

نظارت و پیش‌بینی تغییرات گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده شهر ساری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و مدل CA-Markov

کمیل عبدی^۱

دکتر سعید کامیابی^۲

دکتر محمدرضا زند مقدم^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸

چکیده

در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، تغییرات کالبدی و تراکم ساخته شده شهر ساری به طور همزمان در چهار دوره ۱۰ ساله از ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ ارزیابی شد. از الگوریتم‌های طبقه بندی حداکثر احتمال و آنالیز طیف مخلوط نرمال شده به ترتیب به منظور استخراج اطلاعات کالبدی و تراکم ساخته شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که مساحت کالبدی شهر ساری از ۱۷۲۶ هکتار در سال ۱۹۸۸ به ۳۰۷۱ هکتار در سال ۲۰۱۸ رسیده است که بیشترین گسترش کالبدی در جهات شرق، جنوب و جنوب غرب این شهر اتفاق افتاده است. همچنین تراکم ساخته شده نیز از ۴۹ درصد در سال ۱۹۸۸ به ۵۶ درصد در سال ۲۰۱۸ رسیده است که بیشترین افزایش تراکم ساخته شده در جهات شمال شرق (۱۲٪)، جنوب (۱۲٪) و غرب (۱۰٪) مشاهده می‌شود. علاوه بر این، گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده در سال ۲۰۲۸ شبیه سازی شد. نتایج مدل، افزایش ۱۷۱۶ هکتاری مساحت کالبدی شهری ساری با بیشترین مقدار در جهات جنوب غرب و شرق و افزایش میانگین تراکم ساخته شده از ۵۶ درصد به ۶۳ درصد با بیشترین مقدار در جهات شمال، شرق و جنوب غرب در راستای راه های اصلی شهر را پیش بینی کرد.

کلیدواژه: گسترش کالبدی، تراکم ساخته شده، زنجیره مارکوف، سلول‌های خودکار، شهر ساری

^۱ دانشجوی دکتری گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

^۲ دانشیار گروه جغرافیا، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران saeidkamyabi@gmail.com

^۳ استادیار گروه جغرافیا، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۱- مقدمه

گسترش شهری یکی از چالش‌های عمده در مسیر کاربری پایدار زمین است (Hennig et al, 2015: 483). این پدیده مشکلات عمده اقتصادی، اجتماعی، اقلیمی و آلودگی‌های زیست محیطی از قبیل جداسازی درآمد و افزایش نابرابری (Guo et al, 2017: 1)، افزایش تقاضا و مصرف انرژی و آب (Navamuel et al, 2018: 3471; Morote & Hernández, 2016: 351)، افزایش دمای هوا و توسعه جزیره حرارتی شهری (Kohler et al, 2017: 93)، افزایش پارامترهای آلودگی هوا و کاهش کیفیت هوا (Smith et al, 2016: 1008)، افزایش ناراحتی‌ها و بیماری‌های جسمانی و روحی (Ewing et al, 2014: 118; Garrido-Cumbrera et al, 2018: 381) و بسیاری از مشکلات و تهدیدهای دیگر را به ارمغان آورده است به طوری که در سال‌های اخیر به دلیل افزایش آگاهی از این تهدیدها، نیاز فوری به نظارت بر گسترش شهرها و اجرای سیاست‌های کارآمد از طرف مدیران و برنامه‌ریزان شهری در دستور کار قرار گرفته است. قابلیت‌های بالای سنجش از دور و تکنیک‌های مرتبط با آن در استخراج اطلاعات ویژگی‌های سطح زمین به ویژه کاربری/ پوشش زمین^۱ (LULC) در ترکیب با مدلسازی‌های فضایی سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS) امکانات فوق العاده‌ای برای نظارت بر تغییرات کاربری/ پوشش زمین و گسترش شهرها و شبیه‌سازی تغییرات در آینده را فراهم کرده است.

از زمانی که تصاویر ماهواره‌ای برای اهداف غیر نظامی در اختیار پژوهشگران قرار گرفت، این تصاویر در قدرت تفکیک‌های مکانی، طیفی و زمانی متفاوت برای نظارت بر تغییرات کاربری/ پوشش زمین و گسترش شهری مورد استفاده بوده است (Alsharif & Pradhan, 2014: 149; Rahman, 2016: 1; Scott et al, 2018: 21). یکی از پرکاربردترین مدل‌های GIS بر پایه تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات شهری، مدل تغییرات زمین^۳ (LCM) می‌باشد. مدل‌های LCM تغییرات کاربری/ پوشش زمین و پیش‌بینی تغییرات در آینده در سناریوهای قابل قبول را فراهم می‌کند. در طول سال‌های گذشته، علم تغییر زمین به عنوان یک جزء اساسی از تغییرات زیست محیطی و توسعه پایدار ظهور یافته است، و مدل‌سازی تغییرات زمین به عنوان یک تحقیق پایه در علم تغییر زمین شناخته شده است (Liu & Yang, 2015: 3). در میان مدل‌های موجود LCM، مدل‌های فضایی بر پایه نقشه‌های کاربری/ پوشش زمین در دهه‌های اخیر توسعه فراوانی یافته‌اند. دو مدل زنجیره مارکوف^۴ و سلول‌های خودکار^۵ و ترکیب این دو مدل (CA-Markov) در سال‌های اخیر به

^۱ Land use/cover

^۲ Geographic information system

^۳ Land Change Modeling

^۴ Markov chain

^۵ Cellular automata

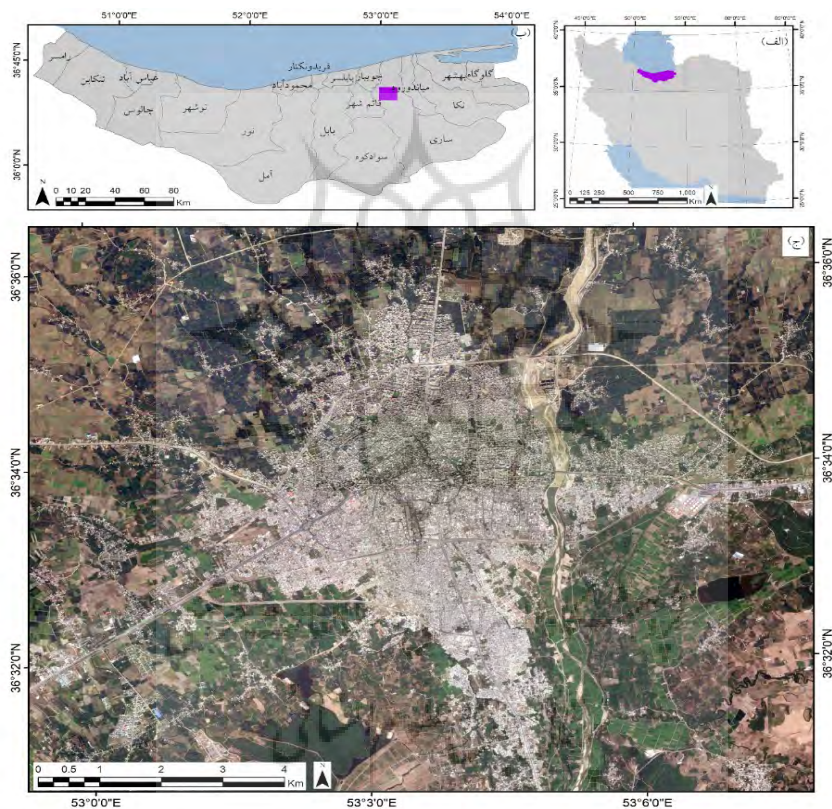
طور فزاینده ای برای پیش تغییرات کاربری/ پوشش زمین و پیش بینی تغییرات در مناطق شهری در آینده مورد استفاده بوده است.

ریمال و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، تغییرات کاربری و پوشش زمین و الگوی گسترش شهری را برای شهرهای دره کیتمندو و محیط اطراف آن‌ها مورد بررسی قرار دادند. طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از تکنیک ماشین بردار پشتیبانی (SVM) انجام شد. برای پیش‌بینی آینده گسترش شهر در سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۳۲ روش CA-Markov مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحقیق، گسترش قابل ملاحظه‌ای در پوشش شهری را نشان داد که موجب کاهش اراضی کشاورزی شده بود. ابوراس و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای با هدف بهبود قابلیت شبیه‌سازی مدل CA-Markov، فاکتورهای فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی، خدماتی و محیطی به عنوان پیش بینی کننده‌ها از قبیل ارتفاع، شیب، بافت خاک، تراکم جمعیت، فاصله تا محل تجاری، فاصله تا محل تحصیل، فاصله تا مسکونی، فاصله تا محل کار، فاصله تا جاده‌ها، فاصله تا بزرگراه، فاصله تا راه آهن، فاصله تا خط برق، فاصله تا جریان، و پوشش زمینی را در مدل قرار دادند. جمع‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) در مقاله‌ای از روش تجزیه و تحلیل طیف مخلوط نرمال شده^۱ (NSMA) جهت استخراج مناطق ساخته شده شهری از تصاویر ماهواره‌ای لندست و استفاده از آن برای پیش بینی رشد آتی شهر رشت استفاده کردند. نتایج نشان داد که این روش طبقه بندی توانست برخلاف طبقه بندی بر پایه پیکسل که خاک روشن را جزء طبقه ساخته شده قرار می‌دهد، به خوبی پوشش خاک را از اراضی ساخته شده جدا کند. کاظم زاده و همکاران (۲۰۱۷) نیز در تحقیقی، با هدف ارتقاء کالیبراسیون مدل و اعتبارسنجی مولفه‌های داخلی و خارجی، در مدل‌های پیش بینی تغییر کاربری و رشد شهری یک رویکرد فضایی- منطقه‌ای برای شبیه سازی گسترش بلندمدت شهر مشهد، ارائه کردند. سپس با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (MLP) و تجزیه و تحلیل زنجیره مارکوف، رشد شهری برای هر منطقه شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی بر اساس منطقه بندی فضایی با نتایج مدل های رشد شهری سنتی مقایسه شد و نشان داد که دقت مدل منطقه بندی فضایی به طور قابل توجهی نسبت به مدل‌های سنتی‌تر بهبود یافته است. در تحقیقات گذشته تکنیک‌های پیکسل مبنا برای استخراج کاربری/ پوشش زمین به کار برده شده است و روش‌های زیر پیکسل استفاده شده در نهایت به نقشه‌های پیکسل مبنا تبدیل شده است. در این تحقیق هر دو روش پیکسل مبنا و زیر پیکسل به صورت مجزا بکار برده شده است. در این تحقیق سعی بر آن است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های استخراج اطلاعات پیکسل مبنا و زیر پیکسل و همچنین استفاده از مدل ترکیبی CA-Markov و متغیرهای وابسته جانبی، تغییرات کالبدی و تراکم ساخته شده شهر ساری به طور همزمان در چهار دوره ۱۰ ساله از ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ ارزیابی شود و تغییرات آینده نیز پیش بینی شود.

^۱ Normalized spectral mixture analysis

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه محدوده شهر ساری است که در قسمت جلگه‌ای شهرستان ساری، مرکز استان مازندران واقع شده است. جمعیت این شهر طبق سرشماری ۱۳۹۵، ۳۴۷۴۰۲ نفر بوده است که نسبت به جمعیت سال ۱۳۹۰ که ۲۹۶۴۱۷ نفر بود (مرکز آمار ایران) رشد جمعیتی بالایی را تجربه کرده است. این رشد جمعیت نگرانی‌هایی را درباره نیازهای جمعیت و گسترش متعاقب شهر و مشکلات آبی ناشی از آن مانند سیل (موسوی و همکاران، ۱۳۹۳). را به وجود آورده است. بنابراین نظارت و مدلسازی گسترش شهر ساری به منظور مدیریت پایدار شهر ساری ضروری به نظر می‌رسد.



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان مازندران

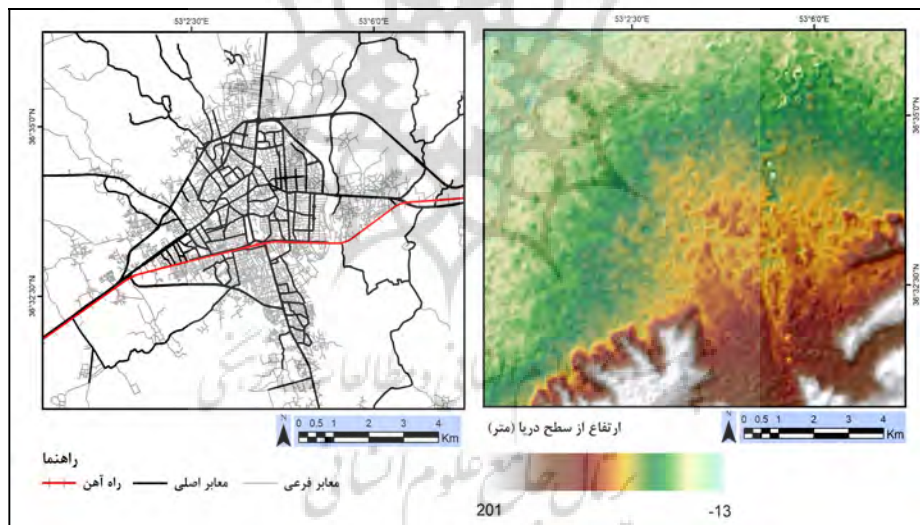
۳- داده‌های مورد استفاده

داده‌های اصلی مورد استفاده در این تحقیق شامل سری زمانی تصاویر لندست از سنجنده‌های (TM و OLI) می‌باشد که از سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) در چهار دوره ۱۰ ساله تهیه شده است که در جدول (۱) مشخصات این تصاویر آمده است.

جدول (۱) مشخصات تصاویر ماهواره ای مورد استفاده

ردیف ماهواره ای	مسیر عبور ماهواره ای	سنجنده	تاریخ کسب تصویر	
۳۵	۱۶۳	TM	۱۹ سپتامبر ۱۹۸۸	۱
۳۵	۱۶۳	TM	۱۶ سپتامبر ۱۹۹۸	۲
۳۵	۱۶۳	TM	۱۳ اکتبر ۲۰۰۸	۳
۳۵	۱۶۳	OLI	۷ سپتامبر ۲۰۱۸	۴

داده‌های جانبی مورد استفاده شامل داده معابر شهر ساری که از شهرداری این شهر تهیه شده است و مدل رقومی ارتفاع (DEM) از سازمان زمین شناسی آمریکا تهیه شده است.



شکل (۲) نقشه معابر و ارتفاع از سطح دریا در شهر ساری

۴- روش شناسی.

۴-۱- ارزیابی تغییرات کالبدی شهر ساری

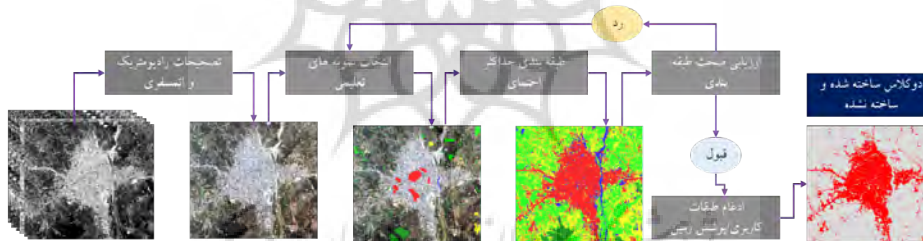
ابتدا تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری بر روی تصاویر اعمال شد و ارزش پیکسل‌ها به بازتاب سطح زمین شد. از الگوریتم طبقه بندی حداکثر احتمال به منظور طبقه‌بندی تصاویر به دو طبقه ساخته شده و غیر ساخته شده استفاده شد. این الگوریتم از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$p(X | w_i) = \frac{1}{(2\pi)^n |V_i|^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{1}{2}(X - M_i)^T V_i^{-1}(X - M_i)\right] \quad (1)$$

در اینجا x بردار مقادیر طیفی و w_i کلاس طیفی i می‌باشد $|V_i|$ ماتریس کواریانس را تعیین می‌کند، V_i^{-1} معکوس ماتریس کواریانس است و $(X - M_i)^T$ ترانزپوز بردار $(X - M_i)$ است. برای ارزیابی صحت نتایج طبقه بندی تصاویر از ضریب کاپا که از رابطه (۲) بدست می‌آید، استفاده شده است (Mather & Tso, 2016: 233). نمونه‌های آزمایشی برای ارزیابی صحت برای سال ۲۰۱۸ از تصاویر آنلاین با تفکیک بالا و برای سایر سال‌ها از خود تصاویر برداشت شده است.

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

در این رابطه N تعداد کل پیکسل‌های واقعیت زمینی (پیکسل‌های نمونه تعلیمی)، r تعداد ردیف‌های جدول خطا، X_{ii} تعداد مشاهدات مربوط به ردیف i و ستون i ، X_{i+} مشاهدات در ردیف i و X_{+i} کل مشاهدات در ستون i است.



شکل (۳) مراحل استخراج دو کلاس کاربری/ پوشش زمین ساخته شده و ساخته نشده از تصاویر لندست

۴-۲- ارزیابی تغییرات تراکم ساخته شده شهر ساری با روش NSMA

روش NSMA همانند روش آنالیز طیف مخلوط^۱ SMA می‌باشد با این تفاوت که در روش NSMA باندهای تصاویر لندست به منظور هماهنگ کردن طیف ویژگی‌های سطح زمین مانند ساختمان‌ها نرمال می‌شوند (Wu, 2004: 487). در روش NSMA ابتدا میانگین تمام باندها محاسبه

^۱ Spectral mixture analysis

شده و سپس تک تک باندها بر میانگین تقسیم می‌شوند تا تفاوت روشنایی در طیف‌های یک ماده مشخص کم شود. ارزش‌های پیکسل با توجه به روابط ۳ و ۴ نرمال می‌شوند:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N R_b \quad (3)$$

$$\bar{R}_b = \frac{R_b}{\mu} \times 100 \quad (4)$$

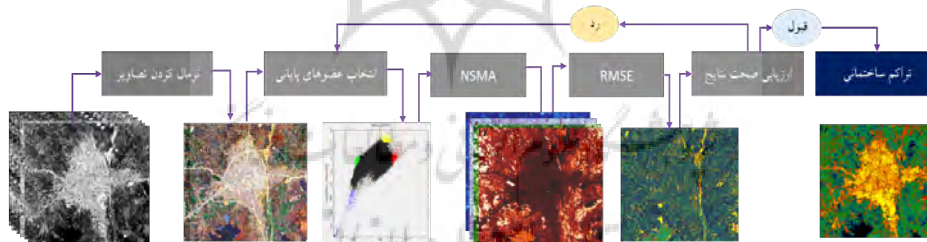
که در آن \bar{R}_b بازتاب نرمال شده باند b در پیکسل است؛ R_b بازتاب اصلی برای باند b است؛ μ متوسط بازتاب برای آن پیکسل؛ و N تعداد کل باندها می‌باشد. پس از نرمال سازی عضوهای پایانی^۲ مناسب با استفاده از نمودار پراکندگی انتخاب شد. پس از نرمال سازی و انتخاب عضوهای پایانی، روش NSMA از روابط (۵ و ۶) محاسبه می‌شود (Wu, 2004: 487).

$$\bar{R}_b = \sum_{i=1}^N \bar{f}_i R_{i,b} + e_b \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \bar{f}_i = 1 \text{ and } \bar{f}_i \geq 0 \quad (6)$$

در اینجا \bar{R}_b بازتاب سطح نرمال شده هر پیکسل در باند b ، $R_{i,b}$ بازتاب سطح نرمال شده از عضو پایانی i در باند b برای آن پیکسل، \bar{f}_i کسر عضو پایانی i و e_b باقی مانده است. برای ارزیابی صحت نتایج مدل NSMA یک تصویر که شامل خطای RMS پیکسل به پیکسل به طور موثر میانگین باقی مانده در تمام باندها است را محاسبه می‌کند. (رابطه ۷):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{N}} \quad (7)$$



شکل (۴) مراحل استخراج تراکم ساخته شده از تصاویر ماهواره ای

۴-۳- شبیه سازی تغییرات کالبدی شهر ساری در سال ۲۰۲۸

^۲ Endmember

• مدلسازی زنجیره مارکف

به منظور شبیه سازی تغییرات کالبدی شهر ساری از مدل ترکیبی زنجیره مارکوف- سلول های خودکار استفاده شد. تحلیل زنجیره مارکوف تغییرات کاربری زمین را از یک دوره به دوره دیگر را بیان کرده و از آن به عنوان پایه ای برای نقشه سازی تغییرات آینده استفاده می کند. شبیه سازی تغییرات کاربری زمین در آینده می تواند بر اساس فرمول احتمالات شرطی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شود:

$$S(t+1) = P_{ij} \times S(t) \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در اینجا $S(t+1)$ وضعیت سیستم در زمان $t+1$ ، $S(t)$ وضعیت سیستم در زمان t و P_{ij} ماتریس احتمال انتقال در یک حالت است که به صورت رابطه (۹) محاسبه می شود (Yang et al, 2014: 2).

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۹)}$$

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

ماتریس احتمال انتقال، احتمال انتقال هر کدام از کاربری ها به کاربری دیگر را نشان می دهد. خروجی های مرحله مدلسازی پتانسیل انتقال به عنوان ورودی های مرحله پیش بینی تغییرات به کار می روند.

• سلول های خودکار

سلول های خودکار یک سیستم دینامیک گسسته است که حالت هر سلول در زمان $t+1$ به وسیله حالت سلول های همسایگی در زمان و مطابق قوانین تبدیل از پیش تعریف شده، تعیین می گردد. در مدل CA دو بعدی، وضعیت هر سلول مورد آزمایش در زمان $T+1$ به وسیله قوانین انتقال، وضعیت همسایگی و وضعیت آن در زمان T مشخص خواهد شد. اگر S_{xij}^t وضعیت سلول x_{ij} در موقعیت i, j در زمان t باشد، S_{xij}^t متعلق به تعداد محدودی (قابل شمارش) از وضعیت های ممکن سلول در فضای سلولی است و اگر S_{xij}^{t+1} وضعیت سلول در زمان $t+1$ باشد فرمول کلی وضعیت سلول در زمان $t+1$ ، در مدل CA دو بعدی به صورت رابطه (۱۰) است (Wolfram, 2018).

$$S_{xij}^{t+1} = (S_{xij}^t, S_{\Omega xij}^t) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که Ω_{xij} نشان دهنده مجموعه سلول ها در همسایگی سلول x_{ij} است و Ω_{xij}^t مجموعه

وضعیت‌های ممکن Ω_{xij} در زمان t و f تابعی است که نشان‌دهنده قوانین انتقال است.

شبیه سازی گسترش کالبدی شهر ساری با CA-Markov

در مدل ترکیبی پس از اجرای مارکوف، CA-MARKOV از جداول مساحت انتقال یافته و تصاویر احتمال شرطی که براساس قوانین انتقال در کاربری اراضی و ایجاد نقشه‌های مطلوبیت آماده‌سازی می‌شوند برای پیش‌بینی تغییرات پوشش زمین در دوره زمانی مورد استفاده در تحلیل زنجیره مارکوف استفاده می‌کند (Akin et al, 2015 ; Nadoushan et al, 2015). در این تحقیق از روش رگرسیون لجستیک برای ایجاد نقشه مطلوبیت استفاده شده است.



شکل (۵) مراحل پیش‌بینی گسترش کالبدی شهر ساری با مدل ترکیبی CA-Markov

۵- نتایج

۵-۱- نتایج گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده شهر ساری

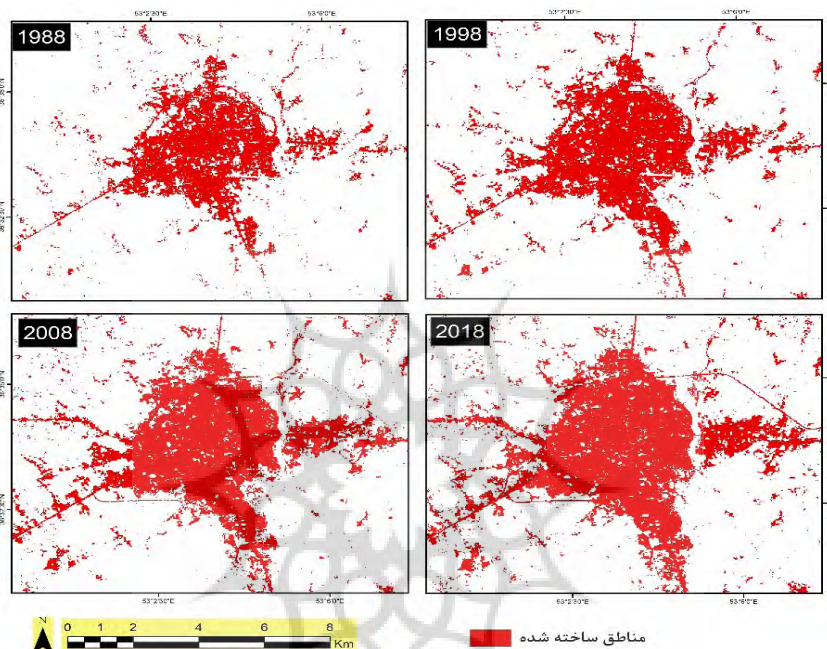
نقشه‌های کاربری/ پوشش زمین و تراکم ساخته شده در دوره زمانی مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شد که نتایج اولیه آن در جدول (۲) آمده است. با توجه به جدول، مساحت مناطق ساخته شده در دوره مورد مطالعه از ۱۷۲۶ هکتار در سال ۱۹۹۸ به ۳۰۷۱ هکتار در سال ۲۰۱۸ رسیده است که این مساحت حدود ۱۳۴۵ هکتار افزایش یافته است. تراکم ساخته شده نیز از ۴۹ درصد در سال ۱۹۸۸ به ۵۶ درصد در سال ۲۰۱۸ رسیده است.

جدول (۲) نتایج اولیه تغییرات کالبدی و تراکم ساخته شده شهر ساری در دوره مورد مطالعه

سال	مساحت ساخته شده (هکتار)	ضریب کاپا	تراکم ساخته شده (درصد)	RMSE
۱۹۸۸	۱۷۲۶	۰/۱۸۹۶	۴۹٪	۰/۰۱۹۳
۱۹۹۸	۲۳۲۷	۰/۹۳۷	٪۵۵	۰/۰۱۷۱
۲۰۰۸	۲۶۰۳	۰/۹۶۱	٪۵۴	۰/۰۱۶۷

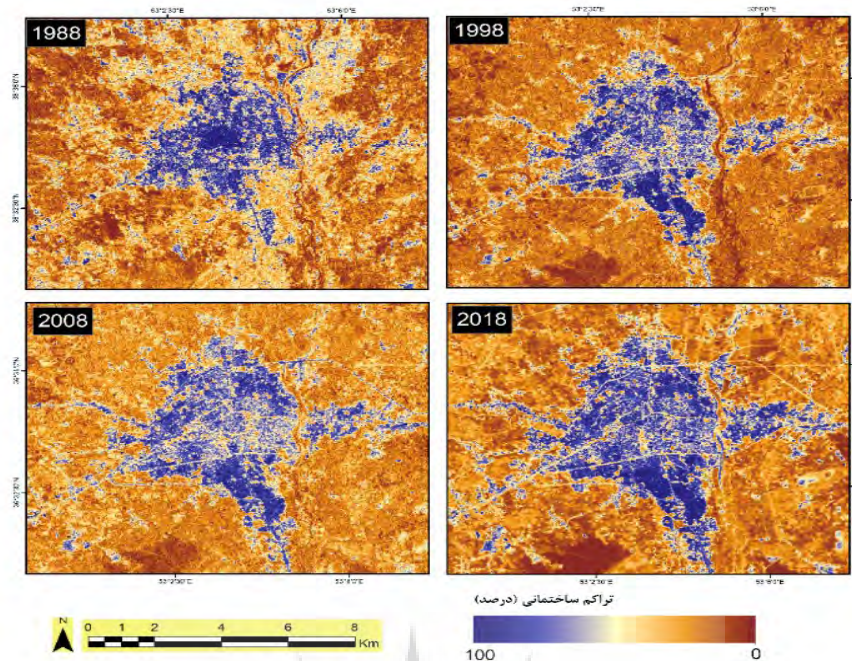
۰/۰۱۵۴	۵۶٪	۰/۹۸۹	۳۰۷۱	۲۰۱۸
--------	-----	-------	------	------

توزیع فضایی مناطق ساخته شده و تراکم ساخته شده در دوره مورد مطالعه در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نمایش داده شده است. به منظور ارزیابی بهتر این تغییرات، در جهات مختلف جغرافیایی مقدار این تغییرات از نظر کالبدی و تراکم ساخته شده محاسبه شد. برای این کار از مرکز شهر به سمت مرزهای منطقه مورد مطالعه، در جهات جغرافیایی چند ضلعی‌هایی ترسیم شد و با استفاده از توابع GIS در هر دوره و برای هر جهت جغرافیایی مقادیر گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده محاسبه شد.

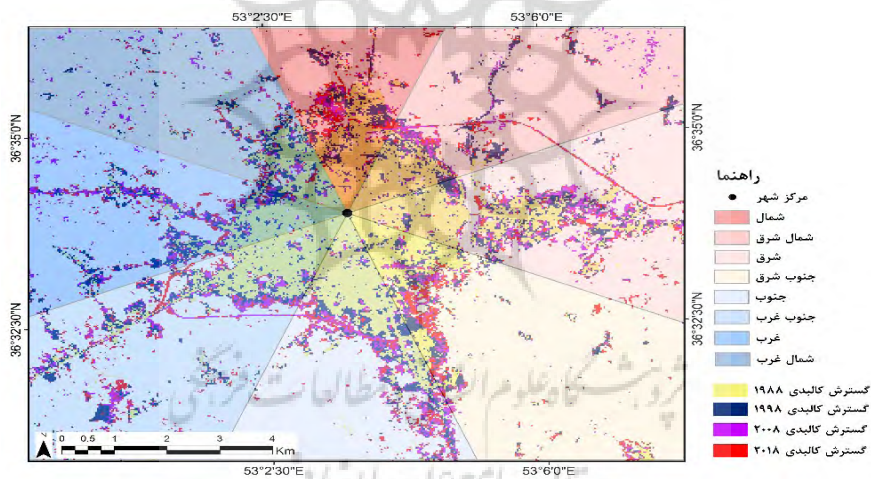


شکل (۶) توزیع فضایی مناطق ساخته شده در دوره مورد مطالعه

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
 رتال جامع علوم انسانی



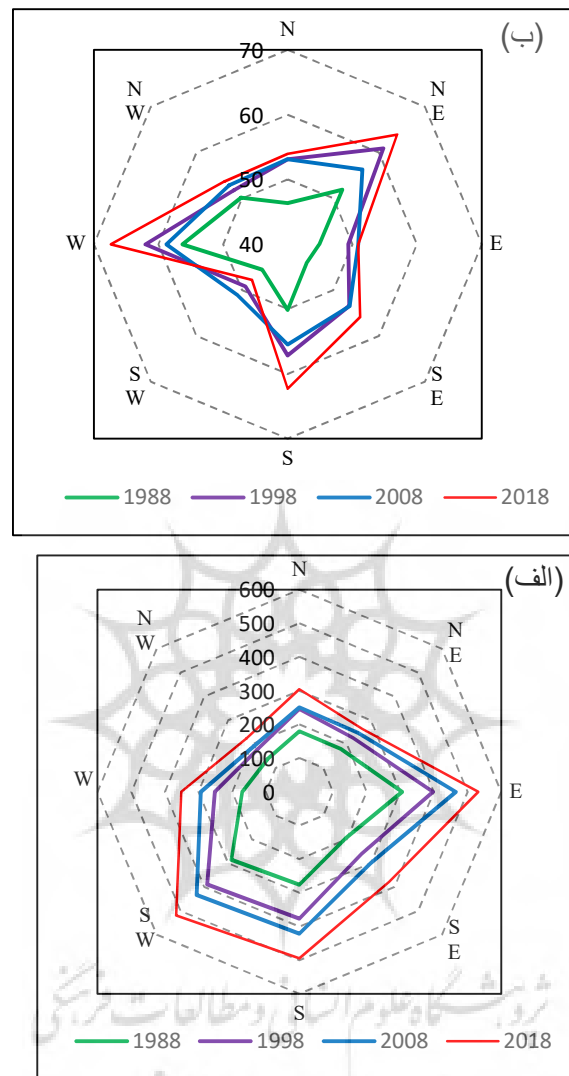
شکل (۷) توزیع فضایی تراکم ساخته شده در دوره مورد مطالعه



شکل (۸) گسترش کالبدی در جهات جغرافیایی مختلف

شکل (۹) نمودار رادار تغییرات کالبدی و تراکم ساخته شده در جهات مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، بیشترین گسترش کالبدی در جهات شرق، جنوب و جنوب غرب شهر ساری اتفاق افتاده است. در این سه جهت بیش از ۲۰۰ هکتار از اراضی، به کاربری ساخته شده تغییر یافته

اند. همچنین بیشترین افزایش تراکم ساخته شده در جهات شمال شرق (افزایش ۱۲ درصد)، جنوب (۱۲ درصد افزایش) و غرب (۱۰ درصد افزایش) مشاهده می شود.

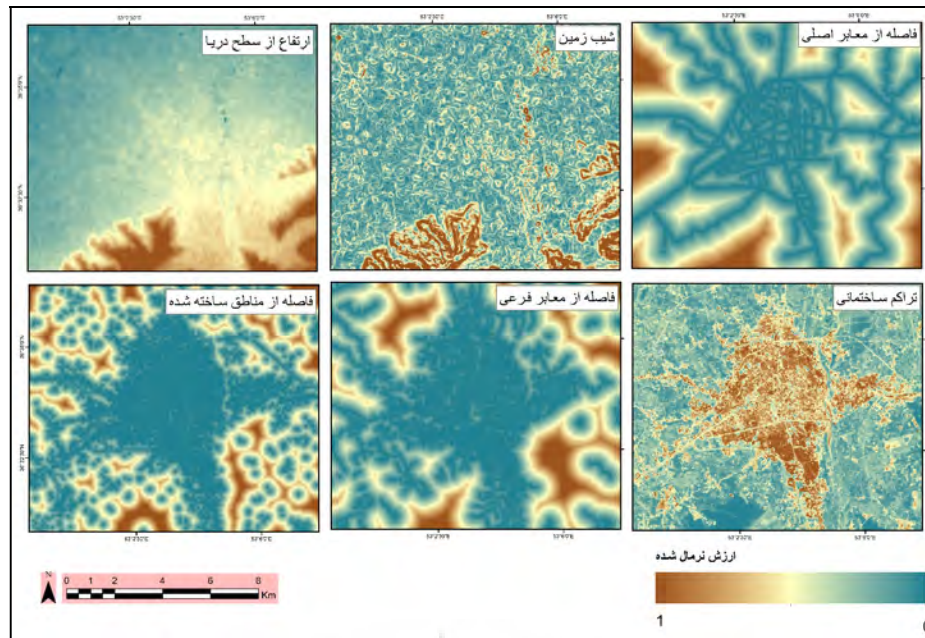


شکل (۹) الف) نمودار رادار تغییرات کالبدی در جهات مختلف، ب) نمودار رادار تغییرات تراکم ساخته شده در جهات مختلف

۵-۲- نتایج شبیه سازی گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده شهر ساری

متغیرهای مستقلی که برای استفاده در مدلسازی گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده آتی شهر ساری مورد استفاده قرار گرفت شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب زمین، فاصله از معابر اصلی،

فاصله از مناطق ساخته شده، فاصله از معابر فرعی و تراکم ساخته شده می‌باشد. ارتفاع در قسمت‌های جنوبی و جنوب غرب شهر ساری بالاتر از سایر مناطق می‌باشد این ارتفاعات در نحوه شکل دهی و کشیدگی قسمت‌های جنوبی شهر ساری تاثیر گذار بوده است. لایه شیب از لایه DEM منطقه به دست آمد. برای ایجاد لایه فاصله از مناطق ساخته شده، از تصویر طبقه بندی شده سال ۲۰۱۸ طبقه ساخته شده جدا شد و فاصله اقلیدسی آن، تا محدوده مورد مطالعه محاسبه شد. لایه فاصله از مناطق ساخته شده از آن جهت می‌تواند مهم باشد که هر اندازه سلولی به سلول ساخته شده نزدیک باشد احتمال تبدیل آن به ساخته شده به علت وجود زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها، بالاتر است. لایه فاصله از معابر اصلی و فرعی به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. معابر اصلی شامل بزرگراه‌ها و خیابان‌های اصلی شهر است و معابر فرعی شامل کوچه‌ها و کوچه خیابان‌ها می‌باشد. جاده‌ها یکی از مهمترین عوامل گسترش مناطق انسان ساز در مناطق شمالی ایران می‌باشد. تراکم ساخته شده به عنوان یک فاکتور مهم و نوآوری در این تحقیق در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که پیکسل‌هایی که دارای تراکم ساخته شده متوسط به بالا هستند، پتانسیل ایجاد تراکم ساخته شده بالا را دارند و پیکسل‌هایی که تراکم متوسط به پایین دارند بیشترین احتمال رشد در آینده را دارند. پیکسل‌های با تراکم بسیار بالا فضای لازم برای توسعه را ندارند و پیکسل‌های با تراکم بسیار پایین مانند جنگل‌ها، باغات و زمین‌های کشاورزی دور دست، تناسب کافی با توسعه آتی شهر ندارند. شکل (۱۰) متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدلسازی گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده شهر ساری را نشان می‌دهد. نتایج اجرای مدل در جدول (۳) آمده است. ارزیابی صحت مدل با استفاده از اجرای مدل در گذشته و مقایسه نتایج در زمان حال صورت گرفت. ضریب کاپا برای هر دو نوع پیش بینی کالبدی و تراکم ساخته شده حدود ۰/۹ بود که مدل را برای پیش بینی آتی مناسب می‌داند. نتایج مدل نشان داد که مساحت مناطق ساخته شده در شهر ساری از ۳۰۷۱ هکتار در سال ۲۰۱۸ به ۴۷۸۷ هکتار در سال ۲۰۲۸ خواهد رسید و میانگین تراکم ساخته شده از ۵۶ درصد به ۶۳ درصد خواهد رسید.

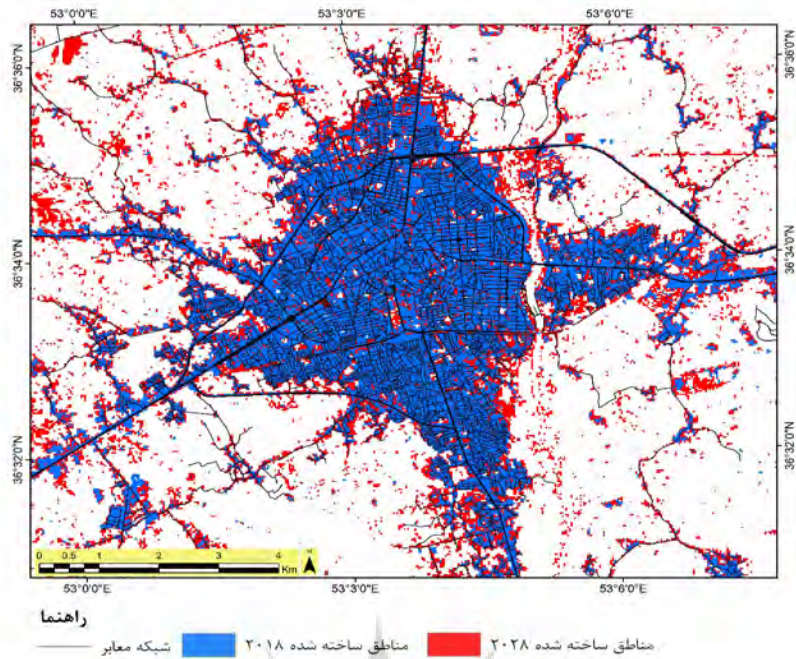


شکل (۱۰) متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل سازی گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده شهر ساری

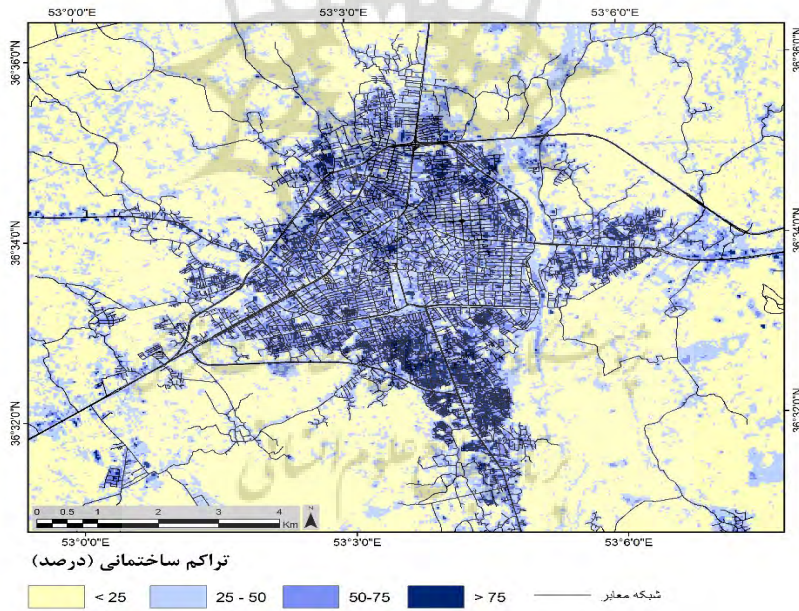
جدول (۳) نتایج اولیه اجرای مدل و پیش بینی گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده در سال ۲۰۲۸

سال	مساحت ساخته شده (هکتار)	ضریب کاپا	تراکم ساخته شده (درصد)	ضریب کاپا
۲۰۲۸	۴۷۸۷	۰/۹۰۷	۶۳٪	۰/۸۹۶

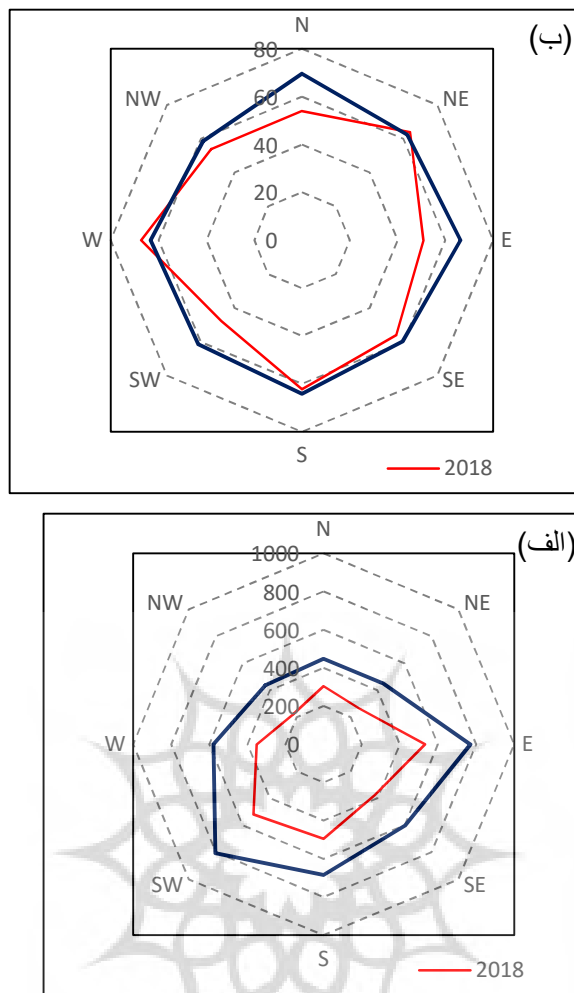
شکل (۱۱) و (۱۲) نقشه توزیع فضایی مناطق ساخته شده و نقشه توزیع تراکم ساخته شده سال ۲۰۲۸ که توسط مدل CA-Markov پیش بینی شده است را نشان می‌دهد. همچنین به منظور ارزیابی بهتر تغییرات گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده در آینده، این تغییرات در جهات مختلف جغرافیایی محاسبه و با نتایج سال ۲۰۱۸ در نمودار رادار (شکل ۱۳) به نمایش در آمد. با توجه به شکل، در جهات جنوب غرب و شرق توسعه کالبدی در حدود ۳۰۰ هکتار خواهد بود که در بقیه جهات این افزایش در حدود ۲۰۰ هکتار می‌باشد. همچنین بیشترین افزایش تراکم ساخته شده در جهات شمال، شرق و جنوب غرب در راستای راه‌های اصلی شهر اتفاق خواهد افتاد.



شکل (۱۱) نقشه توزیع فضایی مناطق ساخته شده سال ۲۰۱۸ با سال ۲۰۲۸ پیش بینی شده توسط مدل CA-Markov



شکل (۱۲) نقشه توزیع فضایی تراکم ساخته شده سال ۲۰۲۸ پیش بینی شده توسط مدل CA-Markov



شکل (۱۳) الف) نمودار رادار تغییرات کالبدی در جهات مختلف، ب) نمودار رادار تغییرات تراکم ساخته شده در جهات مختلف

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

۶- بحث و نتیجه گیری

از جمله نتایج بارز این تحقیق علاوه بر تغییرات عمده کالبدی و تراکم ساخته شده، ارزیابی این تغییرات در جهات جغرافیایی مختلف بود. عملکرد جهات مختلف یک شهر ممکن است به دلیل شرایط طبیعی و انسانی متنوع، متغیر باشد. بنابراین ممکن است یک شهر در دوره‌های مختلف در جهات مختلف دارای عملکردی متفاوت از نظر گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده باشد و در نهایت جهت‌های خاصی گسترش بیشتری نسبت به سایر جهات داشته باشند. نتایج این تحقیق در شهر ساری نیز نشان داد که گسترش کالبدی این شهر بیشتر در جهت‌های شرق، جنوب، جنوب غرب و تا حدودی شمال اتفاق افتاده است و پیش بینی‌ها نشان از گسترش شهر در این جهات را

دارد. این گسترش‌ها بیشتر در راستای راه‌های اصلی ارتباطی شهر ساری رخ داده است. تغییرات تراکم ساخته شده در شهر ساری اندکی متفاوت با گسترش کالبدی است به طوری که جهات شمال شرق، جنوب و غرب افزایش تراکم ساخته شده بالایی را نشان می‌دهند و پیش بینی‌های آینده حاکی از افزایش تراکم ساخته شده در شمال، شرق و جنوب غرب می‌باشد. علت این امر آن است که گسترش شهر در ابتدا موجب کاهش تراکم ساخته شده می‌شود زیرا در ابتدا محله‌هایی که احداث می‌شوند از تراکم پایینی برخوردارند اما به مرور زمان و پس از آنکه این مناطق از حاشیه‌ای بودن خارج شوند، تراکم آن‌ها نیز افزایش خواهد یافت.

یکی از نوآوری‌های این تحقیق استفاده همزمان از از تکنیک‌های پیکسل مبنا و زیر پیکسل برای استخراج گسترش کالبدی و تراکم ساخته شده در شهر ساری و استفاده هر دو نتایج در مدل‌های LCM به منظور بررسی تغییرات و پیش بینی تغییرات می‌باشد. در تحقیقات مشابه مانند صدر موسی و همکاران (۱۳۹۵) و میثاق و همکاران (۱۳۹۷) فقط از روش‌های پیکسل مبنا برای استخراج توسعه کالبدی در دوره‌های مختلف استفاده شده است. یا در تحقیق جمعه زاده و همکاران (۱۳۹۴) از روش زیر پیکسل برای استخراج تراکم ساخته شده استفاده شده است اما نتایج آن در مدل LCM استفاده نشده است و فقط از نتایج به منظور استخراج مناطق ساخته شده و گسترش کالبدی استفاده شده است. استفاده از هر دو رویکرد و تلفیق آن‌ها می‌تواند نتایج بهتری از تغییرات کاربری/ پوشش زمین در مناطق شهری برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر و در نهایت توسعه پایدار داشته باشد.

منابع

- ۱- جمعه‌زاده، بهرام؛ هاشمی، سیروس؛ درویشی بلورانی، علی؛ کیاورز، مجید (۱۳۹۴). کاربرد تجزیه و تحلیل طیف مخلوط نرمال شده NSMA جهت استخراج مناطق ساخته شده شهری و استفاده از آن در شبکه عصبی مصنوعی MLP برای پیش بینی رشد آتی شهر، **فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)**، شماره ۹۶، ۶۵-۷۷.
- ۲- صدرموسوی، میرستار، یزدانی چهاربرج، رسول (۱۳۹۵). ارزیابی و شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین پیرامون شهرها با استفاده از مدل CA-Markov (نمونه موردی: شهر میاندوآب). **نشریه جغرافیا و برنامه ریزی**، شماره ۵۸، ۱۳۹-۱۵۷.
- ۳- مرکز آمار ایران.
- ۴- موسوی، سیده فاطمه، احمدی، حسین، قدوسی، جمال (۱۳۹۳). بررسی اثرات توسعه شهری بر رفتار هیدرولوژیکی (مطالعه موردی شهر ساری). **بیست و یکمین همایش ملی ژئوماتیک**.
- ۵- میثاق، نورالدین، سامانی، نجمف، تومانیان، آرا (۱۳۹۷). شبیه‌سازی رشد شهری تبریز با استفاده از مدل CA-Markov و تصمیم‌گیری چندمعیاره. **پژوهش‌های جغرافیای انسانی**، شماره ۱، ۲۱۷-۲۳۱.
- 6- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, 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**, 59, 65-78.
- 7- Akin, A., Sunar, F., & Berberoğlu, S. (2015). Urban change analysis and future growth of Istanbul. **Environmental Monitoring and Assessment**, 187(8), 506.
- 8- Alsharif, A. A., & Pradhan, B. (2014). Urban sprawl analysis of Tripoli Metropolitan city (Libya) using remote sensing data and multivariate logistic regression model. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, 42(1), 149-163.
- 9- Ewing, R., Meakins, G., Hamidi, S., & Nelson, A. C. (2014). Relationship between urban sprawl and physical activity, obesity, and morbidity—update and refinement. **Health & place**, 26, 118-126.
- 10- Garrido-Cumbrera, M., Ruiz, D. G., Braçe, O., & Lara, E. L. (2018). Exploring the association between urban sprawl and mental health. **Journal of Transport & Health**. 10: 381-390.
- 11- Ghosh, P., Mukhopadhyay, A., Chanda, A., Mondal, P., Akhand, A., Mukherjee, S., ... & Hazra, S. (2017). Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling-A review. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 5, 64-77.
- 12- Guo, C., Buchmann, C. M., & Schwarz, N. (2017). Linking urban sprawl and income segregation—Findings from a stylized agent-based model. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, 2399808317719072.
- 13- Hennig, E. I., Schwick, C., Soukup, T., Orlitová, E., Kienast, F., & Jaeger, J. A. (2015). Multi-scale analysis of urban sprawl in Europe: Towards a European de-sprawling strategy. **Land Use Policy**, 49, 483-498.

- 14- Kazemzadeh-Zow, A., Zanganeh Shahraki, S., Salvati, L., & Samani, N. N. (2017). A spatial zoning approach to calibrate and validate urban growth models. **International Journal of Geographical Information Science**, 31(4), 763-782.
- 15- Kohler, M., Tannier, C., Blond, N., Aguejda, R., & Clappier, A. (2017). Impacts of several urban-sprawl countermeasures on building (space heating) energy demands and urban heat island intensities. A case study. **Urban Climate**, 19, 92-121.
- 16- Liu, T., & Yang, X. (2015). **Land Change Modeling: Status and Challenges**. In Monitoring and Modeling of Global Changes: A Geomatics Perspective (pp. 3-16). Springer, Dordrecht.
- 17- Mather, P., & Tso, B. (2016). **Classification methods for remotely sensed data**. CRC press.
- 18- Morote, Á. F., & Hernández, M. (2016). Urban sprawl and its effects on water demand: A case study of Alicante, Spain. **Land Use Policy**, 50, 352-362.
- 19- Nadoushan, M. A., Soffianian, A., & Alebrahim, A. (2015). Modeling land use/cover changes by the combination of Markov chain and cellular automata Markov (CA-Markov) models. **Journal of Earth, Environment and Health Sciences**, 1(1), 16.
- 20- Navamuel, E. L., Morollón, F. R., & Cuartas, B. M. (2018). Energy consumption and urban sprawl: Evidence for the Spanish case. **Journal of Cleaner Production**, 172, 3479-3486.
- 21- Rahman, M. T. (2016). Detection of land use/land cover changes and urban sprawl in Al-Khobar, Saudi Arabia: An analysis of multi-temporal remote sensing data. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 5(2), 15.
- 22- Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Wang, N., & Lin, Y. (2017). Monitoring and modeling of spatiotemporal urban expansion and land-use/land-cover change using integrated markov chain cellular automata model. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 6(9), 288.
- 23- Scott, D., Kristiansen, S. M., Lichtenberger, A., & Raja, R. (2018). **100 years of remote sensing and urban sprawl: Multi-temporal, multi-sensor mapping of a historic city in the Middle East**. Pnas.
- 24- Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., ... & Paustian, K. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. **Global Change Biology**, 22(3), 1008-1028.
- 25- Wolfram, S. (2018). **Cellular automata and complexity: collected papers**. CRC Press.
- 26- Wu, C. (2004). Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. **Remote Sensing of Environment**, 93(4), 480-492.
- 27- Yang, X., Zheng, X. Q., & Chen, R. (2014). A land use change model: Integrating landscape pattern indexes and Markov-CA. **Ecological Modelling**, 283, 1-7.