌ی این مقایسه، برداری به نام Best-to-others vector را تشکیل می‌دهد که به صورت  $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$  نمایش داده می‌شود. در این بردار،  $a_{Bj}$  نشان‌دهنده‌ی ارجحیت بهترین معیار (B) نسبت به معیار (j) است که  $a_{BB}=1$ .

**مرحله ۴.** در این قسمت، تصمیم‌گیرنده همان فرایند مرحله ۳ را برای بدترین معیار انجام می‌دهد. نتیجه‌ی مقایسه‌ی زوجی معیارها در این مرحله، برداری به نام Other-to-worst vector را تشکیل می‌دهد که به صورت  $A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T$  نمایش داده می‌شود. در این بردار،  $a_{jW}$  نشان‌دهنده‌ی ارجحیت معیار (j) نسبت به بدترین معیار (W) است که  $a_{WW}=1$ .

**مرحله ۵.** وزن‌دهی بهینه‌ی معیارها ( $W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*$ ). در این مرحله به منظور تعیین وزن بهینه‌ی هرکدام از معیارها، زوج‌های  $a_{Bj} = \frac{w_j}{w_w}$  و  $a_{jW} = \frac{w_B}{w_j}$  تشکیل می‌شود. سپس برای برآورده کردن این شرایط در همه‌ی معیارها باید راه‌حلی پیدا شود تا عبارت  $\left| \frac{w_j}{w_w} - a_{jW} \right|$  و  $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$  را برای همه‌ی معیارهایی که حداقل شده است، به حداکثر برساند. با توجه به مثبت بودن وزن‌های معیارها می‌توان مدل را به صورت رابطه (۳) فرموله کرد.

$$\text{رابطه (۳)} \quad \min \max_j \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_w} - a_{jW} \right|$$

s.t.:

$$\sum_j w_j = 1$$

$$w_j \geq 0, \text{ for all } j$$

پس به دست آوردن مقادیر بهینه، در انتها باید نرخ سازگاری در روش BWM محاسبه شود. نسبت سازگاری BWM با استفاده از  $\xi^*$  و رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Minaei et al., 2021). مقدار  $\xi^*$  بیشتر نشان‌دهنده‌ی نرخ سازگاری بیشتر است. شاخص سازگاری در جدول ۳ ارائه شده است.

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{Consistency Ratio} = \frac{\xi^*}{\text{Consistency index}}$$

جدول ۳. شاخص سازگاری در روش BWM

$a_{Bw}$	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شاخص سازگاری	۰/۰	۰/۴۴	۱/۰۰	۱/۶۳	۲/۳۰	۳/۰۰	۳/۷۳	۴/۴۷	۵/۲۳

منبع: Rezaei, 2015.

## ۴-۲-۲- روش MEREC

یکی دیگر از روش‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره که در این مطالعه برای وزن‌دهی عوامل محرک رشد اراضی انسان‌ساخت به کار گرفته شده است، روش MEREC است. در این روش که کشاورز قرابایی و همکاران (Keshavarz-Ghorabae et al., 2021) معرفی کرده‌اند، اثرات حذف معیارها بر عملکرد گزینه‌ها بررسی می‌شود.

مراحل روش MEREC را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

## مرحله ۱: تشکیل ماتریس تصمیم

یک ماتریس تصمیم در این مرحله ساخته می‌شود که امتیاز هر گزینه را در مورد هر معیار نشان می‌دهد. عناصر این ماتریس با  $x_{ij}$  نشان داده می‌شوند و این عناصر باید بزرگ‌تر از صفر باشند.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{im} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$

## مرحله ۲: نرمال‌سازی داده‌ها

در این روش از نرمال‌سازی خطی برای بی‌بعد کردن عناصر ماتریس تصمیم استفاده می‌شود. عناصر ماتریس نرمال‌شده با  $n_{ij}$  نشان داده می‌شوند. اگر  $B$  مجموعه معیارهای سودمند را نشان دهد و  $H$  نشان‌دهنده مجموعه‌ای از معیارهای غیرسودمند باشد، می‌توان معادله زیر را برای نرمال‌سازی به کار برد:

$$n_{ij}^x = \begin{cases} \frac{\min_k x_{kj}}{x_{ij}} & \text{if } j \in B \\ \frac{x_{ij}}{\max_k x_{kj}} & \text{if } j \in H \end{cases} \quad \text{رابطه (۶)}$$

## مرحله ۳: محاسبه عملکرد کلی گزینه‌ها (Si)

در این مرحله یک اندازه‌گیری لگاریتمی با وزن معیارهای برابر برای به دست آوردن عملکرد کلی

گزینه‌ها در این مرحله اعمال می‌شود. با توجه به مقادیر نرمال به دست آمده از مرحله قبل، می‌توان اطمینان حاصل کرد که مقادیر کوچک‌تر  $n_{ij}$  مقادیر بیشتری از عملکرد (Si) را همراه دارد. برای این محاسبه از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$S_i = \ln \left( 1 + \left( \frac{1}{m} \sum_j | \ln(n_{ij}^x) | \right) \right) \quad \text{رابطه (۷)}$$

## مرحله ۴: محاسبه عملکرد گزینه‌ها با حذف اثرات معیارها (S')

در این گام با حذف هر یک از معیارها، عملکرد گزینه‌ها محاسبه می‌شود. در این مرحله از معیار لگاریتمی مشابه مرحله قبل استفاده می‌کنیم. تفاوت بین این مرحله و مرحله قبل این است که عملکرد گزینه‌ها بر اساس حذف هر معیار به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود؛ بنابراین، ما مجموعه‌ای از عملکردهای مرتبط با  $m$  معیارها را داریم. برای محاسبات این مرحله از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$s_{ij} = \ln \left( 1 + \left( \frac{1}{m} \sum_{k, k \neq j} | \ln(n_{ik}^x) | \right) \right) \quad \text{رابطه (۸)}$$

## مرحله ۵: محاسبه مجموع انحرافات مطلق (E)

در این مرحله، اثر حذف معیار  $Z$  را بر اساس مقادیر به دست آمده از مرحله ۳ و مرحله ۴ محاسبه می‌شود.  $E_j$  اثر حذف معیار  $Z$  را نشان دهد. با استفاده از فرمول زیر مقادیر  $E_j$  محاسبه خواهد شد:

$$E_j = \sum_i |s_{ij} - s_i| \quad \text{رابطه (۹)}$$

## مرحله ۶: محاسبه وزن‌های نهایی (W)

در نهایت وزن هر معیار با استفاده از اثرات حذف ( $E_j$ ) (مرحله ۵) محاسبه می‌شود. در ادامه،  $w_j$  مخفف وزن معیار  $Z$  است. برای محاسبه  $w$  از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$w_j = \frac{E_j}{\sum_k E_k} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

## ۵-۲-۲- مدل CA-Markov

در مطالعه کنونی به منظور مدل سازی تغییرات LULC حوضه آبریز رودخانه ارس برای سال ۲۰۴۰، از مدل ترکیبی CA-Markov استفاده شده است. پژوهش‌های بی‌شماری (Lu et al., 2023; Hishe et al., 2020; Samat, 2014) کارایی این مدل را در زمینه مدل سازی زمانی- مکانی تغییرات LULC ارزیابی و صحت آن را تأیید کرده‌اند. مدل یادشده از ترکیب مدل سلول‌های خودکار<sup>۱</sup> و زنجیره Markov تشکیل می‌شود که به عنوان روشی با پویایی زمانی- مکانی می‌تواند تغییرات LULC را در یک فضای دوبعدی شبیه سازی کند (Jana et al., 2022). زنجیره Markov زنجیره‌ای دنباله دار از فرایندهای تصادفی است که احتمال تغییر کاربری‌ها را از یک وضعیت به وضعیت دیگر، توسط ماتریس انتقال نشان می‌دهد (Xu et al., 2021). ماتریس احتمال انتقال به دست آمده، ماتریسی  $m \times m$  است و مقدار کاربری اراضی را که در بازه زمانی مورد نظر به یک کلاس اختصاص یافته است، تعیین می‌کند (Jones & Qin, 2022). رابطه زیر نحوه به دست آوردن این ماتریس را نشان می‌دهد:

$$P(i, j) = P(X(t+1) = j | X(t) = i) \quad (11)$$

در رابطه بالا،  $P(i, j)$  نشان دهنده احتمال رفتن از وضعیت  $i$  به وضعیت  $j$  پس از یک گام زمانی است، نه  $n$  گام. البته معمولاً برای بررسی رفتار یک سیستم با استفاده از زنجیره‌های Markov، ماتریس احتمال انتقال به صورت مربعی آرایش داده می‌شود. این ماتریس، ماتریس تغییر وضعیت نامیده می‌شود. در این ماتریس، سطر  $i$  و ستون  $j$  نشان دهنده احتمال انتقال از وضعیت  $i$  به وضعیت  $j$  است. این ماتریس، معمولاً به صورت مربعی و به اندازه تعداد وضعیت‌های مختلف در زنجیره Markov طراحی می‌شود. با توجه به اینکه خروجی مدل Markov هیچ مؤلفه مکانی وجود ندارد (Isinkaralar, Varol, & Yilmaz, 2022)، نیاز است که برای تکمیل فرایند مدل سازی تغییرات LULC از یک

مدل مکمل استفاده شود که در این پژوهش از مدل سلول‌های خودکار (CA) استفاده شده است. مدل CA یک مکانیسم پردازشی با فضای سلولی است که در آن سلول‌ها با یکدیگر ارتباط متقابل دارند و هریک دارای یک وضعیت (ارزش) هستند. در این مدل در هر دوره زمانی، وضعیت سلول‌ها با تأثیر از وضعیت سلول‌های همسایه و برخی قوانین، ممکن است تغییر کند و به وضعیت جدیدی برسد (Rakuasa et al., 2023). قوانین انتقال در مدل سلول‌های خودکار، موتور اصلی تغییرات در رفتار و آینده سلول‌ها را طی فرایند تکامل در مراحل زمانی مختلف مشخص می‌کنند (He et al., 2023). شایان ذکر است که در پژوهش کنونی، محدودیت‌های مکانی (مناطق ساخته شده قبلی و پهنه‌های آبی) و نتیجه تحلیل MCDM (نقشه شایستگی رشد اراضی انسان ساخت براساس عوامل محرک) قوانین انتقال در این مدل را تشکیل می‌دهند.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- اولویت بندی عوامل محرک رشد اراضی انسان ساخت

در این مطالعه به منظور عوامل محرک رشد اراضی انسان ساخت در حوضه آبریز رودخانه ارس به ترتیب روش‌های BWM و MEREC به کار گرفته شده است. در هریک از این دو روش پس از شناسایی عوامل مؤثر، ضرایب وزنی عوامل براساس نظرات تیمی ۵ نفره متشکل از متخصصان حوزه علوم جغرافیایی و برنامه ریزی شهری تعیین شده است. نتایج وزن دهی شاخص‌ها در جدول ۴ آمده است. شایان ذکر است که شاخص سازگاری مدل BWM مقدار ۰/۲۹ به دست آمده است. نتایج نهایی حاصل از وزن دهی عوامل محرک رشد اراضی انسان ساخت نشان داد که در هر دو روش معیار فاصله از مناطق انسان ساخت بالاترین وزن و معیار ارتفاع پایین ترین وزن را به خود اختصاص می‌دهد.

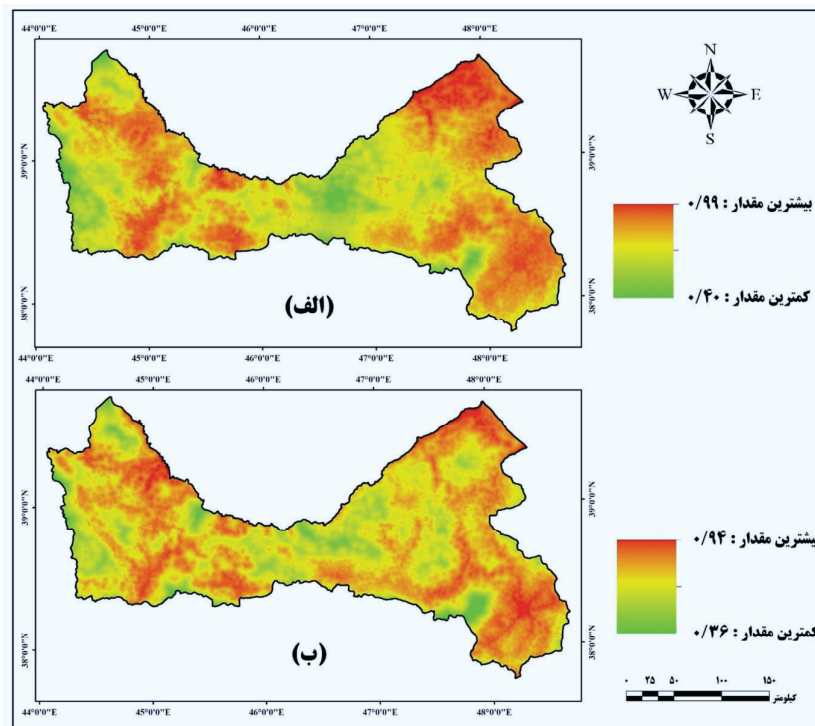
1. Cellular automata

است (شکل ۵). نتایج حاصل نشان می‌دهد که در خروجی مدل BWM شمال شرق منطقه به‌طور محسوسی از پتانسیل توسعه بیشتری نسبت به سایر مناطق برخوردار است که علت آن را می‌توان واقع شدن مناطق شهری و روستایی فراوان و اراضی زراعی در آن منطقه برشمرد. در طرف مقابل این پتانسیل در خروجی مدل MEREC در جنوب شرقی منطقه محسوس‌تر است. با این حال در هر دو مدل، امتداد شمال شرقی جنوب غربی و نواحی شرقی منطقه پتانسیل مناسبی برای رشد و توسعه اراضی انسان ساخت دارند.

پیش‌تر نیز وو و شن (Vu & Shen, 2021) و کاماراج و رنگاراجان (Kamaraj & Rangarajan, 2022)، در پژوهش خود معیار فاصله از مناطق انسان‌ساخت را به‌عنوان مهم‌ترین عامل محرک رشد اراضی انسان‌ساخت معرفی کردند و بالاترین ضریب اهمیت را برای آن قائل شدند. در ادامه به کمک لایه‌های GIS نرمال‌سازی‌شده معیارها برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰ (شکل ۳) و وزن‌های به‌دست‌آمده از نظرات خبرگان در جدول ۴، نقشه پتانسیل رشد اراضی انسان‌ساخت منطقه، یک‌بار با استفاده از نتایج وزن‌دهی روش BWM و بار دیگر با استفاده از نتایج وزن‌دهی روش MEREC تولید شده

جدول ۴. نتایج وزن‌دهی عوامل محرک رشد اراضی انسان‌ساخت حوضه آبریز رودخانه ارس با استفاده از روش BWM و MEREC.

فاصله از مناطق صنعتی	فاصله از گسل	فاصله از مناطق انسان‌ساخت	فاصله از اراضی بایر	فاصله از اراضی زراعی	فاصله از جاده‌ها	شیب	ارتفاع	شاخص‌ها
۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۲۸	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۰۲۰	وزن‌ها (BWM)
۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۳۰	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۰۴	وزن‌ها (MEREC)



الف) خروجی مدل BWM (ب) خروجی مدل MEREC

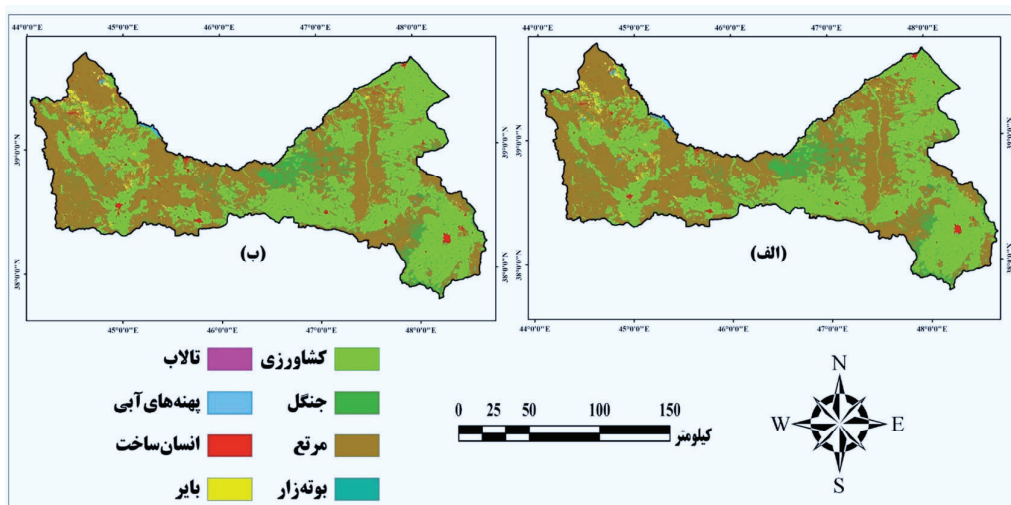
شکل ۵. نقشه‌های پتانسیل رشد اراضی انسان‌ساخت ۲۰۲۰

هریک از کاربری‌ها در سال ۲۰۴۰ به تفکیک مدل شبیه‌سازی در جدول ۶ آمده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در خروجی مدل  $BWM + CA-Markov$  وسعت اراضی انسان‌ساخت از ۶۰۳ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۰ به بیش از ۹۳۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۴۰ افزایش یافته است. در حالی که این رقم در خروجی مدل  $MEREC + CA-Markov$  حدود ۸۲۹ کیلومترمربع است.

۲-۳- مدل‌سازی کاربری و پوشش اراضی سال ۲۰۴۰  
در این قسمت از پژوهش با بهره‌مندی از نقشه‌های زمانی LULC سال ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰ منطقه مورد مطالعه (شکل ۴)، نقشه‌های پتانسیل رشد اراضی انسان‌ساخت (شکل ۵)، ماتریس تغییرات کمی کاربری‌ها (جدول ۵) و در نهایت اعمال مدل  $CA-Markov$  بر روی آن‌ها کاربری/ پوشش اراضی حوضه آبریز رودخانه ارس برای سال ۲۰۴۰ شبیه‌سازی شده است (شکل ۶). مساحت

جدول ۵. ماتریس تغییرات کمی (احتمال انتقال) کاربری‌ها حاصل از زنجیره Markov در حداصل زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰

کاربری/ پوشش اراضی LULC	کشاورزی	جنگل	مرتع	بوته‌زار	تالاب	پهنه‌های آبی	انسان‌ساخت	بایر
کشاورزی	۰/۹۶۷۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۶۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۰۸
جنگل	۰/۰۱۲۸	۰/۸۶۶۵	۰/۱۱۶۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۲
مرتع	۰/۰۳۶۵	۰/۰۱۰۵	۰/۹۳۹۰	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۵۶
بوته‌زار	۰/۱۴۵۶	۰/۰۰۱۵	۰/۲۰۸۰	۰/۶۴۴۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲
تالاب	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۴۱	۰/۰۳۶۰	۰/۰۰۰۰	۰/۶۴۶۳	۰/۲۵۱۵	۰/۰۰۱۶	۰/۰۵۰۵
پهنه‌های آبی	۰/۰۷۳۳	۰/۰۰۳۶	۰/۰۵۳۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۸۶۲۸	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۵۴
انسان‌ساخت	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
بایر	۰/۰۴۸۳	۰/۰۰۰۲	۰/۲۲۹۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۷۷	۰/۷۱۰۵



الف) خروجی مدل  $MEREC + CA-Markov$ ، ب) خروجی مدل  $BWM + CA-Markov$

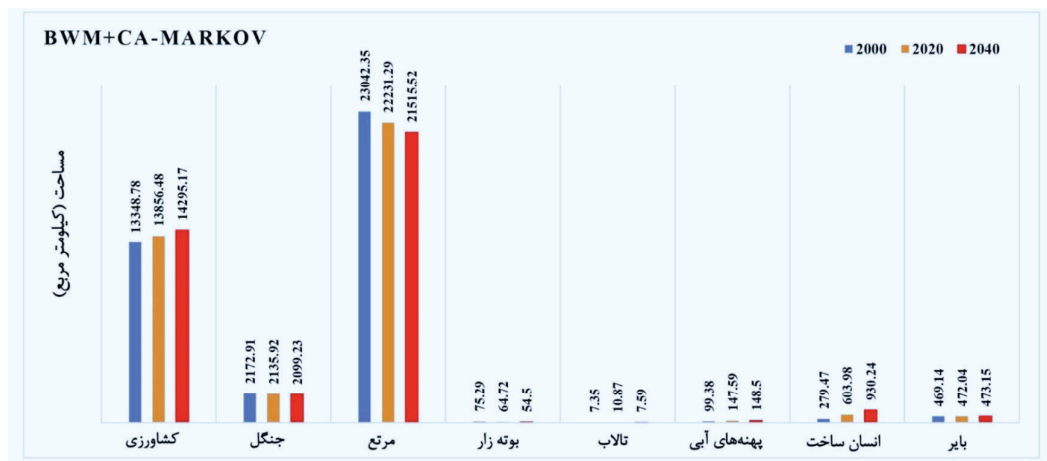
شکل ۶. کاربری/ پوشش اراضی حوضه آبریز رودخانه ارس برای سال ۲۰۴۰

(بخشی که در کشور ترکیه واقع شده) انجام دادند نیز همین دو کاربری (انسان ساخت و کشاورزی) بیشترین توسعه را داشتند. در طرف مقابل هر دو مدل کاهش وسعت اراضی مرتعی و جنگل ها را پیش بینی کردند که نشان می دهد تغییرات LULC حوضه آبریز رودخانه ارس به عنوان یکی از مهم ترین تغذیه کننده های دریای خزر، نیازمند برنامه های حفاظتی و نظارتی بیشتری است و پایش الگوی این تغییرات در این منطقه بسیار ضروری به نظر می رسد.

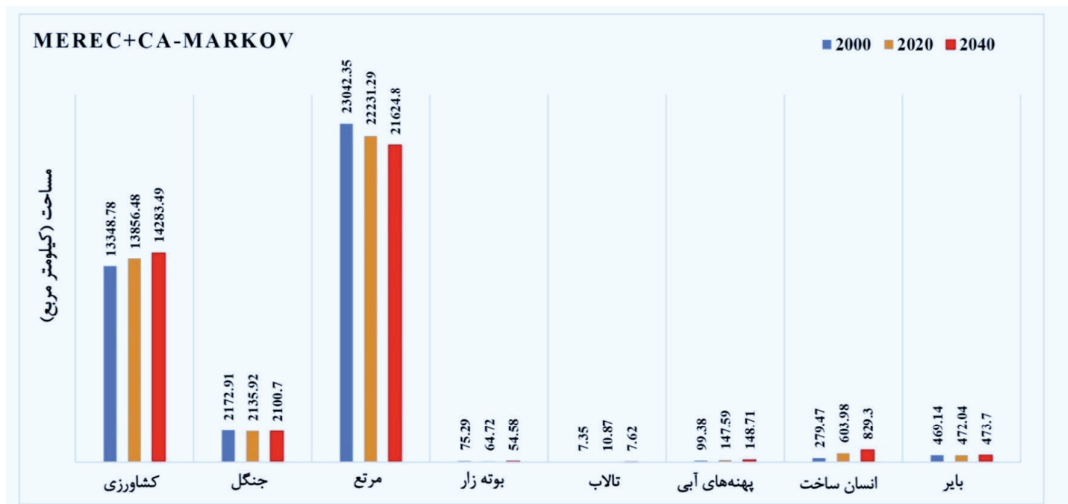
مقایسه روند تغییرات LULC سال ۲۰۲۰ با نتایج پیش بینی شده برای سال ۲۰۴۰ حاصل از مدل BWM + CA-Markov + MEREC + CA-Markov در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است. بررسی خروجی های این دو الگوریتم گویای آن است که علاوه بر اراضی انسان ساخت، اراضی کشاورزی منطقه نیز تا سال ۲۰۴۰ رشد محسوسی خواهند داشت. در پژوهشی که میرزایی و همکاران (Mirzaei et al., 2020)، به منظور بررسی تغییرات LULC قسمتی از این حوضه

جدول ۶. مساحت کاربری/ پوشش اراضی حوضه آبریز رودخانه ارس سال ۲۰۴۰

مساحت Area(km <sup>2</sup> )		کاربری/ پوشش LULC	مساحت Area (km <sup>2</sup> )		کاربری/ پوشش اراضی LULC
MEREC + CA- Markov	BWM + CA- Markov		MEREC + CA- Markov	BWM + CA- Markov	
۷/۶۲	۷/۵۹	تالاب	۱۴۲۸۳/۴۹	۱۴۲۹۵/۱۷	کشاورزی
۱۴۸/۷۱	۱۴۸/۵۰	پهنه های آبی	۲۱۰۰/۷۰	۲۰۹۹/۲۳	جنگل
۸۲۹/۳۰	۹۳۰/۲۴	انسان ساخت	۲۱۶۲۴/۸۰	۲۱۵۱۵/۵۲	مرتع
۴۷۳/۷۰	۴۷۳/۱۵	بایر	۵۴/۵۸	۵۴/۵۰	بوته زار



شکل ۷. روند تغییرات LULC در حدها زمانی بین سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ (خروجی مدل BWM + CA-Markov)



شکل ۸. روند تغییرات LULC در حدفواصل زمانی بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ (خروجی مدل MEREC + CA-Markov)

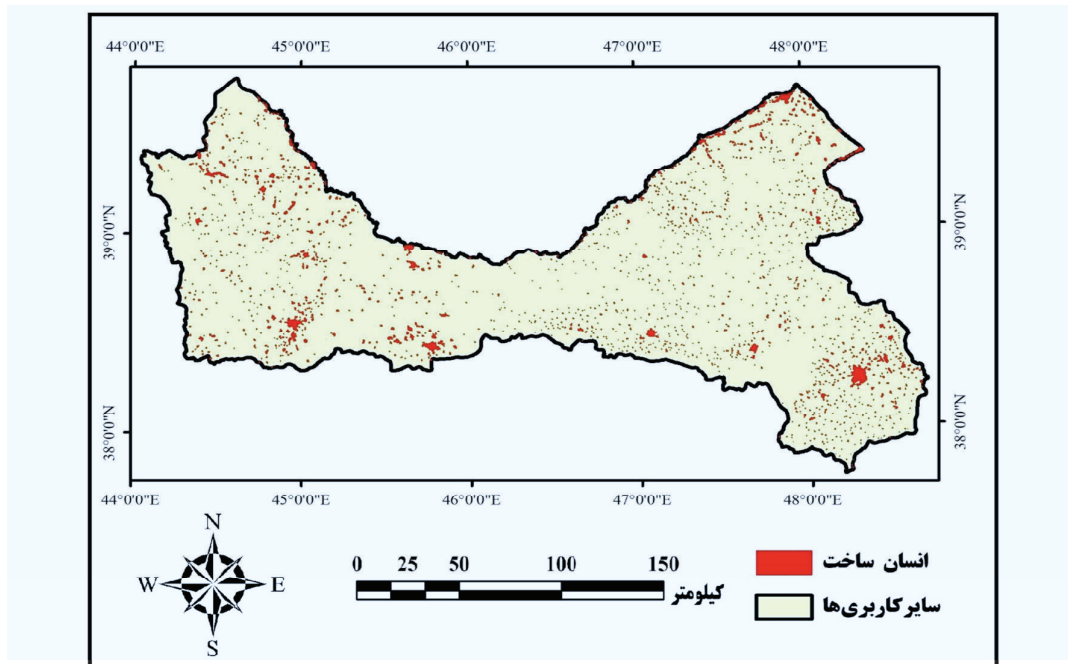
به‌لحاظ اقتصادی آورده بسیار چشمگیری برای منطقه دارد و سبب رونق بیش‌ازپیش اشتغال‌زایی خواهد شد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

امروزه تغییر کاربری و پوشش اراضی (LULC) به چالشی مهم در بسیاری از کشورها تبدیل شده است. این تغییرات مستقیماً بر اجزای محیط زیست و اکوسیستم منطقه اثر منفی می‌گذارد. در این راستا آگاهی از الگوی زمانی- مکانی تغییر کاربری‌ها در یک محیط طبیعی از مهم‌ترین مسائل در حوزه مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی شهری به حساب می‌آید. مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی، یکی از ابزارهای مهم برای تحقق این مهم است. این فرایند به سازمان‌های مربوطه کمک می‌کند تا راهبردهای لازم برای آینده منطقه و مدیریت بهینه اراضی آن را اتخاذ کنند. در این بین یکی از مناطق درگیر با این مسئله که به‌واسطه جایگاه منطقه‌ای از مناطق حساس به شمار می‌رود حوضه آبریز رودخانه ارس است. بدین منظور پژوهش حاضر، به مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز رودخانه ارس در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ LULC پرداخته است. برای نیل به هدف

#### ۳-۳- توسعه اراضی انسان‌ساخت در سال ۲۰۴۰

در این قسمت از پژوهش به‌منظور دستیابی بهترین نتیجه برای نمایش تغییرات اراضی انسان‌ساخت ۲۰۴۰، خروجی حاصل از اجرای دو مدل-CA + BWM و Markov + CA-Markov (شکل ۶) با به‌کارگیری ابزارهای موجود در GIS با یکدیگر ترکیب شده و پیکسل‌هایی که توسط هر دو مدل به‌عنوان کاربری انسان‌ساخت شبیه‌سازی شده بودند، استخراج شده‌اند (شکل ۹). نتایج این تحلیل نشان داد که تا سال ۲۰۴۰، وسعت اراضی انسان‌ساخت به ۹۳۰ کیلومتر مربع خواهد رسید. شایان ذکر است که رشد اراضی انسان‌ساخت در حوضه‌های آبریز به تخریب منابع زیست‌محیطی منجر خواهد شد و تهدیدی جدی برای اکوسیستم و محیط زیست آن خواهد بود (Sonu & Bhagyanathan, 2022). در تحقیقی که خشنود مطلق و همکاران (Khoshnoodmotlagh et al., 2020) انجام دادند نیز به این نکته اشاره شده است که رشد بی‌رویه اراضی انسان‌ساخت در درازمدت بر هیدرولوژی حوضه آبریز ارس اثر خواهد گذاشت و سبب کاهش کمیت و کیفیت منابع آبی این حوضه خواهد شد. با این همه نمی‌توان نادیده گرفت که توسعه این اراضی



شکل ۹. اراضی انسان‌ساخت سال ۲۰۴۰

می‌تواند به کاهش تنوع زیستی، تخریب اکوسیستم‌ها، کاهش آب‌وهوا، خشکسالی و سیلاب‌های شدید منجر شود. زمینه اصلی انجام این پژوهش ارائه تحلیل جامع برای کاهش پیامدهای شدید اقتصادی، اجتماعی و بوم‌شناختی ناشی از رشد اراضی انسان‌ساخت است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مدیران و متولیان محیط زیست و امور شهری را در راستای فراهم آوردن زیرساخت‌های لازم و تدوین سیاست‌های منطقه‌ای یاری رساند. شایان ذکر است که با توجه به مقیاس پژوهش، این پژوهش با محدودیت‌های قابل توجهی از جمله محدودیت پردازش سیستمی و عدم امکان استفاده از داده‌های غیررایگان مواجه بوده است. در آخر پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، ضمن بهره‌مندی از معیارهای تصمیم‌گیری جامع‌تر، نتایج الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش با سایر الگوریتم‌های مدل‌سازی تغییرات LULC مقایسه شود تا دقت نتایج بیش‌ازپیش افزایش یابد.

یادشده روش‌های BWM و MEREC که از روش‌های به‌روز تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) هستند با مدل CA-Markov ترکیب شده‌اند. در واقع دو نقشه برای سال ۲۰۴۰ تولید شده است: یک نقشه با ترکیب BWM + CA-Markov و نقشه دیگر با ترکیب MEREC + CA-Markov. هدف از انجام این کار حصول بهترین نتیجه برای مدل‌سازی رشد اراضی انسان‌ساخت است. نتایج حاصل از برهم‌گذاری پیکسل‌های مشترک اراضی انسان‌ساخت دو مدل، حاکی از رشد روزافزون این کاربری در منطقه است. رشد ادامه‌دار اراضی انسان‌ساخت در حوضه آبریز رودخانه ارس به ناپودی و یا کاهش تنوع گیاهی و جانوری و همچنین تخریب برخی گونه‌های گیاهی در این منطقه منجر می‌شود. از طرفی رشد بی‌رویه این اراضی می‌تواند تأثیرات مخربی بر اکوسیستم این حوضه نیز داشته باشد، چراکه برای ساخت‌وساز این اراضی اغلب از منابع آبی، جنگل‌ها، مراتع و اراضی حاشیه رودخانه استفاده خواهد شد. تخریب منابع طبیعی



## منابع

- Aalijahan, M., Salahi, B., & Hatami, D. (2021). Investigating the relationship between changes in atmospheric greenhouse gases and discharge fluctuations in the Basin of Aras River. *International Journal of Geography and Geography Education*, (44), 461-474. <https://doi.org/10.32003/igge.852263>
- Alsharif, M., Alzandi, A. A., Shrahily, R., & Mobarak, B. (2022). Land Use Land Cover Change Analysis for Urban Growth Prediction Using Landsat Satellite Data and Markov Chain Model for Al Baha Region Saudi Arabia. *Forests*, 13(10), 1530 . <https://doi.org/10.3390/f13101530>
- Arif, M., Sengupta, S., Mohinuddin, S., & Gupta, K. (2023). Dynamics of land use and land cover change in peri urban area of Burdwan city, India: a remote sensing and GIS based approach. *GeoJournal*, 1-25 . <https://doi.org/10.1007/s10708-023-10860-3>
- Aslami, F., & Ghorbani, A. (2018). Object-based land-use/land-cover change detection using Landsat imagery: a case study of Ardabil, Namin, and Nir counties in northwest Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6751-y>
- Camara, M., Jamil, N., Abdullah, A., & Hashim, R. (2020). Integrating cellular automata Markov model to simulate future land use change of a tropical basin. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(3), 403-414 . <https://doi.org/10.22034/gjesm.2020.03.09>
- Chen, H., Tackie, E. A., Ahakwa, I., Musah, M., Salakpi, A., Alfred, M., & Atingabili, S. (2022). Does energy consumption ,economic growth, urbanization, and population growth influence carbon emissions in the BRICS? Evidence from panel models robust to cross-sectional dependence and slope heterogeneity. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 37598-37616 . <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17671-4>
- Chen, J., Chen, J., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X., He, C., Han, G., Peng, S., & Lu, M. (2015). Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 7-27 . <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002>
- Chen, Z., Huang, M., Zhu, D., & Altan, O. (2021). Integrating remote sensing and a markov-FLUS model to simulate future land use changes in Hokkaido, Japan. *Remote Sensing*, 13(13), 2621 . <https://doi.org/10.3390/rs13132621>
- Christensen, M., & Jokar Arsanjani, J. (2020). Stimulating implementation of sustainable development goals and conservation action: predicting future land use/cover change in Virunga National Park, Congo. *Sustainability*, 12(4), 1570 . <https://doi.org/10.3390/su12041570>
- Geranian, H. (2022). Determination of Potential Mineralization Areas by Hybrid Multi-Criteria Decision-Making Methods in the Khoynehrud Region of East Azerbaijan. *Journal of Mineral Resources Engineering*, 7(2), 25-46 . <https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.14635.1470>
- Gurbuz, M., & Cilek, A. (2023). Analysis of Urban Land Use Change Using Remote Sensing and Different Change Detection Techniques: the Case of Ankara Province. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 515-520 . <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-1-2023-515-2023>
- Hajihoseini, M., Morid, S., Emamgholizadeh, S., Amirahmadian, B., Mahjoobi, E., & Gholami, H. (2023). Conflict and cooperation in Aras International Rivers Basin: status, trend, and future. *Sustainable Water Resources Management*, 9(1), 28 . <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00799-7>
- He, Y., Wu, W., Xie, X., Ke, X., Song, Y., Zhou, C., Li, W., Li, Y., Jing, R., & Song, P.

- (2023). Land Use/Cover Change Prediction Based on a New Hybrid Logistic-Multicriteria Evaluation-Cellular Automata-Markov Model Taking Hefei, China as an Example. *Land*, 12(10), 1899 .  
<https://doi.org/10.3390/land12101899>
- Hishe, S., Bewket, W., Nyssen, J., & Lyimo, J. (2020). Analysing past land use land cover change and CA-Markov-based future modelling in the Middle Suluh Valley, Northern Ethiopia. *Geocarto International*, 35(3), 225-255.  
<https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1516241>
- Hua, A. (2017). Application of CA-Markov model and land use/land cover changes in Malacca River watershed, Malaysia. *Applied Ecology & Environmental Research*, 15 .(۴)  
[https://doi.org/10.15666/aeer/1504\\_605622](https://doi.org/10.15666/aeer/1504_605622)
- Isinkaralar, O., Varol, C., & Yilmaz, D. (2022). Digital mapping and predicting the urban growth: integrating scenarios into cellular automata—Markov chain modeling. *Applied Geomatics*, 1-11.  
<https://doi.org/10.1007/s12518-022-00464-w>
- Jana, A., Jat, M. K., Saxena, A., & Choudhary, M. (2022). Prediction of land use land cover changes of a river basin using the CA-Markov model. *Geocarto International*, 37(26), 14127-14147.  
<https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2086634>
- Jones, G. L., & Qin, Q. (2022). Markov chain Monte Carlo in practice. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 9, 557-578 .  
<https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-040220-090158>
- Kamaraj, M., & Rangarajan, S. (2022). Predicting the future land use and land cover changes for Bhavani basin, Tamil Nadu, India, using QGIS MOLUSCE plugin. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12.  
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-616393/v1>
- Karimzadeh Motlagh, Z., Lotfi, A., Pourmanafi, S., & Ahmadzadeh, S. (2022). Evaluation and Prediction of Land-Use Changes using the CA\_Markov Model. *Geography and Environmental Planning*, 33(2), 63-80.  
<https://doi.org/10.22108/gep.2022.130601.1458>
- Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2021). Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC). *Symmetry*, 13(4), 525.  
<https://doi.org/10.3390/sym13040525>
- Khoshnoodmotlagh, S., Verrelst, J., Daneshi, A., Mirzaei, M., Azadi, H., Haghighi, M., Hatamimanesh, M., & Marofi, S. (2020). Transboundary basins need more attention: Anthropogenic impacts on land cover changes in aras river basin, monitoring and prediction. *Remote Sensing*, 12(20), 3329 .  
<https://doi.org/10.3390/rs12203329>
- Kisamba, F. C., & Li, F. (2023). Analysis and modelling urban growth of Dodoma urban district in Tanzania using an integrated CA-Markov model. *GeoJournal*, 88(1), 511-532 .  
<https://doi.org/10.1007/s10708-022-10617-4>
- Kourosh Niya, A., Huang, J., Kazemzadeh-Zow, A., Karimi, H., Keshtkar, H., & Naimi, B. (2020). Comparison of three hybrid models to simulate land use changes: a case study in Qeshm Island, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-19 .  
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-08274-6>
- Latue, P. C., & Rakuasa, H. (2023). Analysis of Land Cover Change Due to Urban Growth in Central Ternate District, Ternate City using Cellular Automata-Markov Chain. *Journal of Applied Geospatial Information*, 7(1), 722-728 .  
<https://doi.org/10.30871/jagi.v7i1.4653>
- Li, J., Dong, S., Li, Y., Wang, Y., Li, Z., & Li, F. (2022). Effects of land use change on ecosystem services in the China-Mongolia-Russia economic corridor. *Journal of Cleaner Production*, 360, 132175.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132175>
- Liping, C., Yujun, S., & Saeed, S. (2018). Monitoring and predicting land use and land

- cover changes using remote sensing and GIS techniques—A case study of a hilly area, Jiangle, China. *PloS one*, 13(7), e0200493 .  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200493>
- Lu, L., Xue, Q., Zhang, X., Qin, C., & Jia, L. (2023). Spatiotemporal Variation and Quantitative Attribution of Carbon Storage Based on Multiple Satellite Data and a Coupled Model for Jinan City, China. *Remote Sensing*, 15(18), 4472.  
<https://doi.org/10.3390/rs15184472>
- Minaei, F., Minaei, M., Kougiyas, I., Shafizadeh-Moghadam, H., & Hosseini, S. A. (2021). Rural electrification in protected areas: A spatial assessment of solar photovoltaic suitability using the fuzzy best worst method. *Renewable Energy*, 176, 334-345.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.087>
- Minaei, M., & Kainz, W. (2016). Watershed land cover/land use mapping using remote sensing and data mining in Gorganrood, Iran. *ISPRS International journal of geo-information*, 5(5), 57 .  
<https://doi.org/10.3390/ijgi5050057>
- Mirzaei, M., Jafari, A., Verrlest, J., Haghighi, M., Zargarnia, A. H., Khoshnoodmotlagh, S., Azadi, H., & Scheffran, J. (2020). Trans-boundary land cover changes and its influences on water crisis :Case study of the Aras River. *Applied Geography*, 124, 102323.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102323>
- Mokarram, M., & Pham, T. M. (2023). Prediction of drought-driven land use/land cover changes in the Bakhtegan Lake watershed of Iran using Markov chain cellular automata model and remote sensing data. *Natural Hazards*, 116(1), 1291-1314.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05721-0>
- Moradi, E., & Sharifi, A. (2023). Assessment of forest cover changes using multi-temporal Landsat observation. *Environment, development and sustainability*, 25(2), 1351-1360.  
<https://doi.org/10.1007/s10668-021-02097-2>
- Mostafazadeh, R., & Talebi khiavi, H. (2022). Landscape change assessment and its prediction in a mountainous gradient with diverse land-uses. *Environment Development and Sustainability*.  
<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02862-x>
- Mustafa, U., & Ghasemlounia, R. (2021). Flood prioritization watersheds of The Aras River, based on geomorphometric properties: Case study Iğdır Province. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*(6), 21-40.  
<https://doi.org/10.46453/jader.781152>
- Nasehi, F., Hassani, A., Monavvari, M., Karbassi, A., & Khorasani, N. (2013). Evaluating the metallic pollution of riverine water and sediments: a case study of Aras River. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 197-203.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-012-2543-y>
- Ngo, T. D. (2023). Demographic trends and population health: tackling inequality in a world of eight billion people. In (Vol. 8, pp. e01 2137): *BMJ Specialist Journals*.  
<https://doi.org/10.1136/bmjgh-2023-012137>
- Pertuack, S., & Latue, P. C. (2023). Geographic Artificial Intelligence and Unmanned Aerial Vehicles Application for Correlation Analysis of Settlement Density and Land Surface Temperature in Panggang Island Jakarta. *Buana Jurnal Geografi, Ekologi Dan Kebencanaan*, 1(1), 39-47. <https://doi.org/10.56211/buana.v1i1.340>
- Rabby, Y. W., Li, Y., Abedin, J., & Sabrina, S. (2022). Impact of land use/land cover change on landslide susceptibility in Rangamati municipality of Rangamati District, Bangladesh. *ISPRS International journal of geo-information*, 11(2), 89.  
<https://doi.org/10.3390/ijgi11020089>
- Rahman, M. M., & Szabó, G. (2022). Sustainable Urban Land-Use Optimization Using GIS-Based Multicriteria Decision-Making (GIS-MCDM) Approach. *ISPRS International journal of geo-information*, 11(5), 313.  
<https://doi.org/10.3390/ijgi11050313>
- Rakuasa, H., Sihasale, D. A., Somae, G., & Latue, P. C. (2023). Prediction of Land Cover Model for Central Ambon City in 2041 Using the Cellular Automata Markov Chains Method. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 4(1), 1-10.

- <https://doi.org/10.23960/jgrs.2023.v4.i1.85>  
 Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Samat, N. (2014). Monitoring the expansion of built-up areas in Seberang Perai region, Penang State, Malaysia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012180>
- Sanakhan, A., Solgi, A., Sorbi, A & Arian, M. (2020). Survey of active tectonic: the influence of river morphotectonic in Aras Basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05484-7>
- Shafizadeh-Moghadam, H., Minaei, M., Feng, Y., & Pontius Jr, R. G. (2019). GlobeLand30 maps show four times larger gross than net land change from 2000 to 2010 in Asia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.003>
- Shah, M. I., Abbas, S., Olohunlana, A. O., & Sinha, A. (2023). The impacts of land use change on biodiversity and ecosystem services: An empirical investigation from highly fragile countries. *Sustainable Development*, 31(3), 1384-1400. <https://doi.org/10.1002/sd.2454>
- Shukla, A. K., Ojha, C. S. P., Mijic, A., Buytaert, W., Pathak, S., Garg, R. D., & Shukla, S. (2018). Population growth, land use and land cover transformations, and water quality nexus in the Upper Ganga River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4745-4770. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4745-2018>
- Sohail, M. T., Manzoor, Z., Ehsan, M., Al-Ansari, N., Khan, M. B., Shafi, A., Ullah, J., Hussain, A., Raza, D., & Usman, U. (2023). Impacts of urbanization, LULC, LST, and NDVI changes on the static water table with possible solutions and water policy discussions: A case from Islamabad, Pakistan. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1018500. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1018500>
- Sonu, T., & Bhagyanathan, A. (2022). The impact of upstream land use land cover change on downstream flooding: A case of Kuttanad and Meenachil River Basin, Kerala, India. *Urban Climate*, 41, 101089. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101089>
- Talebi khiavi, H., Mostafazadeh, R., Asadi, M., & Asbaghian, K. (2022). Temporal land use change and its economic values under competing driving forces in a diverse land use configuration. *Arabian Journal of Geosciences*, 1597. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10890-0>
- Tavangar, S., Moradi, H., Massah Bavani, A., & Gholamalifard, M. (2021). A futuristic survey of the effects of LU/LC change on stream flow by CA–Markov model: A case of the Nekarood watershed, Iran. *Geocarto International*, 36(10), 1100-1116. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1633419>
- Vaddiraju, S. C., Talari, R., Bhavana, K., & Apsana, S. (2023). Future Land Use Land Cover Scenario Simulation Using Open-Source GIS For The Saroor Nagar Watershed, Telangana, India. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3091123/v1>
- Vu, T.-T., & Shen, Y. (2021). Land-use and land-cover changes in dong trieu district, vietnam, during past two decades and their driving forces. *Land*, 10(8), 798. <https://doi.org/10.3390/land10080798>
- Xiao, T., Ran, F., Li, Z., Wang, S., Nie, X., Liu, Y., Yang, C., Tan, M., & Feng, S. (2023). Sediment organic carbon dynamics response to land use change in diverse watershed anthropogenic activities. *Environment International*, 172, 107788. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107788>
- Xu, J., Zhang, L., Li, J., Cao, Z., Yang, H., & Chen, X. (2021). Probabilistic estimation of variogram parameters of geotechnical properties with a trend based on Bayesian inference using Markov chain Monte Carlo simulation. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 15(2), 83-97.

- <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1757720>
- Yulianto, F., Maulana, T., & Khomarudin, M. R. (2018). Analysis of the dynamics of land use change and its prediction based on the integration of remotely sensed data and CA-Markov model, in the upstream Citarum Watershed, West Java, Indonesia. *International Journal of Digital Earth*. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1497098>
- Zarandian, A., Badamfirouz, J., Musazadeh, R., Rahmati, A., & Azimi, S. B. (2018). Scenario modeling for spatial-temporal change detection of carbon storage and sequestration in a forested landscape in Northern Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 190(8), 474. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6845-6>
- Zarandian, A., Mohammadyari, F., Mirsanjari, M. M., & Visockiene, J. S. (2023). Scenario modeling to predict changes in land use/cover using Land Change Modeler and InVEST model: a case study of Karaj Metropolis, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 195(2), 273. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10740-2>
- Zhang, C., Yao, D., Zhen, Y., Li, W., & Li, K. (2022). Mismatched Relationship between Urban Industrial Land Consumption and Growth of Manufacturing: Evidence from the Yangtze River Delta. *Land*, 11(9), 1390. <https://doi.org/10.3390/land11091390>
- Zhang, Z., Hörmann, G., Huang, J., & Fohrer, N. (2023). A Random Forest-Based CA-Markov Model to Examine the Dynamics of Land Use/Cover Change Aided with Remote Sensing and GIS. *Remote Sensing*, 15(8), 2128. <https://doi.org/10.3390/rs15082128>