

## شبیه‌سازی فضایی، مخاطرات و محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی توسعه فیزیکی شهر ملکان



محمدحسین رضائی مقدم\*

استاد ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز

منصور خیری‌زاده آروق (Email: m\_kheirizadeh@yahoo.com)

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۱ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۲۶)

### چکیده

ژئومورفولوژی در برخی موارد، بستر مناسبی برای توسعه فیزیکی شهرها فراهم می‌سازد. گاهی نیز با وجود مساعدت ژئومورفولوژی، توسعه فیزیکی شهرها به‌سمتی است که نتیجه آن برخورد شهر با فرم‌ها و فرایندهای ژئومورفولوژیکی نامناسب و پرمخاطره خواهد بود. بنابراین، در برنامه‌ریزی توسعه فیزیکی شهرها توجه به ژئومورفولوژی منطقه ضروری است. در این تحقیق، با توجه به روند گذشته گسترش مرزهای شهر ملکان (واقع در جنوب استان آذربایجان شرقی)، الگوی رشد آتی شهر با استفاده از مدل ترکیبی ماشین‌های خودکار سلولی - زنجیره مارکوف شبیه‌سازی شده و به محدودیت‌ها و مخاطرات ژئومورفولوژیکی پیش رو در زمینه تداوم الگوی رشد فعلی شهر بررسی می‌شود. در این زمینه، از تصاویر ماهواره‌ای Aster، Spot و Landsat، نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و نرم‌افزارهای GIS و RS استفاده شد. پایش رشد شهری از سال ۱۹۸۵ میلادی نشان می‌دهد که الگوی رشد شهر، بیشتر به‌سمت اراضی بایر و در سال‌های اخیر به‌سمت محدوده تالاب بوده است. با تداوم الگوی رشد گذشته و در نظر گرفتن احتمالات گذار و قوانین همسایگی، روند توسعه آتی شهر اغلب به‌سمت محدوده تالاب و واحد تپه‌ماهورها خواهد بود. ژئومورفولوژی منطقه، محدودیت‌ها و مخاطراتی را به این قسمت‌ها تحمیل خواهد کرد. استقرار قسمت‌هایی از شهر بر روی شیب‌های تند؛ برخورد با لندفرم‌های تپه‌ماهوری با لیتولوژی منفصل، سست و استحکام اندک؛ بالا بودن سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در محدوده تالاب و احتمال آب‌گرفتگی و وقوع سیلاب در این محدوده، از مهم‌ترین مسائل پیش روی توسعه فیزیکی شهر است.

**واژه‌های کلیدی:** توسعه فیزیکی، ژئومورفولوژی، شهر ملکان، ماشین‌های خودکار سلولی، مخاطرات محیطی.

### مقدمه

با اینکه نواحی شهری تنها بخش کوچکی از سطح زمین را اشغال کرده‌اند، شهرنشینی به یکی از عوامل تغییردهنده محیط زمین تبدیل شده است [۱۸]. به طوری که، در طی قرن گذشته، رشد شتابان فعالیت‌های انسانی نزدیک به یک سوم سطح زمین را تغییر داده است [۲۳]. شهرها زمین‌های وسیع و گسترده‌ای را به خود اختصاص می‌دهند. در نتیجه با پدیده‌های ژئومورفولوژی تلاقی می‌کند. در این برخورد اگر اصول و نکات ضروری رعایت نشود، تعادل مورفودینامیک محیط به هم می‌خورد و بسیاری از تجهیزات و امکانات شهری با خطرهای بزرگی مواجه خواهند شد. گاهی شدت مورفوژنز چنان زیاد می‌شود که نتایج جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد [۴]. بنابراین، در منطقه‌بندی شهری یا کاربری زمین در ناحیه شهری، عوامل جغرافیای طبیعی تأثیر فراوانی دارند [۳]. از این رو، ضرورت دارد که روند توسعه فیزیکی شهرها پایش شده و الگوهای رشد شهری شبیه‌سازی شود و با توجه به ویژگی‌های محیطی منطقه، برنامه‌ریزی در زمینه اهداف مناسب توسعه صورت گیرد.

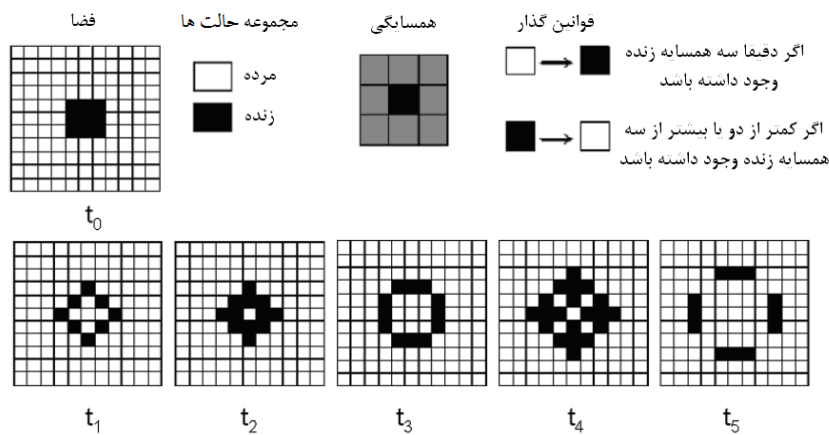
توسعه شهری یک فرایند فضایی دینامیک است که برخی از ویژگی‌های اساسی یک سیستم خودسازمانده را نمایش می‌دهد. همانند انتشار بیماری یا آتش، مرز یک ناحیه شهری به طور مداوم به سمت اراضی روستایی مجاور گسترش می‌یابد. فرم سابق شهر بر روی شکل کنونی شهر تأثیر می‌گذارد و آن هم، خود، الگوهای آتی شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اتخاذ رویکردی در چارچوب پارادایم خودسازمانده برای بررسی رفتار محلی سیستم در مدلسازی توسعه شهری واقع‌بینانه‌تر است، همین امر، به ظهور دسته جدیدی از مدل‌های شبیه‌سازی منجر شد که یکی از متداول‌ترین آنها، شبیه‌سازی جغرافیایی مبتنی بر ماشین‌های خودکار<sup>۱</sup> است [۲۰].

اتوماتای سلولی<sup>۲</sup> را اولام و فون نیومن<sup>۳</sup> در دهه ۱۹۵۰ به عنوان سیستم‌های دینامیک گسسته مطرح کردند که در آن، تعاملات محلی<sup>۴</sup> بین اجزا به ایجاد تغییرات کلی یا فراگیر در فضا و زمان منجر می‌شود [۱۷]. اتوماتای سلولی، ماشین خودکاری<sup>۵</sup> است که اطلاعات را پردازش می‌کند، به صورت منطقی پیش می‌رود و بعد از به کار بستن داده‌هایی که از خارج دریافت می‌کند به طور اجتناب‌ناپذیری در پرتو دستورالعمل‌های برنامه‌ریزی شده درون خود، عمل یا کنش بعدی را انجام می‌دهد [۲۰]. یعنی فرایندی که در آن، سیستم سازماندهی درونی خود را با پیچیدگی

1. Geo-simulation based on automata
2. Cellular automata
3. S.Ulam & Von Neumann
4. Local interactions
5. Self-operating machine

افزایش می‌دهد، بدون اینکه توسط یک منبع خارجی هدایت یا مدیریت شود. در این گونه سیستم خودسازماندهی، الگوها و ساختارهای جدید و منسجم از آشفتگی و آشوب به وجود می‌آیند [۲۰]. بازی زندگی کانوی<sup>۱</sup>، نمونه‌ای ساده از ماشین‌های خودکار سلولی است. این بازی از یک شبکه دوبعدی ساخته شده است که در آن، هر سلول دارای یکی از دو حالت<sup>۲</sup> ممکن (مرده یا زنده) و یک همسایگی هشت‌سلولی (همسایگی مور)<sup>۳</sup> است. در بازی زندگی کانوی، یک سلول می‌تواند زنده بماند، بمیرد، یا متولد شود (شکل ۱) مطابق قوانین زیر [۱۵، ۱۶، ۲۰، ۲۴]:

- بقا<sup>۴</sup>: یک سلول زنده با دو یا سه همسایه زنده در نسل بعدی زنده می‌ماند؛
  - مرگ: یک سلول زنده با کمتر از دو یا بیشتر از سه همسایه زنده، می‌میرد (به دلیل انزوا یا ازدحام)؛
  - تولد: یک سلول مرده با دقیقاً سه همسایه زنده در نسل بعدی زنده می‌شود.
- با استفاده از این قوانین ساده، مدل قادر به تولید ساختارهای بسیار پیچیده است. مدل‌های CA به‌طور فزاینده‌ای برای شبهه‌سازی فرایندهای فضایی-زمانی از قبیل گسترش آتش‌سوزی [۱۱، ۳۴]، انتشار اپیدمی [۲۷]، تغییرات کاربری اراضی [۱۰، ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۹، ۳۰، ۳۲]، رشد شهری [۱، ۸، ۹، ۱۹، ۲۶، ۲۸] و تکامل مورفولوژی رودخانه‌ها [۱۲، ۱۳] استفاده شده‌اند.



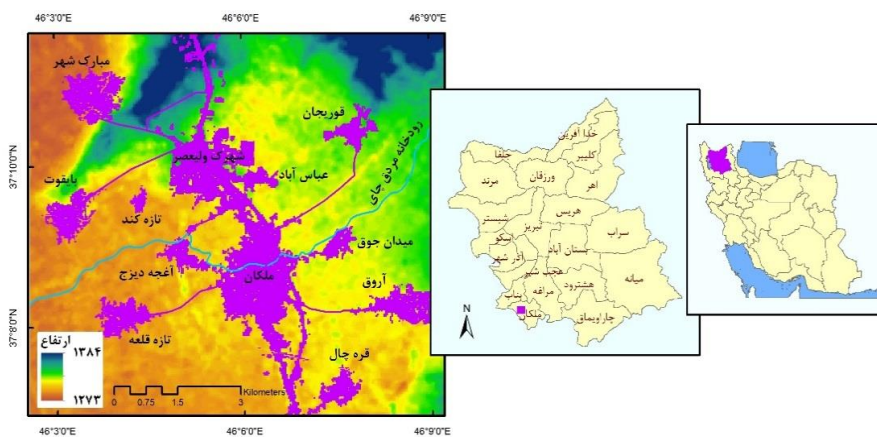
شکل ۱. نوعی شبهه‌سازی ساده براساس بازی زندگی کانوی [۲۴]

1. John Conway's "Game of Life"  
 2. State  
 3. Moore Neighbourhood  
 4. Survival

امروزه، ماشین‌های خودکار سلولی به‌منظور تولید قوانین گذار<sup>۱</sup> با مدل‌های دیگری از قبیل زنجیره مارکوف<sup>۲</sup> ترکیب می‌شوند. در زنجیره مارکوف، وضعیت آتی یک سیستم تنها به وضعیت سابق خود وابسته است. اما در ماشین‌های خودکار سلولی، وضعیت آینده سیستم، هم به وضعیت سابق خود و هم به وضعیت همسایگانش وابسته است و به‌همین دلیل است که ماشین‌های خودکار سلولی برعکس زنجیره مارکوف دارای مفهوم فضایی و به‌عبارت بهتر جغرافیایی‌اند. در این تحقیق، با شبیه‌سازی الگوی رشد آتی شهر ملکان با استفاده از مدل ترکیبی ماشین‌های خودکار سلولی - زنجیره مارکوف، احتمال برخورد شهر با مخاطرات و محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی بررسی می‌شود. در طی سال‌های اخیر، مکان‌یابی توسعه فیزیکی شهر بدون در نظر گرفتن واقعیت‌های ژئومورفولوژیکی منطقه بوده است که تداوم این روند سبب ایجاد مسائل مختلف در قسمت‌هایی از شهر خواهد شد. از این‌رو، شبیه‌سازی فضایی الگوی رشد آتی و بررسی ژئومورفولوژی اراضی پیرامون شهر ضرورت می‌یابد.

### منطقه تحقیق

شهر ملکان مرکز شهرستان ملکان است که در گوشه جنوب غربی استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۲). این شهرستان دارای سه شهر ملکان، لیلان و مبارک‌شهر و پنج دهستان است. مطابق سرشماری سال ۱۳۹۰، جمعیت شهرستان ۱۰۶۱۱۸ نفر و جمعیت شهر ملکان ۲۵۳۱۲ نفر بوده است. هسته اولیه شهر ملکان بر روی مخروط‌افکنه رودخانه مردق‌چای مستقر شده است.



شکل ۲. موقعیت منطقه تحقیق در شمال غرب کشور

1. Transition rules
2. Markov chain

## مواد و روش‌ها

مهم‌ترین مواد تحقیق حاضر شامل نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی منطقه [۶] با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای SPOT، ASTER، Google Earth و تصاویر سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI ماهواره‌های لندست است. همچنین، بازدیدهای میدانی به‌منظور بررسی ژئومورفولوژی و سایر شرایط محیطی اراضی پیرامون شهر صورت گرفت. الگو و روند رشد فیزیکی شهر (از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴) از روی تصاویر ماهواره‌های Landsat با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حاصل شد. داده‌های لازم برای اجرای مدل ماشین‌های خودکار سلولی - زنجیره مارکوف شامل سه سری پوشش زمین (دو سری برای پیش‌بینی و یک سری برای اعتبارسنجی مدل) است. بدین منظور از باندهای ۱۵ متری تصویر ماهواره‌ای SPOT مربوط به تابستان سال ۲۰۰۲ (به‌عنوان تصویر اولیه و پایه)، تصویر ماهواره‌ای SPOT با قدرت تفکیک ۱۰ متر مربوط به تابستان سال ۲۰۰۵ (برای اعتبارسنجی مدل) و تصویر ماهواره‌ای سنجنده OLI ماهواره لندست مربوط به تابستان سال ۲۰۱۴ استفاده شد. کل منطقه از روی تصاویر ماهواره‌ای یادشده به پنج نوع پوشش عمده طبقه‌بندی شد (با دقت حدود ۹۵ درصد). این پنج پوشش عبارتند از: کلاس ۱. اراضی ساخته‌شده که شامل شهر، روستاها و جاده‌های آسفالت است؛ کلاس ۲. اراضی کشاورزی آبی که بیشتر شامل باغ‌ها و تاکستان‌های منطقه است؛ کلاس ۳. اراضی دیم و بایر. اراضی بایر و دیم بر روی تصاویر ماهواره‌ای، بازتاب طیفی نزدیک به هم دارند و به‌همین دلیل، به‌منظور اجتناب از خطا، هر دو پوشش تحت عنوان یک کلاس در نظر گرفته شد؛ کلاس ۴. محدوده تالاب؛ و در نهایت، کلاس ۵. توده‌های آب که مربوط به قسمت‌هایی از رودخانه مردق‌چای است.

از مدل ترکیبی ماشین‌های خودکار سلولی - زنجیره مارکوف برای شبیه‌سازی الگوی فضایی رشد آتی شهر استفاده شد. تحلیل زنجیره مارکوف، تغییرات کاربری اراضی از یک دوره به دوره دیگر را توصیف می‌کند و آن را به‌عنوان پایه‌ای برای پیش‌بینی تغییرات آینده به‌کار می‌گیرد. این امر از طریق توسعه یک ماتریس احتمال گذار<sup>۱</sup> تغییرات کاربری اراضی از یک زمان به زمان دیگر به انجام می‌رسد که مبنای پیش‌بینی برای یک دوره زمانی بعدی است. اما، یکی از مسائل ذاتی همراه با تحلیل مارکوف این است که دارای مفهوم جغرافیایی نیست. بنابراین، ماشین‌های خودکار سلولی برای افزودن مشخصه فضایی به مدل به‌کار گرفته می‌شوند [۱۴]. یک ماشین خودکار سلولی می‌تواند به‌صورت زیر به‌زبان ریاضی بیان شود [۲۰].

1. Transition probability matrix

اگر  $S_{x_{ij}}^t$  حالت یک سلول  $x_{ij}$  در موقعیت  $i, j$  در زمان  $t$ ،  $S_{x_{ij}}^t$  عضو یک تعداد متناهی از حالت‌های سلول‌ها در فضای سلولی، و  $S_{x_{ij}}^{t+1}$  نیز حالت سلول در زمان  $t+1$  باشد، آن‌گاه:

$$S_{x_{ij}}^{t+1} = f\left(S_{x_{ij}}^t, S_{\Omega_{x_{ij}}}^t\right) \quad (1)$$

که در آن:  $\Omega_{x_{ij}}$  نشان‌دهنده یک مجموعه از سلول‌ها در همسایگی سلول  $x_{ij}$ ،  $S_{\Omega_{x_{ij}}}^t$  نشان‌دهنده یک مجموعه از حالت‌های سلول‌های  $\Omega_{x_{ij}}$  در زمان  $t$ ، و  $f$  یک تابع نشان‌دهنده مجموعه‌ای از قوانین گذار است.

یک ماشین خودکار سلولی شامل پنج مؤلفه یا عنصر اساسی است [۱۲، ۲۰، ۲۲، ۳۱]:

۱. سلول<sup>۱</sup>: سلول‌ها در یک ماشین خودکار سلولی در یک شبکه‌بندی فضایی<sup>۲</sup> آرایش می‌یابند. در این زمینه شباهت زیادی بین مدل ماشین‌های خودکار سلولی و مدل GIS رستری وجود دارد. در این تحقیق، تعداد سلول‌های موجود در هر ستون و سطر به ترتیب ۶۵۴ و ۵۸۴ است و ابعاد هر سلول  $15 \times 15$  متر است؛

۲. حالت<sup>۳</sup> یا وضعیت: که ویژگی‌های سیستم را تعریف می‌کند. در هر زمان، هر سلول تنها می‌تواند یک حالت از مجموعه‌ای از حالت‌ها را داشته باشد. در مدل ماشین‌های خودکار سلولی شهری، حالت‌های سلول‌ها می‌تواند انواع کاربری اراضی، از قبیل کاربری شهری یا روستایی، یا هر نوع خاص از کاربری اراضی را نمایش دهد؛

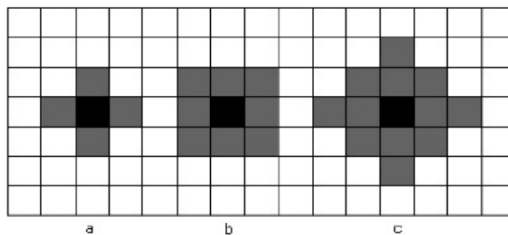
۳. همسایگی<sup>۴</sup>: مجموعه‌ای از سلول‌هاست که با سلول مورد نظر در تعامل‌اند. در یک فضای دوبعدی، دو نوع اساسی همسایگی وجود دارد: همسایگی فون نیومن<sup>۵</sup> (چهارسلولی)، که شامل همسایه‌های شمال، جنوب، شرق، و غرب سلول مورد نظر است؛ و همسایگی مور<sup>۶</sup> (هشت‌سلولی)، که شامل سلول‌های تعریف‌شده در همسایگی فون نیومن به‌علاوه سلول‌های در جهات شمال غرب، شمال شرق، جنوب شرق، و جنوب غرب سلول مورد نظر است (شکل ۳)؛

۴. قانون گذار: تعریف می‌کند چگونه حالت یک سلول در پاسخ به حالت کنونی خود و حالت‌های همسایگانش تغییر می‌یابد. این مؤلفه کلیدی ماشین‌های خودکار سلولی است. زیرا این قوانین، فرایند سیستمی را که مدلسازی می‌شود نشان می‌دهند. در این تحقیق، زنجیره

- 
1. Cell
  2. Spatial tessellation
  3. State
  4. Neighborhood
  5. Von Neumann Neighborhood
  6. Moore Neighborhood

مارکوف به‌عنوان بخشی از قوانین گذار به‌کار گرفته می‌شود. قوانین دیگری نیز با به‌کارگیری یک ارزیابی چندمعیاره و توابع عضویت فازی برای ایجاد نقشه‌های تناسب<sup>۱</sup> ایجاد شد؛

۵. زمان: که بُعد زمانی یک ماشین سلولی را مشخص می‌کند. اتوماتای سلولی در گام‌های زمانی گسسته تکامل می‌یابد. حالت‌های تمامی سلول‌ها به‌طور همزمان در همه تکرارها<sup>۲</sup> در طی زمان به‌نگام<sup>۳</sup> می‌شوند.



شکل ۳. آرایش‌های فضایی دوبعدی همسایگی‌های معمول ماشین‌های خودکار سلولی: (a) همسایگی ۳×۳ فون نیومن، (b) همسایگی ۳×۳ مور، (c) همسایگی ۵×۵ فون نیومن [۱۶]

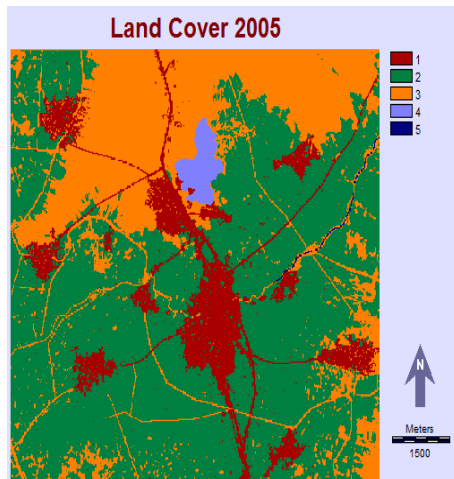
## بحث

### شبیه‌سازی فضایی الگوی رشد شهر

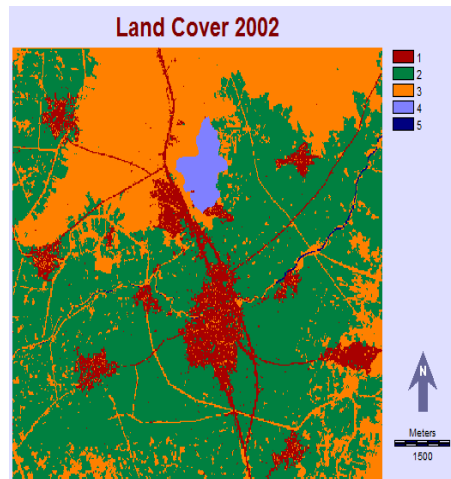
#### - تبادلات پوشش‌های زمین در طی دوره تحقیق

در طی دوره تحقیق، یعنی از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۴، تغییرات به‌نسبت زیادی به‌نفع اراضی کشاورزی آبی و اراضی ساخته‌شده صورت گرفته است (شکل‌های ۴ تا ۷). دلایل اصلی افزایش اراضی کشاورزی آبی، افزایش جمعیت، بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و توسعه سیستم آبرسانی از رودخانه زرينه‌رود بوده است. تغییر عمده دیگر مربوط به افزایش نسبت اراضی ساخته‌شده (کلاس ۱) در منطقه تحقیق است، به‌طوری‌که در مجموع، در بیش از ۶۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی آبی، دیم، بایر و محدوده تالاب در نتیجه توسعه فیزیکی شهرها و روستاهای پیرامون، ساخت‌وساز شده است. در طی ۲۵ سال اخیر با احداث شهرک (ولی‌عصر) در شمال غرب هسته اصلی شهر، روند توسعه شهر ملکان بیشتر به‌سمت اراضی دیم و بایر (کلاس ۳) بوده است که با تداوم توسعه فیزیکی در طی ۱۰ سال اخیر به‌سمت محدوده تالاب آلامالی‌گول نیز توسعه یافته است (شکل ۶).

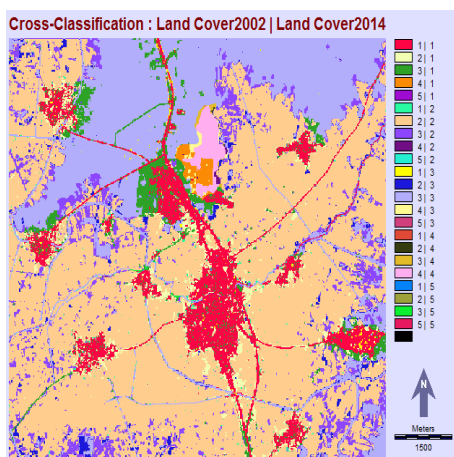
1. Suitability maps
2. Iterations
3. Updated



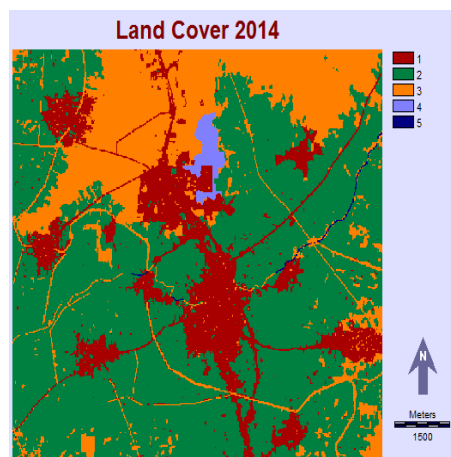
شکل ۵. پوشش زمین منطقه در سال ۲۰۰۵



شکل ۴. پوشش زمین منطقه در سال ۲۰۰۲



شکل ۷. تبادلات پوشش زمین در طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴



شکل ۶. پوشش زمین منطقه در سال ۲۰۱۴

#### - محاسبه ماتریس گذار

احتمالات گذار، نشان‌دهنده احتمال تغییر (یا عدم تغییر) یک سلول کلاس خاص در دوره زمانی بعد به یک سلول کلاس دیگر است [۱۵]. ماتریس احتمال گذار انواع پوشش‌های زمین (حالت‌ها) در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، احتمال گذار هر کاربری به کاربری دیگر برای سال



۲۰۲۶ محاسبه شده است. در بین پنج کلاس موجود، احتمال گذار کلاس ۱ به سایر کلاس‌ها بسیار کم است، به طوری که، به احتمال بیش از ۹۹ درصد، کلاس ۱ همچنان به صورت کلاس اراضی ساخته شده باقی خواهد ماند. برعکس، با در نظر گرفتن مساحت هر یک از کلاس‌ها، احتمال تغییر حالت کلاس ۴ به سایر کاربری‌ها زیاد است. این امر به دلیل گسترش فضایی سریع شهر در سال‌های اخیر به سمت محدوده تالاب است و اگر الگوی رشد شهری همانند گذشته تداوم یابد، به احتمال ۴۰ درصد، کل محدوده تالاب زیر ساخت و ساز خواهد رفت.

جدول ۱. ماتریس احتمال گذار محاسبه شده برای سال ۲۰۲۶

احتمال تغییر به:					
پوشش زمین	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	کلاس ۵
کلاس ۱	۰/۹۹۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
کلاس ۲	۰/۰۴۳	۰/۹۴۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
کلاس ۳	۰/۱۶۸	۰/۱۸۱	۰/۶۴۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱
کلاس ۴	۰/۴۰۳	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹	۰/۵۴۳	۰/۰۰۰
کلاس ۵	۰/۰۲۰	۰/۱۳۶	۰/۱۲۶	۰/۰۰۰	۰/۷۱۸

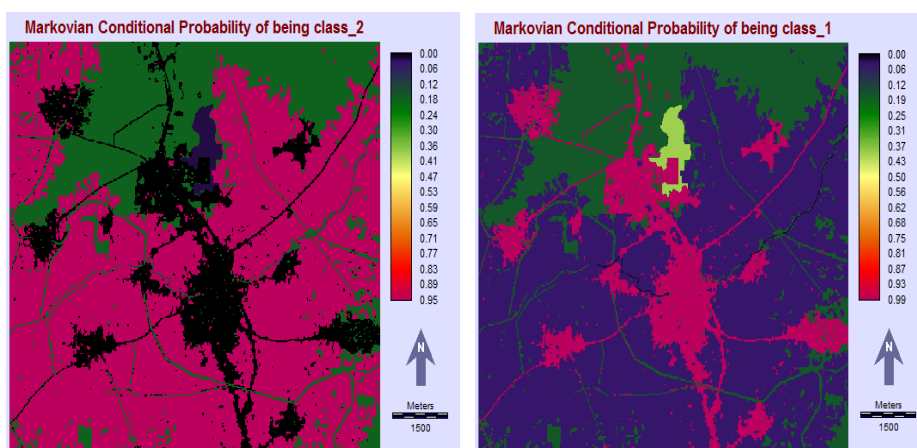
از روی مقادیر ماتریس احتمال گذار، مجموعه‌ای از تصاویر احتمال شرطی<sup>۱</sup> برای هر کلاس پوشش زمین به دست می‌آید که بیان‌کننده احتمالی است که هر سلول در دوره زمانی بعدی به کلاس تعیین شده تعلق داشته باشد (شکل‌های ۸ تا ۱۱). این احتمال، مشروط به حالت یا وضعیت کنونی آنهاست [۱۵].

#### - محاسبه ماتریس مساحت‌های گذار

ماتریس مساحت‌های گذار<sup>۲</sup>، نشان‌دهنده کل مساحتی است که پیش‌بینی می‌شود در دوره زمانی بعدی تغییر یابد [۱۵]. مقادیر این ماتریس در جدول ۲ ارائه شده است. در بین چهار پوشش عمده زمین (کلاس‌های ۱ تا ۴)، کلاس ۱ یعنی اراضی ساخته شده، از بیشترین ثبات برخوردار است، به طوری که با اندکی اغماض می‌توان گفت بیشتر سلول‌های این کلاس بدون تغییر حالت باقی خواهند ماند و تنها تعداد معدودی از سلول‌های این پوشش به کلاس ۲ یا کلاس ۳ گذار می‌کنند که برخی از آنها نیز ممکن است ناشی از خطاهای طبقه‌بندی باشد. اما

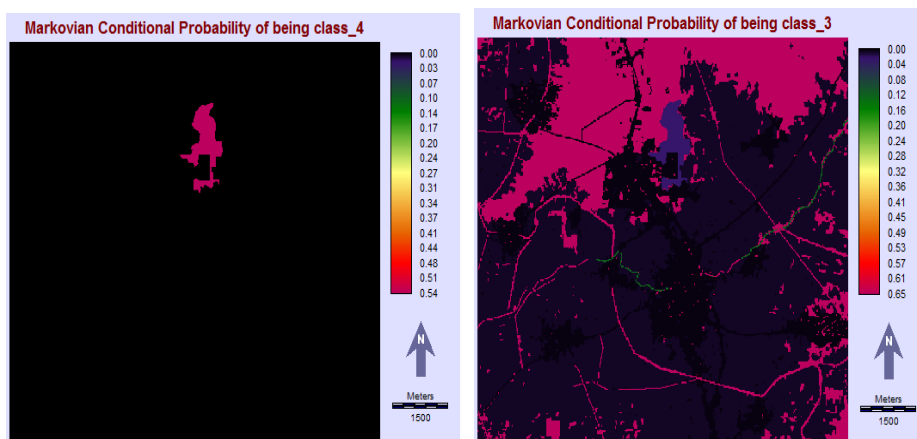
1. Conditional probability images  
2. Transition areas matrix

با در نظر گرفتن مساحت هر پوشش، کلاس ۴ بیشترین تغییرات را خواهد داشت، به طوری که بیش از ۴۰ درصد سلول‌های این پوشش به کلاس ۱ تغییر حالت خواهند داد. از نظر مساحت‌های گذار کل، مشخص است که مساحت کلاس اراضی ساخته شده به ترتیب در نتیجه تبدیل اراضی بایر و دیم، زمین‌های کشاورزی آبی و محدوده تالاب، افزایش خواهد یافت. تبدیل اراضی کشاورزی آبی به اراضی ساخته شده بیشتر در نتیجه رشد حاشیه‌های شهر اصلی و به ویژه به واسطه رشد فیزیکی روستاها به سمت اراضی کشاورزی خواهد بود.



شکل ۸. احتمال شرطی مارکوفی تعلق به کلاس ۱

شکل ۹. احتمال شرطی مارکوفی تعلق به کلاس ۲



شکل ۱۰. احتمال شرطی مارکوفی تعلق به کلاس ۳

شکل ۱۱. احتمال شرطی مارکوفی تعلق به کلاس ۴

جدول ۲. ماتریس سطوح گذار محاسبه شده برای سال ۲۰۲۶ (مقادیر نشان‌دهنده تعداد سلول است)

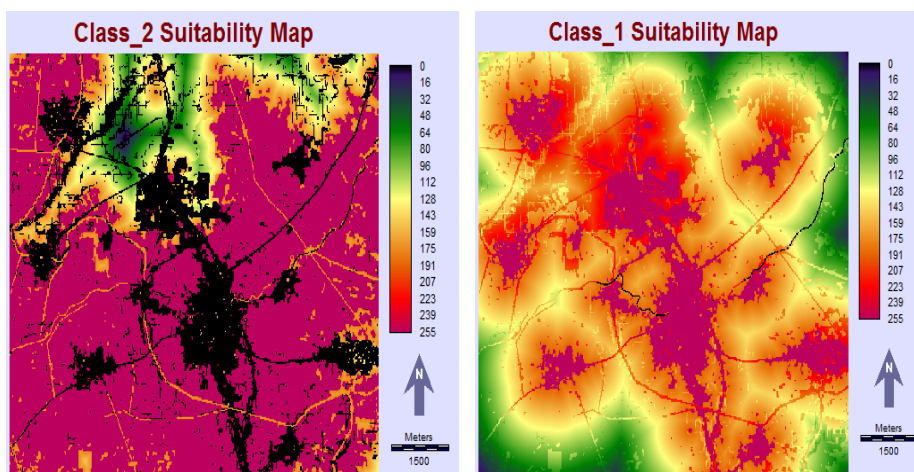
پیش‌بینی می‌شود گذار کند به:					
سلول‌ها در:	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	کلاس ۵
پوشش زمین	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	کلاس ۵
کلاس ۱	۵۵۸۹۴	۱۶۹	۱۶۹	۰	۰
کلاس ۲	۱۰۰۴۷	۲۲۱۴۹۳	۲۱۰۳	۰	۰
کلاس ۳	۱۵۱۵۴	۱۶۳۲۷	۵۸۴۵۲	۱۸۰	۹۰
کلاس ۴	۱۵۱۹	۹۴	۱۰۹	۲۰۴۵	۰
کلاس ۵	۱۳	۸۷	۸۱	۰	۴۵۹

#### - نقشه‌های تناسب

در مدل‌های اتوماتای سلولی، قوانین گذار بر روی سلول‌ها براساس همسایگی محلی آن سلول‌ها عمل می‌کنند [۱۶]. برای نمونه، اگر یک شهر فرضی در نظر گرفته شود که در یک فضای سلولی ساخته شده است، این شهر مشتمل بر یک شبکه منظم دوبعدی از  $n \times n$  سلول، یا قطعات<sup>۱</sup> زمین است. هر قطعه زمین می‌تواند دارای یکی از دو حالت ممکن باشد: شهر یا غیرشهر. همسایگی، نشان‌دهنده منطقه‌ای است که بر روی توسعه قطعه مورد نظر تأثیر می‌گذارد. قوانین گذار تعیین می‌کند که چگونه یک قطعه زمین از یک حالت به حالت دیگر تبدیل می‌شود، از این‌رو، نشان‌دهنده فرایند توسعه در منطقه است. این قوانین گذار، به‌طور معمول به‌صورت مجموعه‌ای از عبارات «اگر-آن‌گاه» بیان می‌شوند. اگر فرض شود که وضعیت اجتماعی، اقتصادی و محیطی در کل منطقه یکنواخت باشد و به‌عبارت دیگر، به‌غیر از چند قطعه زمین که به شهر تبدیل شده‌اند، بقیه قطعه‌ها در حالت غیرشهری باشند، تنها عامل تحریک‌کننده توسعه قطعه‌های زمین، تعداد قطعه‌های توسعه‌یافته در همسایگی یک قطعه مورد نظر خواهد بود [۲۰]. بنابراین با استفاده از قوانین همسایگی، گذار حالت قطعه‌ها کنترل می‌شود. با توجه به قرابت زیاد ماشین‌های خودکار سلولی با مدل رستری در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، به‌سادگی می‌توان با به‌کارگیری فیلترهای مختلف، قوانین همسایگی را اعمال کرد. در این تحقیق، با استفاده از یک فیلتر مجاورت (شکل ۳-۳) قانون همسایگی  $5 \times 5$  اعمال شد.

با وجود این، وضعیت جغرافیایی در یک ناحیه به‌ندرت یکنواخت است. برای مثال، ممکن است اختلافات زیادی در زمینه ناهمواری‌های زمین، شبکه حمل‌ونقل و ... وجود داشته باشد

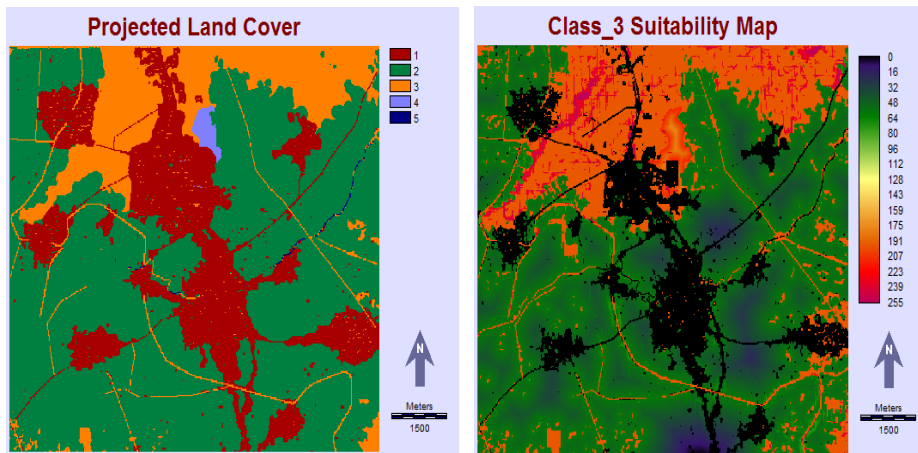
[۲۰]. از این رو، قوانین جدیدی به صورت عبارات اگر-آن گاه می تواند در نظر گرفته شود. این قوانین گذار با به کارگیری ارزیابی چندمعیاره (MCE) و توابع عضویت فازی به منظور ایجاد نقشه های تناسب برای هر کلاس پوشش زمین ایجاد می شوند. ارزیابی چندمعیاره شامل محدودیت ها<sup>۱</sup> و فاکتورها است. محدودیت ها، به صورت تصاویر بولین<sup>۲</sup> بیان می شوند و برای محدود کردن توسعه به کار می روند. فاکتورها، برای تناسب، دسترسی<sup>۳</sup> و تأثیرات همسایگی استفاده می شوند [۲۲]. در این تحقیق، مهم ترین فاکتورها برای تهیه نقشه تناسب، علاوه بر در نظر گرفتن روند تغییرات گذشته پوشش های زمین (تصاویر احتمال شرطی)، عامل فاصله و کاربری های فعلی است. پس از حاصل شدن نقشه های تناسب برای هر یک از کلاس ها (شکل های ۱۲ تا ۱۴)، تغییرات پوشش های زمین و الگوی رشد شهر شبیه سازی شد (شکل ۱۵). دقت مدل با توجه به مقدار ضریب کاپای<sup>۴</sup> کل، ۸۶ درصد است. خطاهای مدل، بیشتر مربوط به رشدهای منقطع اراضی ساخته شده است. در کل، مدل با توان پیش بینی ۸۶ درصد از دقت به نسبت خوبی برخوردار است.



شکل ۱۳. نقشه تناسب کلاس ۲

شکل ۱۲. نقشه تناسب کلاس ۱

1. Constraints
2. Boolean images
3. Accessibility
4. Kappa



شکل ۱۵. پیش‌بینی الگوی رشد شهر برای سال ۲۰۲۶

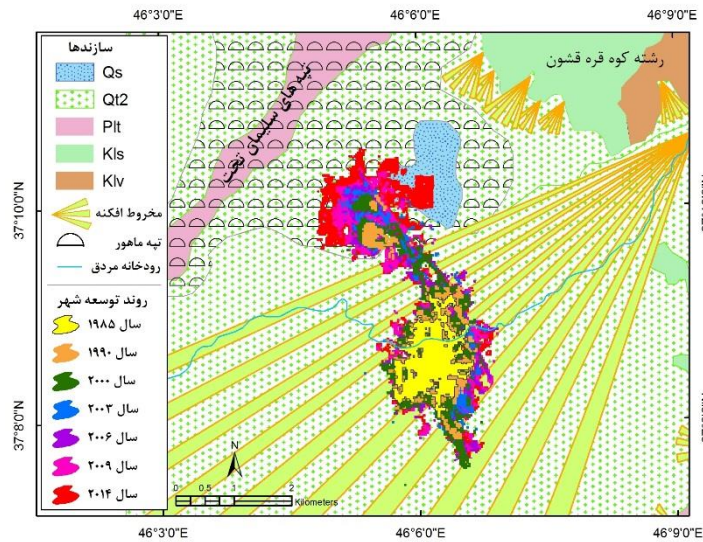
شکل ۱۴. نقشه تناسب کلاس ۳

#### محدودیت‌ها و مخاطرات ژئومورفولوژیکی توسعه آبی شهر

در طی ۲۵ سال اخیر، توسعه شهر ملکان با هدف حفظ اراضی کشاورزی پیرامون شهر، بیشتر به سمت اراضی بایر و در سال‌های اخیر به سمت محدوده تالاب بوده است. در زمینه روند گسترش فیزیکی (شکل ۱۶) و همچنین پیش‌بینی رشد آبی شهر (شکل ۱۵)، ژئومورفولوژی منطقه نقش قاطعی در ایجاد محدودیت‌ها و مخاطرات محیطی ایفا خواهد کرد. اگر روند رشد فعلی شهر تداوم یابد، مطابق مدل استفاده‌شده، شهر بیش از پیش به سمت تپه‌ماهورها و محدوده تالاب کشیده خواهد شد. این امر می‌تواند مسائل مختلفی را سبب شود که آگاهی از آن نیازمند بررسی ژئومورفولوژی منطقه است. از نظر ژئومورفولوژی، بدون در نظر گرفتن رشته‌کوه‌های قره‌قشون در شرق منطقه تحقیق، اراضی پیرامون شهر را می‌توان به سه واحد دشت (که بیشتر منطبق بر مخروط‌افکنه مردق‌چای است)، واحد تپه‌ماهورها و تراس‌های شمالی و در نهایت، محدوده تالاب دسته‌بندی کرد.

هسته اولیه شهر ملکان بر روی مخروط‌افکنه مردق‌چای مستقر شده است (شکل ۱۶). در تأسیس مناطق شهری بر روی مخروط‌افکنه‌ها معمولاً به مسائل مربوط به تغییر مجاری، وقوع سیلاب‌ها و تغییر مقدار رسوب کمتر توجه می‌شود و از این رو مناطق یادشده تنها در صورتی برای کاربری شهری مناسب خواهند بود که مجاری سیلاب عریض و فضاهای کافی برای عبور جریان‌های استثنایی بالادست در میان منطقه ساخته شده تدارک دیده شود [۵]. بنابراین، در برنامه‌ریزی برای توسعه آبی شهر باید به این مسئله توجه کرد. حاشیه‌های مخروط‌افکنه مردق‌چای با بالا

بودن سطح آب‌های زیرزمینی مشخص می‌شود که در مناطق مستعد، به تشکیل تالاب منجر شده است. در این مورد، می‌توان به تالاب‌های قره‌چال (اطراف روستای قره‌چال)، گبئی و خان گؤلی (واقع در اراضی جنوبی روستای آروق) در حاشیه جنوبی مخروط‌افکنه و تالاب آلامالی گؤل در حاشیه شمالی مخروط‌افکنه (شمال روستای عباس‌آباد و شرق شهرک) اشاره کرد. این تالاب‌ها به دلیل خشکسالی‌های اخیر، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و همچنین برداشت اکثر آب رودخانه مردق‌چای در شهرستان مراغه خشک شده‌اند. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی همچنین به افزایش شوری آب‌های دشت ملکان در نتیجه نفوذ آب‌های شور هزاره‌های دریاچه ارومیه منجر شده است. به‌طوری‌که نمودار تغییرات هدایت الکتریکی (کموگراف) دشت ملکان (سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی) نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی از ۱۱۹۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر مربع در سال ۱۳۷۷ به ۱۴۴۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر مربع در سال ۱۳۹۰ رسیده است و روند کلی نمودار، نشان‌دهنده افزایش هدایت الکتریکی و به‌عبارت دیگر، افزایش شوری آب‌های زیرزمینی دشت است. در بین تالاب‌های حاشیه مخروط‌افکنه، تنها تالاب آلامالی گؤل در قسمت‌هایی از سال به‌ویژه فصل بهار دارای آب است. این تالاب به‌علت وجود تپه‌های به‌نسبت مرتفع سلیمان تخت در غرب، تپه‌ماهورهای شمال، رشته‌کوه قره‌قشون در شرق و در نهایت مخروط‌افکنه مردق‌چای در جنوب و به‌شکل محدب، به‌صورت یک سطح اساس محلی عمل می‌کند و آب قسمت‌هایی از آبراهه‌های دامنه‌های غربی رشته‌کوه قره‌قشون و تپه‌های اطراف را دریافت می‌دارد. در طی سال‌های اخیر، قسمت‌هایی از تالاب در نتیجه توسعه فیزیکی شهر ملکان به ساخت‌وساز اختصاص یافته است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). با توجه به نتایج مدل ماشین‌های خودکار سلولی-زنجیره مارکوف، احتمال گذار کل محدوده تالاب به اراضی ساخته‌شده ۴۰ درصد است که این مقدار در مقایسه با احتمال گذار سایر کاربری‌ها بسیار زیاد است. یعنی اگر این روند ادامه یابد، به احتمال زیاد بخش‌های زیادی از محدوده تالاب به یک منطقه شهری تبدیل خواهد شد. در این قسمت‌ها علاوه بر بالا بودن سطح آب‌های زیر زمین، با توجه به اقلیم منطقه، رگبارهای شدید بهاری و تابستانی می‌تواند به مخاطره‌ای جدی تبدیل شود. برای نمونه یک بارش رگباری در تابستان ۱۳۹۱ به جاری شدن سیلاب به سمت این محدوده منجر شد. بنابراین، با توجه به پیش‌بینی الگوی رشد آبی شهر، این قسمت از شهر با مسئله بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی، سیلاب محلی و مسائل مربوط به دفع فاضلاب‌های شهری مواجه خواهد بود.



شکل ۱۶. روند توسعه فیزیکی شهر ملکان به همراه زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی اراضی پیرامون شهر



شکل ۱۸. لیتولوژی منفصل واحد تپه‌ماهورها و تراس‌ها



شکل ۱۷. ساخت‌وساز در محدوده تالاب

در منطقه تحقیق، تپه‌ماهورها و تراس‌های دریاچه‌ای نیز از گستردگی زیادی برخوردارند (شکل ۱۶). این واحد همراه با واحد مخروط‌افکنه‌ها بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه تحقیق، تحت عنوان سازند Qt2 یعنی تراس‌های جوان و مخروط‌افکنه‌ها مشخص شده‌اند (شکل ۱۶) که از نظر لیتولوژی، بیشتر از جنس قلوه‌سنگ، شن، ماسه ریز و درشت و رس سخت‌نشده تا نیمه‌سخت

تشکیل شده‌اند [۷]. اما از نظر ژئومورفولوژی و دانه‌بندی رسوبات، اختلاف فاحشی بین این دو واحد وجود دارد. با توجه به لوگ زمین‌شناسی نصرت‌آباد (واقع بر مخروط افکنه) رسوبات مخروط افکنه از سیلت، رس و ماسه تشکیل شده‌اند. اما نهشته‌های سازند واحد تراس‌ها و تپه‌ماهورها بیشتر شامل قلوه‌سنگ و شن هستند. بنابراین، استحکام اندکی دارند و ساخت‌وساز در این قسمت‌ها مستلزم هزینه‌های هنگفت برای گودبرداری و تسطیح است (شکل ۱۸).

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روند توسعه فیزیکی شهر ملکان در طی ۳۰ سال گذشته بررسی و الگوی توسعه آتی شهر در طی ۱۲ سال آینده شبیه‌سازی شد و با بررسی ژئومورفولوژی اراضی پیرامون شهر، محدودیت‌ها، تنگناها و مخاطرات احتمالی ناشی از تداوم الگوی رشد فعلی شهر مورد بررسی قرار گرفت. در طی ۳۰ سال گذشته، بیشتر توسعه فیزیکی شهر به صورت احداث شهرک در اراضی بایر و دیم شمال غرب هسته اولیه شهر بوده است که در سال‌های اخیر، علاوه بر تداوم این روند، الگوی رشد به سمت محدوده تالاب آلامالی گؤل در شرق شهرک نیز جهت‌گیری کرده است که در نتیجه آن، قسمتی از محدوده تالاب به یک منطقه شهری تبدیل شده است. با توجه به مشاهدات میدانی به نظر می‌رسد این روند همچنان تداوم خواهد یافت. برای پیش‌بینی الگوی رشد آتی شهر از مدل ماشین‌های خودکار سلولی - زنجیره مارکوف استفاده شد. با توجه به روند گذشته، احتمال توسعه شهر به سمت واحدهای ژئومورفیک تپه‌ماهورها و محدوده تالاب زیاد خواهد بود. همین وضعیت ممکن است موجب ایجاد مسائل و مشکلاتی شود. تپه‌ماهورها و تراس‌های منطقه، علاوه بر شیب زیاد، بیشتر از قلوه‌سنگ و شن تشکیل شده‌اند. بنابراین، این واحد از نظر لیتولوژی بسیار منفصل است و استحکام اندکی دارد. در نتیجه، استقرار ساختمان‌ها و تأسیسات شهری مستلزم عملیات خاک‌برداری و تسطیح زیادی است و در صورت غفلت ممکن است به نشست و تخریب ساختمان‌ها منجر شود. با توجه به الگوی رشد شهر در سال‌های اخیر، دست‌اندازی به محدوده تالاب و پیش‌بینی مدل ماشین‌های خودکار سلولی، به احتمال زیاد در سال‌های پیش رو قسمت‌های زیادی از گستره تالاب به زیر ساخت‌وساز شهری خواهد رفت. در این قسمت، سطح آب زیرزمینی به دلیل قرارگیری در حاشیه مخروط افکنه بالاست. افزون بر این، با توجه به ژئومورفولوژی منطقه، این قسمت به چاله بسته تبدیل شده است و در طی بارندگی‌ها، آب دامنه تپه‌های مشرف و همچنین قسمتی از دامنه‌های غربی رشته‌کوه قره‌قشون به این قسمت وارد می‌شوند. بنابراین، در طی رگبارهای شدید، این قسمت از شهر با خطر وقوع سیلاب و آب‌گرفتگی مواجه خواهد بود. در حال حاضر، بالابودن سطح



آب‌های زیرزمینی و تجمع رواناب‌ها مسائل زیادی را متوجه واحدهای مسکونی تازه‌تأسیس کرده است که این امر نشان‌دهنده بی‌توجهی به ژئومورفولوژی منطقه به‌هنگام مکان‌یابی توسعه فیزیکی شهر است. در صورتی که باید ژئومورفولوژی منطقه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای مکان‌یابی مدنظر قرار می‌گرفت. بنابراین به‌منظور کاهش مخاطرات و محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود که از توسعه بیشتر شهر به‌سمت محدوده تالاب جلوگیری شود و در خصوص واحدهای مسکونی و خدماتی که در این محدوده احداث شده‌اند با اتخاذ راهکارها و اقداماتی، مشکلات را به حداقل رساند. با توجه به کیفیت بهتر آب‌های زیرزمینی و حاصلخیزی اراضی موجود در شرق شهر اصلی ملکان، وجود تپه‌ماهورها و تالاب در شمال، غرب و شرق شهرک ولی‌عصر و با درنظر گرفتن عواملی همچون خطر سیلاب‌های رودخانه مردق‌چای و فاصله از جاده‌های ارتباطی، بهتر است توسعه شهرک ولی‌عصر به‌سمت جنوب و جنوب غرب و توسعه شهر اصلی به‌سمت غرب و شمال غرب باشد.

## منابع

- [۱]. احدنژاد روشتی، محسن؛ زلفی، علی؛ شکری‌پور دی‌زج، حسین. (۱۳۹۰). ارزیابی و پیش‌بینی گسترش فیزیکی شهرها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه مورد شهر اردبیل ۱۳۶۳-۱۴۰۰). آمایش محیط، شماره ۱۵: ۱۲۴-۱۰۷.
- [۲]. جداری عیوضی، جمشید. (۱۳۸۶). ژئومورفولوژی ایران، چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه پیام نور.
- [۳]. رجائی، عبدالحمید. (۱۳۸۲). کاربرد جغرافیای طبیعی در برنامه‌ریزی شهری و روستایی، چاپ اول، انتشارات سمت.
- [۴]. رجائی، عبدالحمید. (۱۳۸۷). کاربرد ژئومورفولوژی در آمایش سرزمین و مدیریت محیط، چاپ سوم، نشر قومس.
- [۵]. روستایی، شهرام؛ جباری، ایرج. (۱۳۹۰). ژئومورفولوژی مناطق شهری، چاپ سوم، انتشارات سمت.

- [۶]. سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه زمین‌شناسی برگه مراغه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ به همراه گزارش.
- [۷]. شهرابی، مصطفی. (۱۳۷۳). شرح نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ارومیه، چاپ اول، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- [۸]. علی محمدی سراب، عباس؛ متکان، علی‌اکبر؛ میرباقری، بابک. (۱۳۸۹). ارزیابی کارایی مدل سلول‌های خودکار در شبیه‌سازی گسترش اراضی شهری در حومه جنوب غرب تهران. *مدرس علوم انسانی-برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره چهاردهم، شماره ۲: ۱۰۲-۸۱.*
- [9]. Benenson, I., and Torrens, P. M. (2004). Geosimulation: Object-based modeling of urban phenomena. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 28, pp. 1-8.
- [10]. Clarke, K. C. (2008). Mapping and modelling land use change: An application of the SLEUTH model. In C. Pettit, W. Cartwright, I. Bishop, K. Lowell, D. Pullar, & D. Duncan (Eds.), *Landscape analysis and visualisation: Spatial models for natural resource management and planning*, pp. 353-366, Springer.
- [11]. Clarke, K. C., Brass, J. A., Riggan, P. J. (1994). A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 60(11), pp.1355-1367.
- [12]. Coulthard, T.J. (1999). Modelling upland catchment response to Holocene environmental change. Unpublished phd thesis, school of geography, university of Leeds, U.K. 181pp.
- [13]. Coulthard, T.J., Van de Wiel, M.J. (2006). A cellular model of river meandering. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 31, pp. 123-132.
- [14]. Eastman, J. Ronald (a). (2012). IDRISI Selva Tutorial, Manual Version 17. Clark Labs, Clark University.
- [15]. Eastman, J. Ronald (b). (2012). IDRISI Selva Manual, Manual Version 17. Clark Labs, Clark University.
- [16]. Fonstad, Mark. A. (2006). Cellular automata as analysis and synthesis engines at the geomorphology-ecology interface. *Geomorphology*, Vol. 77, pp. 217-234.
- [17]. Garcia, Andres. Manuel., Sante, Ines., Crecente, Rafael., Miranda, David. (2011). An analysis of the effect of the stochastic component of urban cellular automata models. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.35, pp. 289-296.
- [18]. Gutman, Garik., Janetos, Anthony. C., Justice, Christopher. O., Moran, Emilio. F., Mustard, John. F., Rindfuss, Ronald. R., Skole, David., Turner, Billy Lee., Cochrane, Mark. A. (2004). Remote sensing and digital image processing, Volume 6, land change science: observing, monitoring and understanding trajectories of change on the earth's surface. Springer.
- [19]. Li, X and Yeh, A. G. (2002). Integration of principal components analysis and cellular automata for spatial decision making and urban simulation. *Science in China*, Vol. 45(6), pp. 521-529.

- [20]. Liu, Yan. (2009). modelling urban development with geographical information systems and cellular automata. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [21]. Menard, A and Marceau, D. J. (2007). Simulating the impact of forest management scenarios in an agricultural landscape of Southern Quebec, Canada, using a geographic cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 79 (3-4), pp. 253-265.
- [22]. Mitsova, Diana., Shuster, William., Wang, Xinhao. (2011). A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 99, pp. 141-153.
- [23]. Moreno, N., Wang, F., Marceau, D. J. (2009). Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 33(1), pp. 44-54.
- [24]. Moreno, N.L. (2008). A vector-based geographical cellular automata model to mitigate scale sensitivity and to allow objects' geometric transformation. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. University of Calgary.
- [25]. Pan, Ying., Roth, Andreas., Yu, Zhenrong., Doluschitz, Reiner. (2010). The impact of variation in scale on the behavior of a cellular automata used for land use change modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 34, pp. 400-408.
- [26]. Sante, Ines., Garcia, Andres. M., Miranda, David., Crecente, Rafael. (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 96, pp. 108-122.
- [27]. Sirakoulis, G. Ch., Karafyllidis, I., Thanailakis, A. (2000). A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. *Ecological Modelling*, Vol. 133(3), pp. 209-223.
- [28]. Van Vliet, J., White, R., Dragicevic, S. (2009). Modeling urban growth using a variable grid cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 33(1), pp. 35-43.
- [29]. Wang, Fang., Hasbani, Jean-Gabriel., Wang, Xin., Marceau, Danielle J. (2011). Identifying dominant factors for the calibration of a land-use cellular automata model using Rough Set Theory. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 35, pp.116-125.
- [30]. White, R., Engelen, G., Ujje, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 24(3), pp. 323-343.
- [31]. Wolfram, S. (1984). Computation theory of cellular automata. *Communications in Mathematical Physics*, Vol. 96, pp.15-57.
- [32]. Wu, Fulong. (2002). Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 16, No. 8, pp. 795-818.

- 
- [33]. Yang, Xiaojun and Li, Jonathan. (2013). *Advances in mapping from remote sensor imagery: techniques and applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [34]. Yassemi, S., Dragicevic, S., Schmidt, M. (2008). Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour. *Ecological Modelling*, Vol. 210 (1-2), pp. 71-84.