



## بررسی روند تغییرات کاربری اراضی شهری ری با استفاده از داده های سنجش از دور

سارا فروتن<sup>۱\*</sup>، محمود شریعت<sup>۲</sup>، میر مسعود خیرخواه زرکش<sup>۳</sup>، رحیم سرور<sup>۴</sup>

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران
- ۲- استاد، گروه علوم محیط زیست، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران
- ۳- دانشیار، گروه GIS، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران
- ۴- استاد، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران

### چکیده

شهر ری، در دهه‌های اخیر رشد بی‌سابقه‌ای در شهرنشینی داشته که منجر به تغییرات شدیدی در کاربری اراضی منطقه شده است. از این رو هدف از این مقاله بررسی تغییرات مساحت کاربری اراضی شهر ری در طی سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵ با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره لندست و IRS است. با طبقه‌بندی نظارت شده و نظارت نشده تصاویر ماهواره‌ای نهایتاً ۴ کاربری اراضی ساخته شده شهری، زمین‌های کشاورزی، فضای سبز و زمین‌های بایر استخراج شد. لایه‌های کاربری اراضی به صورت دو به دو مقایسه شد و میزان تغییرات کاربری اراضی استخراج شد. نتایج نشان داد که کاربری اراضی ساخته شده شهری و فضای سبز شهری به ترتیب ۳۶۹/۷ و ۵۵/۶ هکتار افزایش و زمین‌های کشاورزی و زمین‌های بایر به ترتیب ۲۱۳/۸ و ۲۱۱/۵ هکتار کاهش داشته‌اند. رشد مناطق مسکونی طی دوره ۶ ساله ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۵ در مجموع با ۲۱۲/۷ هکتار از سرعت بیشتری نسبت به دوره ۱۲ ساله ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۹ با ۱۵۷ هکتار تغییر برخوردار بوده است. برای تعیین میزان خسارات محیط زیستی ناشی از تغییر غیراصولی کاربری‌های اراضی منطقه در دوره زمانی مورد بررسی، از ماتریس مقایسه زوجی کاربری‌ها استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد تبدیل زمین‌های بایر، کشاورزی و فضای سبز شهری به زمین‌های مسکونی با مقادیر ۴۴/۶۵، ۴۲/۴۴ و ۱۴/۸۵ از شدت خسارت محیط زیستی بالایی برخوردارند. تغییر کاربری به‌ویژه از بین رفتن پوشش گیاهی، تاثیر منفی بر روی سیمای سرزمین گذاشته است.

کلید واژه‌ها: تصاویر ماهواره‌ای، تغییر، توسعه شهری، خسارت محیط زیستی



## Investigation of the trend of land use changes in Rey city using remote sensing data

Sara Foroutan<sup>\*1\*</sup>, Mahmoud Shariat<sup>2</sup>, MirMasoud kheirkhah Zarkesh<sup>3</sup>, Rahim Sarvar<sup>4</sup>

1- MSc Graduated, Faculty of Environment and Energy, Azad University, Science and Research Branch, Tehran

2- Professor, Department of Environmental Sciences, Azad University, Science and Research Branch, Tehran

3- Associate Professor, Department of GIS, Azad University, Science and Research Branch, Tehran

4- Professor, Department of Geography and Urban Planning, Azad University, Science and Research Branch, Tehran

### Abstract

Rey city has experienced unprecedented urban growth in recent decades that leading to drastic changes in the land use of the region. Therefore, the purpose of this article was to investigate the changes in land use area of Rey city during the years 1988 to 2006 using aerial photographs and satellite images of Landsat and IRS. With supervised and unsupervised classification of the satellite images, 4 land uses types including urban lands, agricultural lands, green spaces and barren lands were extracted. Land use layers were compared in pairs and the rate of land use changes was extracted. The results showed that urban land use made and urban green space have increased 369.7 and 55.6 hectares, respectively, and agricultural lands and barren lands have decreased 213.8 and 211.5 hectares, respectively. The growth of residential areas during a period of 6 years from 2000 to 2006 totally with 212.7 hectares has been faster changed than a period of 12 years from 1988 to 2000 with 157 hectares. A pairwise comparison matrix of land uses was used to determine the amount of environmental damages caused by unprincipled changes in the region land uses in the studying period. The results show that the conversion of barren lands, agriculture and urban green space into residential lands with the amounts 44.65, 42.44 and 14.85 causes high degree of environmental damages. Land use change, especially the loss of vegetation, has a negative impact on the landscape.

**Keywords:** Satellite images, Change, Urban development, Environmental damages

\* Corresponding author E-mail address: [sarah.foroutan.env@gmail.com](mailto:sarah.foroutan.env@gmail.com)

## مقدمه

تراکم رشد جمعیت و تغییرات فعالیت‌های اقتصادی به عنوان عواملی هستند که موجب تغییر کاربری اراضی در نواحی شهری می‌گردد (پرابو و دار<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸). گسترش سکونت انسان و فعالیت آن در محیط شهری موجب بروز تغییرات عمده‌ای در الگوهای کاربری اراضی در نواحی شهری شده است (ونگ<sup>۲</sup>، ۲۰۰۱؛ دنگ<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۹). این تغییرات در ساختار کاربری اراضی بر روی شرایط اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی تأثیر می‌گذارد (موندیا و آنیا<sup>۴</sup>، ۲۰۰۵). به طور تقریبی ۵۴ درصد از جمعیت جهان در نواحی شهری زندگی می‌کنند. تخمین‌زده شده است که ادامه شهرنشینی تا سال ۲۵۰ در حدود ۲/۵ میلیارد به جمعیت نواحی شهری جهان اضافه خواهد کرد که ۹۰ درصد این افزایش در کشورهای آسیایی و آفریقایی متمرکز خواهد بود (ماسر<sup>۵</sup>، ۲۰۰۱؛ یونایتد نیشنز<sup>۶</sup>، ۲۰۱۲)، این درحالی‌که به ترتیب ۴۰ و ۴۸ درصد جمعیت آفریقا و آسیا در مناطق شهری سکونت دارند، پیش‌بینی شده است که جمعیت نواحی شهری در این دو قاره ۵۶ و ۶۴ درصد تا سال ۲۰۵۰ افزایش پیدا می‌کند (یونایتد نیشنز، ۲۰۱۵).

از این‌رو گردآوری اطلاعات در خصوص تغییرات کاربری اراضی در سال‌های اخیر برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر نواحی شهری در توسعه پایدار ضروری است (راوات<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۳؛ رامچاندرا<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از نتایج تحلیل‌های تغییرات کاربری اراضی می‌تواند برای برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌مداران بسیار مفید قلمداد گردد تا از این طریق بحران‌های ناشی از رشد سریع نواحی شهری را حل کنند. همچنین گردآوری پایگاه داده مکانی از تغییرات کاربری اراضی، درک شدت این تغییرات و تبدیل زمین به کاربری‌های دیگر نیز در مدیریت و برنامه‌ریزی محیط زیست حائز اهمیت زیادی است (پرابو و دار، ۲۰۱۸).

تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی اطلاعات اساسی برای مطالعه منابع زمینی را در اختیار می‌گذارد. تحلیل تغییرات کمی سطحی کره زمین به دلیل خروجی مفید آن در برنامه‌ریزی مناسب برای توسعه زیرساخت‌ها و رشد اقتصادی و صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار است (کومار و خان<sup>۹</sup>، ۲۰۱۸). از طرفی فناوری‌های سنجش از دور<sup>۱۰</sup> و GIS<sup>۱۱</sup> به طور مؤثری در مطالعات شهری به منظور مطالعه پویایی رشد و ساختار آن کاربرد دارد (بیللا<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۳؛ بولکا<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین استفاده از تحلیل‌های سنجش از دور و GIS درک ارزشمندی از تغییرات کاربری اراضی در نواحی شهری بوجود می‌آورد.

مطالعاتی در داخل و خارج کشور در زمینه آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از GIS و سنجش از دور انجام گرفته است. از جمله فارسی و یوسفی (۱۳۹۲)، حیدریان و همکاران (۱۳۹۲)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۴)، سبزقبایی و همکاران (۱۳۹۶)، مجرد و کمانرودی (۱۳۹۷) و خوش‌لهجه و همکاران (۱۳۹۸) آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی مناطق مطالعاتی را با استفاده از روش‌های مختلف سنجش از دور انجام دادند و اظهار رضایت کردند. علاوه بر این کومار و خان (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای از GIS و سنجش از دور برای بررسی تغییرات کاربری اراضی شهر مادورای در ایالت تامیل‌نادو هند استفاده کردند. بدین منظور، طبقات مختلف کاربری اراضی به همراه تغییرات مکانی و زمانی آنها طی یک دوره هفت‌ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۹) با استفاده از تصاویر لندست مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعه آنها نشان داد ناحیه مسکونی شهری از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۶ به میزان ۱۷/۰۹ درصد افزایش داشته است. در مطالعه‌ای دیگر با عنوان شناسایی رشد نواحی نیمه‌شهری در شهرهای کوچک و بزرگ، شاو و داس (۲۰۱۷) با استفاده از GIS و سنجش از دور به بررسی افزایش مساحت نواحی شهری طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نتایج حاصل تحلیل مکانی تصاویر ماهواره‌ای لندست نشان داد نواحی شهری مالدا بنگال غربی در هند طی ۲۸ سال گذشته در حدود ۳۰ درصد افزایش رشد داشته است.

شهر ری با توجه به جایگاه ویژه‌ای که در میان سایر مناطق کلانشهر تهران دارد، در دهه‌های اخیر رشد بی‌سابقه‌ای را در شهرنشینی تجربه نموده که منجر به تغییرات شدیدی در اطراف آن به ویژه در اراضی کشاورزی و باغ‌ها گردیده است. این رشد سریع شهر و تغییرات ایجاد شده در انواع پوشش اراضی، نیاز به آشکارسازی تغییرات برای برنامه‌ریزی صحیح جهت حفظ منابع موجود را آشکار می‌نماید.

1 - Prabu &amp; Dar

2 - Weng

3 - Deng

4 - Mundia &amp; Aniya

5 - Masser

6 - United Nations

7 - Rawat et a

8 - Ramachandra

9 - Kumar &amp; Khan

10-Remote Sensing

11 -Geographic Information System

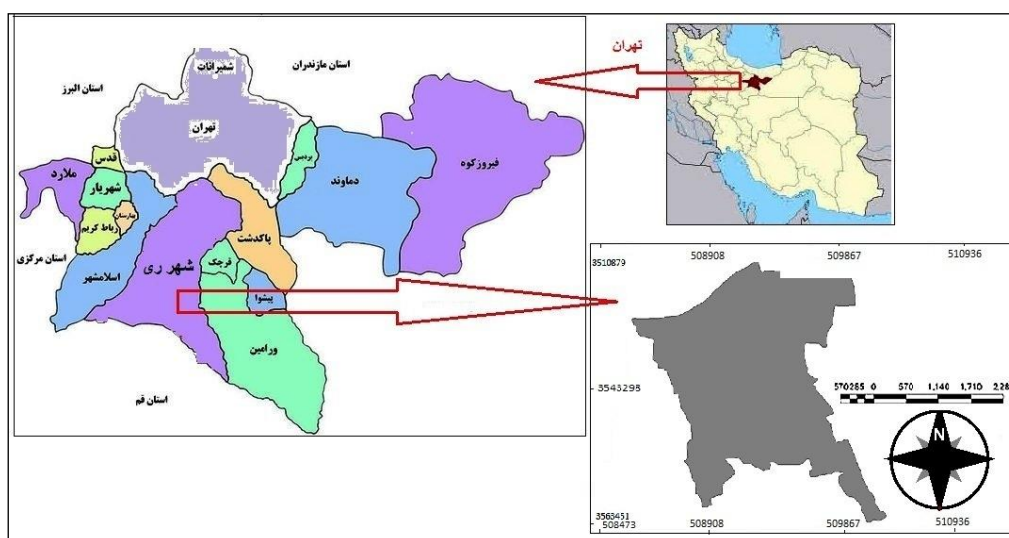
12 - Billa

13 -Bolca

هدف مطالعه حاضر تعیین تغییرات مساحت کاربری‌های اراضی شهر ری در طول سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵ شده و میزان خسارات محیط زیستی ناشی از تغییر غیراصولی کاربری‌های منطقه است. در این مطالعه علاوه بر آشکارسازی تغییرات کاربری، میزان خسارت ناشی از کاربری‌های غیراصولی نیز برآورد می‌شود.

### مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی شامل شهر ری (منطقه ۲۰ شهرداری تهران)، بین مختصات جغرافیایی  $35^{\circ} 34' 58.8''$  شمالی و  $51^{\circ} 25' 51.6''$  شرقی واقع شده است. آب و هوای شهر ری معتدل و خشک است. حداکثر درجه حرارت در تابستان ۴۲ درجه سانتی‌گراد بالای صفر و حداقل در زمستان به ۹- درجه سانتی‌گراد زیر صفر می‌رسد. میزان باران سالیانه شهر ری به‌طور متوسط ۲۵۰ میلی‌متر است. شهر ری دارای جنگل طبیعی نیست و جنگل دست کاشت آن بالغ بر ۳۸۷ هکتار است. اما از نظر مرتع نسبتاً غنی است. ارتفاع منطقه مطالعاتی حدود ارتفاع ۱۱۸۰ متر از سطح دریا بوده است. جمعیت این منطقه بر اساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۰ برابر ۳۷۸۴۴۵ نفر، مساحت آن ۲۹۹۶ کیلومتر مربع است. همچنین این منطقه دارای ۵ ناحیه داخل محدوده شهری و ۲ ناحیه خارج محدوده و ۲۲ محله است. مرز محدوده مطالعاتی در این پژوهش مربوط به نقشه حریم مناطق کلانشهر تهران در سال ۱۳۹۲ با وسعت حدود ۲۲/۸ کیلومتر مربع در برگیرنده ۵ ناحیه شهری (نواحی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵) است (شکل ۱).



شکل ۱: نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی (منبع: سالنامه آماری استان تهران، ۱۳۸۵)

### روش پژوهش

در این تحقیق در ابتدا سه سری عکس هوایی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در سال‌های ۱۳۳۴، ۱۳۶۸، ۱۳۷۹، چهار سری تصاویر ماهواره‌ای از سنجنده‌های TM، MSS، ETM از ماهواره لندست و سنجنده LISS، PAN از ماهواره IRS مربوط به سال‌های ۱۳۶۷ (۱۹۸۸)، ۱۳۷۹ (۲۰۰۰) و ۱۳۸۵ (۲۰۰۶) تهیه شد.

به منظور پیش پردازش عکس‌ها و تصاویر، ابتدا عکس‌های هوایی اسکن شدند و با استفاده از نقاط کنترل زمینی تصحیح هندسی و در نهایت زمین مرجع گردیدند. به منظور حذف و به حداقل رساندن تأثیرات اتمسفری از روش Cost در نرم‌افزار PCI Geomatica استفاده شد. سپس از بسط خطی تباین برای بارزسازی تصاویر موجود استفاده شد. برای ساختن بهترین تصاویر رنگی کاذب از شاخص OIF<sup>۱</sup> جهت شناسایی مناسبترین باندها با حداقل همبستگی و حداکثر واریانس در نرم‌افزار ENVI بهره گرفته شد. همچنین جهت طبقه‌بندی تصاویر نیز از روش هیبرید که تلفیقی از طبقه‌بندی نظارت شده<sup>۲</sup> و نظارت نشده<sup>۳</sup> است، استفاده گردید. در ابتدا طبقه‌بندی نظارت‌نشده جهت شناخت کلی کلاس‌های پوشش زمین و تعیین نمونه‌های تعلیمی<sup>۴</sup> اجرا شد. سپس بر اساس نتایج حاصل از طبقه‌بندی نظارت‌نشده

1- Optimal Index Factor

2 -Supervised Classification

3 - Unsupervised Classification

4 -Training Samples

و نیز انجام نمونه برداری های میدانی و کاربرد GPS و همچنین استفاده از تصاویر ماهواره ای کوئیک برد<sup>۱</sup> بزرگ مقیاس قابل دسترس توسط نرم افزار تحت وب گوگل ارث، اقدام به تعیین نمونه های تعلیمی برای کلاس های مورد انتظار گردید به طوری که حداقل ۵ نمونه تعلیمی با مساحت بالای ۱۰ هکتار برای هر کلاس تعیین گردید که پس از اجرای مراحل آماری مختلف وارد محیط نرم افزار شدند. در نهایت در آخرین گام اقدام به اجرای طبقه بندی نظارت شده به روش حداکثر احتمال<sup>۲</sup> به طور جداگانه برای هر تصویر گردید و نقشه کاربری اراضی اولیه برای هر تصویر استخراج گردید.

پس از پایان مراحل طبقه بندی تصاویر، ارزیابی صحت مربوط به هر تصویر با استفاده از تعیین حدود ۲۰۰ نقطه به صورت نمونه گیری لایه ای تصادفی<sup>۳</sup> و کاربرد تصاویر بزرگ مقیاس ماهواره کوئیک برد قابل دسترس توسط نرم افزار تحت وب گوگل ارث و همچنین کاربرد GPS در مطالعات میدانی محاسبه شده و ماتریس دقت برای هر تصویر تشکیل گردید. فرمول ضریب کاپای استفاده شده برای ارزیابی

$$k = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2}$$

صحت به این صورت است:

در آخرین مرحله لایه های کاربری اراضی تهیه شده از تصاویر ماهواره ای مربوطه با استفاده از تابع RESAMPLE از نظر اندازه پیکسل همه به ابعاد ۳۰ متر تبدیل شد.

برای آشکارسازی تغییرات بعد از حصول اطمینان از دقت قابل قبول تصاویر نهایی کاربری اراضی، لایه های کاربری اراضی تهیه شده به صورت ماتریسی و دو به دو در محیط نرم افزار ادیسی با استفاده از روش Cross Tabulation مورد مقایسه قرار گرفته و جداول و نقشه های تغییرات کاربری اراضی استخراج گردیدند. بدین منظور، با مقایسه نقشه کاربری اراضی هر سال با نقشه کاربری اراضی سال بعد ماتریس تغییرات تهیه شد. در این مرحله ابتدا تصویر کاربری اراضی سال ۱۹۸۸ با تصویر کاربری اراضی سال ۲۰۰۰ مقایسه و نقشه تغییرات کاربری اراضی برای دوره زمانی ۱۲ ساله تولید شد. سپس نقشه تغییرات سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶ در بازه زمانی ۶ ساله و در نهایت نقشه تغییرات بین سال های ۱۹۸۸ و ۲۰۰۶ در دوره زمانی ۱۸ ساله تهیه گردید.

به منظور تعیین میزان خسارات زیست محیطی ناشی از تغییر غیراصولی کاربری طبیعی اراضی در دوره زمانی مورد بررسی، از روش تحلیل سلسله مراتبی<sup>۴</sup> (AHP) استفاده گردید. در این مطالعه ابتدا ۶ لایه کاربری در قالب پرسشنامه ای به منظور مقایسه دو به دو، در اختیار ۱۹ نفر از کارشناسان و اساتید متخصص در مباحث تنوع زیستی و آلودگی های محیط زیست قرار داده شد و از آنها خواسته شد تا در مقایسه هر یک از لایه های کاربری با یکدیگر از دامنه اعداد ۱ (کمترین ارجعیت) تا ۹ (بیشترین ارجعیت) استفاده کنند. جدول (۱) نحوه امتیازدهی لایه های کاربری در ماتریس مقایسه زوجی را نشان می دهد. در ادامه نظرات کارشناسان گردآوری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و میانگین نظرات کارشناسان مبنای قضاوت در این مطالعه قرار گرفت. در نهایت وزن اولیه هر یک از لایه های کاربری و همچنین ضریب ناسازگاری<sup>۵</sup> قضاوت ها با استفاده از نرم افزار اکسپرت چویس<sup>۶</sup> محاسبه شد. به این ترتیب چنانچه مقدار نرخ ناسازگاری ماتریس ها کوچکتر از ۰/۱ باشد، در این صورت سازگاری سیستم قابل قبول است. در غیر این صورت باید در مواردی که ناسازگاری شدید است در قضاوت ها تجدیدنظر نمود (مالزسکی<sup>۷</sup>، ۱۹۹۹). در گام آخر از ضرب وزن اولیه (ضریب خسارت) هر یک از لایه های کاربری در مقدار مساحت تغییر کاربری طی دوره ۱۸ ساله (۸۵-۱۳۶۷)، وزن نهایی (شدت خسارت) و اهمیت هر یک از لایه های کاربری به دست آمد.

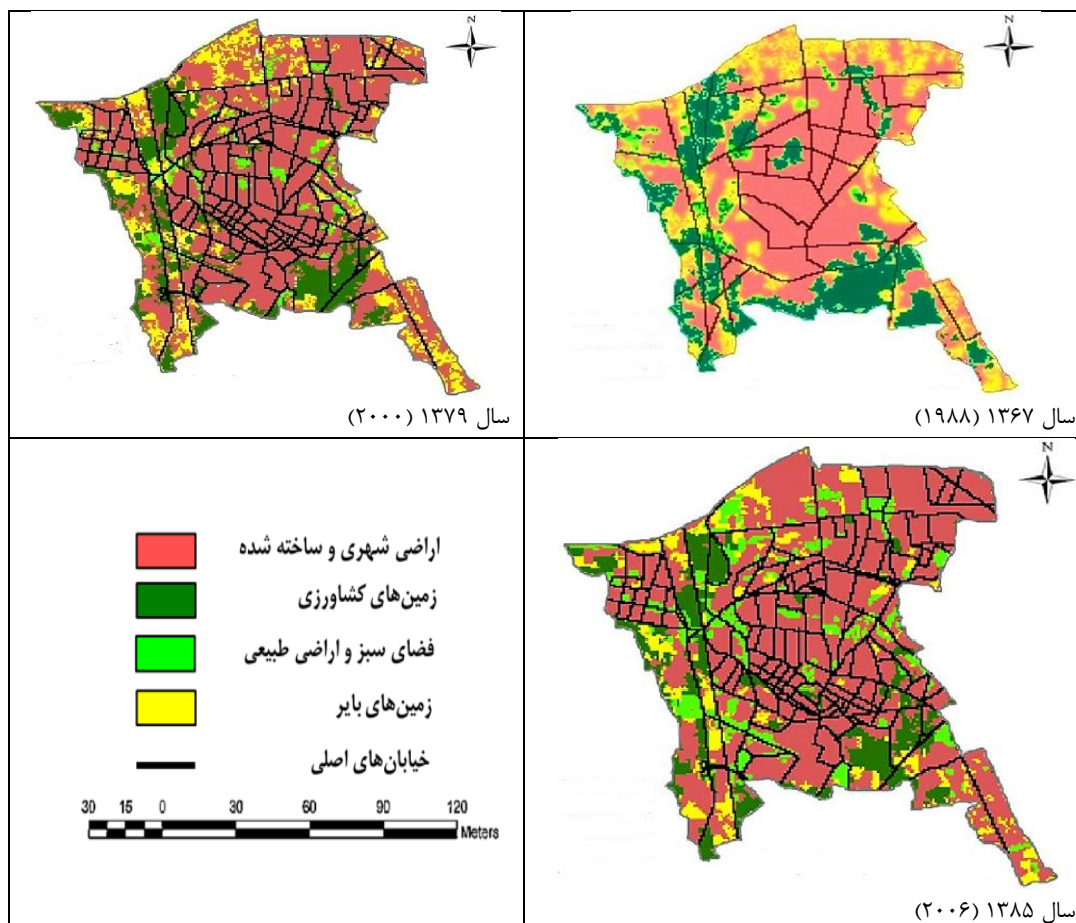
جدول ۱: نحوه امتیازدهی لایه های کاربری در ماتریس مقایسه زوجی (منبع: ساعتی<sup>۸</sup>، ۱۹۸۰)

ارزش عددی معادل ارزش نظری	ارزش نظری بر مبنای مقایسه بین دو معیار	دارای ارزش یکسان و برابر
۱	Equal Preference	ارزش یکی نسبت به دیگری کمی بیشتر است
۳	Weak Preference	ارزش یکی نسبت به دیگری بیشتر است
۵	Strong Preference	ارزش یکی نسبت به دیگری مسلماً بیشتر است
۷	Demonstrated Preference	ارزش یکی نسبت به دیگری مطلقاً بیشتر است
۹	Absolute Preference	ارزش یکی نسبت به دیگری مطلقاً بیشتر است
۲، ۴، ۶، ۸	Intermediate Values	ارزش های بینابین

- 1- Quickbird
- 2 -Maximum Likelihood
- 3- Stratified Random
- 4 -Analytic Hierarchy Process
- 5 -Consistency Ratio
- 6 -Expert Choice
- 7 - Malczewski
- 8 - Saati

یافته‌های پژوهش

پس از اجرای مراحل مختلف پردازش داده‌های ماهواره‌ای، نقشه‌های کاربری اراضی در دوره‌های زمانی مورد بررسی در ۴ طبقه اراضی شهری و مسکونی، زمین‌های کشاورزی، اراضی طبیعی و فضای سبز و زمین‌های بایر استخراج شد (شکل ۲).



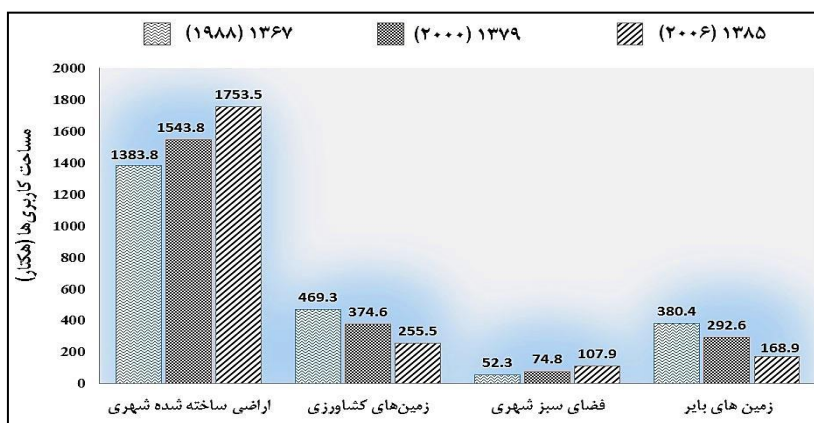
شکل ۲: نقشه کاربری اراضی شهر ری در دوره‌های مختلف

نتایج صحت‌سنجی تصاویر استفاده شده در این پژوهش در جدول ۲ آمده است. مساحت کلاس‌های تعیین شده در نقشه‌های کاربری اراضی شهر ری مربوط به سال‌های ۱۳۶۷ (۱۹۸۸)، ۱۳۷۹ (۲۰۰۰)، ۱۳۸۵ (۲۰۰۶) در شکل (۳) ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج صحت‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای منطقه مطالعاتی (منبع: نگارندگان)

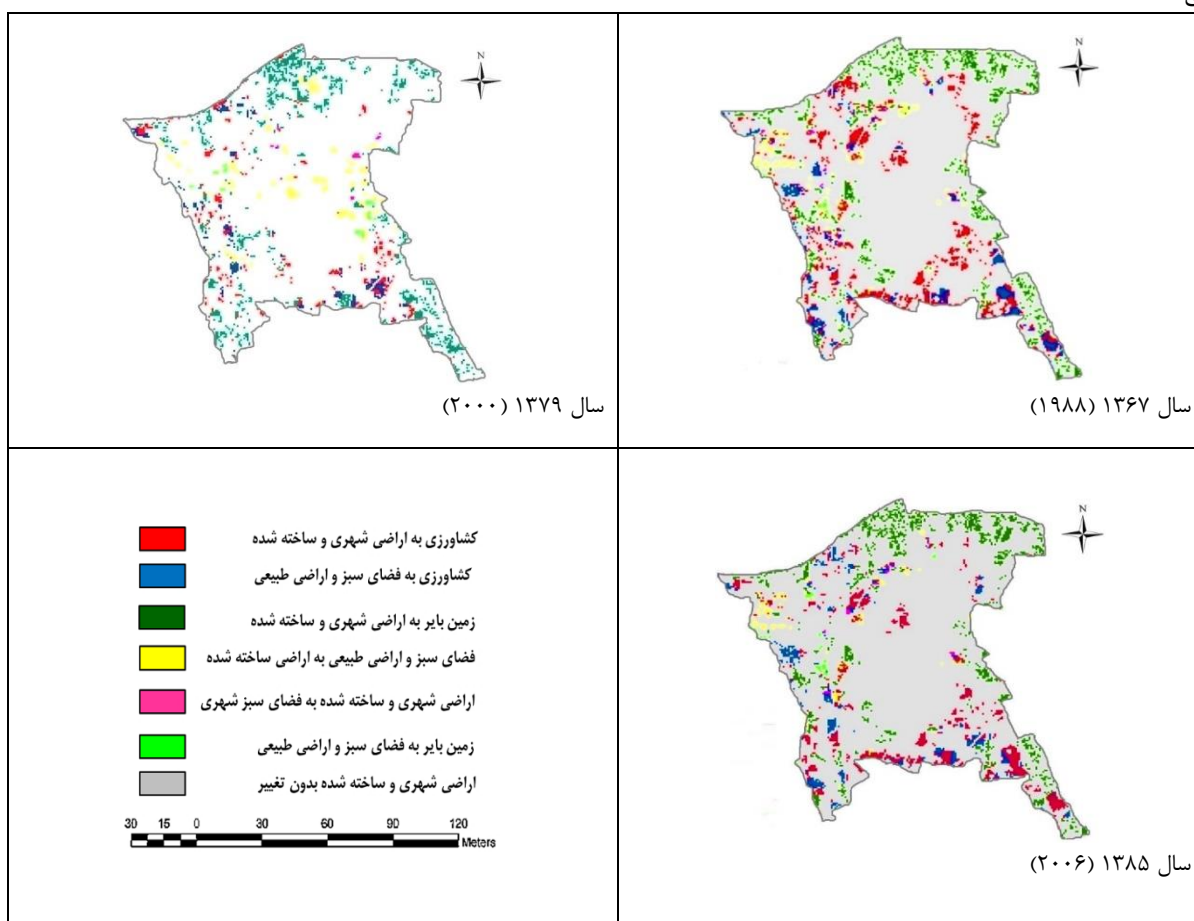
۲۰۰۶		۲۰۰۰		۱۹۸۸		طبقه کاربری
صحت تولید کننده	صحت کاربر	صحت تولید کننده	صحت کاربر	صحت تولید کننده	صحت کاربر	
۸۵/۶۵	۸۳/۸۸	۸۳/۳۲	۸۱/۱۱	۷۹/۱۹	۷۵/۰۵	شهری و مسکونی
۸۶/۰۶	۸۵/۷۴	۸۹/۴۹	۸۵/۹۴	۸۸/۶۶	۸۶/۱۶	فضای سبز
۹۰/۹۶	۸۷/۰۰	۸۷/۱۷	۸۰/۱۶	۸۵/۰۵	۸۵/۰۵	کشاورزی
۷۹/۱۹	۷۵/۰۵	۸۱/۱۱	۸۶/۱۶	۷۱/۱۴	۷۶/۳۳	زمین‌های بایر
۸۶/۷۶		۸۵/۱۲		۸۴/۰۱		صحت کلی
۰/۸۳		۰/۸۳		۰/۸۰		ضریب کاپا





شکل ۳: نمودار مساحت کلاس های کاربری اراضی شهری در سال های مختلف به هکتار

پس از تهیه نقشه های کاربری اراضی مربوط به دوره های زمانی مورد بررسی، این نقشه ها به صورت دو به دو با استفاده از تابع Cross Tabulation مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴) تغییرات کاربری اراضی را در محدوده مطالعاتی طی سال های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵ نشان می دهد.



شکل ۴: نقشه تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۶۷ - ۱۳۸۵

در ادامه میزان تغییر کاربری های مختلف به اراضی ساخته شده شهری و فضای سبز شهری مورد توجه قرار گرفته و نتایج به ترتیب در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است.

جدول ۳: میزان تبدیل کاربری‌های مختلف به اراضی شهری و مسکونی در دوره‌های مختلف به هکتار

نوع کاربری اراضی	دوره ۱۳۶۷-۷۹ (۱۹۸۸-۲۰۰۰)	دوره ۱۳۷۹-۸۵ (۲۰۰۰-۲۰۰۶)	دوره ۱۳۶۷-۸۵ (۱۹۸۸-۲۰۰۶)
زمین‌های کشاورزی	۴۴/۹	۶۶/۸	۱۱۱/۷
فضای سبز شهری و پوشش طبیعی	۲۹/۹	۵۷/۵	۸۷/۴
زمین‌های بایر	۸۲/۲	۸۸/۴	۱۷۰/۶
مجموع پوشش از دست رفته	۱۵۷	۲۱۲/۷	۳۶۹/۷

جدول ۴: میزان تبدیل کاربری‌های مختلف به فضای سبز شهری در دوره‌های مختلف به هکتار

نوع کاربری اراضی	دوره ۱۳۶۷-۷۹ (۱۹۸۸-۲۰۰۰)	دوره ۱۳۷۹-۸۵ (۲۰۰۰-۲۰۰۶)	دوره ۱۳۶۷-۸۵ (۱۹۸۸-۲۰۰۶)
اراضی ساخته شده شهری	۲/۱	۲/۶	۴/۷
زمین‌های کشاورزی	۶/۷	۱۱/۷	۱۸/۴
زمین‌های بایر	۹/۶	۲۲/۹	۳۲/۵
مجموع پوشش از دست‌رفته	۱۷/۴	۳۸/۲	۵۵/۶

طبق نتایج این مطالعه، سطح اراضی ساخته شده شهری در طی سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵ به میزان ۳۶۹/۷ هکتار (۲۶/۷٪) رشد داشته است و از ۱۳۸۳/۸ هکتار به ۱۷۵۳/۵ هکتار رسیده است. همچنین طی این دوره مساحت کاربری فضای سبز شهری نیز با ۵۵/۶ هکتار افزایش (۱۰۶/۳٪) مواجه بوده و از میزان ۵۲/۳ هکتار در سال ۱۳۶۷ به میزان ۱۰۷/۹ هکتار در سال ۱۳۸۵ رسیده است. این در حالی است که طی دوره مورد مطالعه کاربری‌های کشاورزی و اراضی بایر روند کاهشی را داشته و به ترتیب ۲۱۳/۸ و ۲۱۱/۵ هکتار (۴۵/۶٪ و ۵۵/۶٪) کاهش را نسبت به سال ۱۳۶۷ نشان دادند.

مطابق نتایج به دست آمده کاربری‌های اراضی ساخته شده شهری و فضای سبز شهری روند رو به رشد داشته و کاربری‌های کشاورزی و زمین‌های بایر با گذشت زمان روند کاهشی را نشان داده‌اند.

بیشترین میزان تغییر طی سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵، مربوط به تغییر کاربری‌های مختلف به کاربری اراضی ساخته شده شهری با ۳۶۹/۷ هکتار است که از این میزان ۱۷۰/۶ هکتار مربوط به تغییر کاربری زمین‌های بایر به اراضی مسکونی است. همچنین میزان تغییر کاربری‌های زمین‌های کشاورزی و فضای سبز و اراضی دارای پوشش طبیعی به ترتیب برابر ۱۱۱/۷ و ۸۷/۴ هکتار است. نتایج مبین این واقعیت است که رشد مناطق مسکونی طی دوره ۶ ساله ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۵ در مجموع با ۲۱۲/۷ هکتار از سرعت بیشتری نسبت به دوره ۱۲ ساله ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۹ با ۱۵۷ هکتار تغییر برخوردار بوده است.

بیشترین میزان تغییر کاربری‌های مختلف به کاربری فضای سبز شهری طی سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵، مربوط به تغییر کاربری زمین‌های بایر با ۳۲/۵ هکتار و زمین‌های کشاورزی با ۱۸/۴ هکتار است. طی این دوره میزان تغییر کاربری اراضی ساخته شده شهری به فضای سبز ناچیز بوده و برابر ۴/۷ هکتار است. همچنین نتایج نشان دهنده این واقعیت است که رشد فضای سبز شهری طی دوره ۶ ساله ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۵ در مجموع با ۳۸/۲ هکتار از سرعت بیشتری نسبت به دوره ۱۲ ساله ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۹ با ۱۷/۴ هکتار تغییر برخوردار بوده است.

در این مطالعه از میانگین قضاوت کارشناسان مختلف در نرم‌افزار اکسپرت چویس جهت تعیین وزن اولیه هر یک از لایه‌های کاربری استفاده شده است. ضمن اینکه ضریب ناسازگاری این قضاوت‌ها نیز برابر ۰/۰۸ به دست آمد که بیانگر قابل قبول بودن سازگاری قضاوت‌ها است. جدول (۵) میانگین قضاوت کارشناسان مختلف به همراه وزن نهایی به دست آمده از نرم‌افزار اکسپرت چویس ارائه شده است.

جدول ۵: میانگین قضاوت کارشناسان مختلف به همراه وزن نهایی به دست آمده از نرم‌افزار اکسپرت چویس

لایه‌های کاربری	زمین کشاورزی به اراضی شهری	زمین بایر به اراضی شهری	فضای سبز شهری به اراضی شهری	اراضی شهری به فضای سبز شهری	زمین کشاورزی به زمین بایر	زمین بایر به فضای سبز شهری	وزن اولیه مستخرج از نرم‌افزار EC
زمین کشاورزی به اراضی شهری	۱	۲	۵	۷	۷	۵	۰/۳۸
زمین بایر به اراضی شهری	۱/۲	۱	۵	۶	۶	۲	۰/۲۵
فضای سبز شهری به اراضی شهری	۱/۵	۱/۵	۱	۸	۶	۳	۰/۱۷
اراضی شهری به فضای سبز شهری	۱/۷	۱/۶	۱/۸	۱	۱/۳	۱/۳	۰/۰۴
زمین کشاورزی به فضای سبز شهری	۱/۵	۱/۲	۱/۶	۳	۱	۵	۰/۱۱
زمین بایر به فضای سبز شهری	۱/۷	۱/۶	۱/۳	۳	۱/۵	۱	۰/۰۵



در جدول (۶) شدت نهایی خسارت تغییر هر یک از لایه‌های کاربری ارائه شده است.

جدول ۶: برآورد خسارت حاصل از توسعه شهری بر کاربری اراضی طی دوره ۱۳۸۵-۱۳۶۷

رتبه‌بندی	وزن نهایی (شدت خسارت)	میزان تغییر کاربری به هکتار	وزن اولیه (ضریب خسارت)	لایه‌های کاربری
۲	۴۲/۴۴	۱۱۱/۷	۰/۳۸	زمین کشاورزی به اراضی شهری
۱	۴۲/۶۵	۱۷۰/۶	۰/۲۵	زمین بایر به اراضی شهری
۳	۱۴/۸۵	۸۷/۴	۰/۱۷	فضای سبز شهری به اراضی شهری
۶	۰/۱۸	۴/۷	۰/۰۴	اراضی شهری به فضای سبز شهری
۴	۲/۰۲	۱۸/۴	۰/۱۱	زمین کشاورزی به فضای سبز شهری
۵	۱/۶۲	۳۲/۵	۰/۰۵	زمین بایر به فضای سبز شهری

طبق نتایج قضاوت کارشناسان در این مطالعه، لایه تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی به اراضی ساخته شده شهری با وزن اولیه (ضریب خسارت) ۰/۳۸ بیشترین اهمیت را در بروز خسارت زیست‌محیطی در منطقه مطالعاتی برعهده دارد و بعد از آن لایه‌های تغییر کاربری زمین‌های بایر و تغییر کاربری فضای سبز شهری به اراضی ساخته شده شهری به ترتیب با ۰/۲۵ و ۰/۱۷ از اهمیت کمتری برخوردارند. قابل ذکر است که ضریب خسارت هر یک از لایه‌های کاربری به تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده میزان اهمیت هر یک از لایه‌های کاربری در بروز خسارت زیست‌محیطی منطقه باشد. تغییر کاربری زمین‌های بایر به اراضی ساخته شده شهری علی‌رغم دارا بودن ضریب خسارت کمتر (۰/۲۵) نسبت به ضریب خسارت لایه تغییر کاربری زمین کشاورزی به اراضی ساخته شده (۰/۳۸)، از شدت خسارت بالاتری برخوردار بوده و می‌توان دلیل آن را مساحت بیشتر تغییر کاربری نسبت به کاربری کشاورزی و حتی سایر طبقات کاربری عنوان کرد. پس از این لایه، لایه‌های تغییر کاربری زمین کشاورزی و فضای سبز شهری به اراضی ساخته شده شهری از شدت خسارت بالایی برخوردار هستند.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق مطالعه روند تغییرات کاربری اراضی با مقایسه تصاویر ماهواره‌ای سه دوره سال‌های ۱۳۶۷ (۱۹۸۸)، ۱۳۷۹ (۲۰۰۰) و ۱۳۸۵ (۲۰۰۶) نشان‌دهنده تغییرات زیادی در کاربری اراضی محدوده شهری است. در مطالعات زیادی به گسترش نواحی شهری طی دو دهه گذشته اشاره شده است (پیرنظر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸؛ قارون<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). در این مدت تغییرات کاربری زیادی در محدوده مطالعاتی روی داده است که بیشترین تغییر مربوط به تغییر کاربری اراضی ساخته شده به میزان ۳۶۹/۷ هکتار است بطوری که از ۱۳۸۳/۸ هکتار در سال ۱۳۶۷ به ۱۷۵۳/۵ هکتار در سال ۱۳۸۵ افزایش داشته است که این خود گویای نقش تحولات جمعیتی و به تبع آن نیاز به مسکن و سایر کاربری‌های مورد نیاز شهری، در تغییر سایر کاربری‌ها به اراضی ساخته شده شهری است. به دنبال افزایش مناطق مسکونی در محدوده مطالعاتی و نیاز به ایجاد فضای سبز شهری، طی دوره مورد بررسی کاربری فضای سبز شهری نیز در مجموع ۵۵/۶ هکتار رشد داشته است و از ۵۲/۳ هکتار در ابتدای دوره به ۱۰۷/۹ هکتار در انتهای دوره رسیده است. علی‌رغم افزایش جمعیت طی سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵ در محدوده مطالعاتی و نیاز به زمین‌های کشاورزی بیشتر جهت تولید غذای بیشتر، نتایج نشان می‌دهند که کاربری‌های کشاورزی و زمین‌های بایر روند کاهش را طی دوره مذکور پیش رو داشته‌اند، بطوری که زمین‌های کشاورزی از ۴۶۹/۳ هکتار به ۲۵۵/۵ هکتار و زمین‌های بایر از ۳۸۰/۴ هکتار به ۱۶۸/۹ هکتار کاهش یافته‌اند. نتایج مطالعات صورت‌گرفته در شهرهای شمال اتیوپی و همچنین شهر قم در کشور ایران نشان داده است که در گسترش شهرها، بیشتر کاربری کشاورزی تحت تأثیر قرار گرفته و از مساحت آنها به نفع فضای شهری کاسته می‌شود (فانتا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۷؛ هالفوم<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۸؛ محمدیان و همکاران، ۲۰۱۶<sup>۵</sup>)، این در حالی است که با افزایش جمعیت شهرها نیاز به محصولات کشاورزی بیش از پیش خواهد بود. بیشترین تغییر کاربری زمین‌های بایر و کشاورزی طی دوره ۱۸ ساله مطالعاتی به اراضی ساخته شده شهری بوده است.

- 1 - Pirnazar
- 2 - Garouan
- 3 - Fenta
- 4 - Halefom
- 5 - Mohammadian

دلیل این امر را می‌توان ناشی از قیمت پائین زمین‌های بایر در مجاورت اراضی ساخته شده و کاهش رونق کشاورزی ناشی از کاهش منابع آبی منطقه در کنار افزایش جمعیت و نیاز به مسکن و امکانات شهری دانست. پارو و دار (۲۰۱۸) نیز در مطالعه خود در تامل نادو هند بیان کردند که افزایش نیاز به ساخت‌وساز در نواحی شهری و کاهش قیمت اراضی کشاورزی و افزایش قیمت اراضی شهری باعث شده است تا منطقه شهری مورد مطالعه از افزایش بالایی برخوردار شود. از بین اراضی زراعی شهر ری، اراضی واقع در حاشیه جنوبی و شمال بافت شهر بیشترین تغییرات کاربری را داشته است، بطوریکه در سال ۱۳۶۷ این زمین‌ها تماماً زیر کشت محصول بوده و کاربری باغ و یا کشاورزی داشته و امروزه جزء اصلی بافت شهری را تشکیل می‌دهند.

از دلایل گسترش شهر در این مناطق می‌توان به توسعه شبکه راه‌ها، تاسیس کارخانجات متعدد صنعتی، ایجاد مراکز علمی مانند دانشگاه‌ها و مدارس مختلف، ادارات متعدد، احداث شهرک‌های مسکونی اشاره نمود. براساس فرآیند برنامه‌ریزی، کاربری زمین شهری باید در چارچوبی فراهم گردد که بر پایه آن از استفاده نامناسب از زمین جلوگیری به عمل آید و در عین حال اهداف اقتصادی، اجتماعی، محدودیت‌های فیزیکی و سیاست‌های زیست محیطی رعایت شود و در آن اصل حفاظت از اراضی رعایت گردد. این اصل بر جلوگیری از تخریب زمین، برقراری ارتباط و پیوند میان شهر و طبیعت، حفظ منابع پایدار و تجدیدناپذیر، حفظ مواریث تاریخی و فرهنگی، حفظ فضاهای سبز و مکانیابی بهینه کاربری‌ها تاکید دارد که در خصوص توسعه شهر ری این اصل رعایت نشده و گسترش این منطقه بیشتر بر روی زمین‌های کشاورزی و باغات بوده است که در ردیف منابع طبیعی پایدار قرار دارند. این در حالی است که بر اساس اصول آمایش سرزمین، اراضی درجه ۲ و ۳ کشاورزی در فرآیند توسعه نباید به کاربری دیگری اختصاص یابند و بنابراین توسعه فیزیکی انجام شده در این شهر با اصول آمایش سرزمین، برنامه‌ریزی شهری و توسعه پایدار در تضاد است و به نظر می‌رسد این روند در آینده نیز همچنان ادامه داشته باشد. با توجه به اینکه اراضی کشاورزی و باغات جزء سرمایه ملی کشور به شمار می‌روند و حاصل کار سالها تلاش و کوشش بشر می‌باشند باید در حفظ آنها کوشید و از تبدیل آنها به زمین‌های مسکونی و صنعتی جلوگیری کرد و ساخت و سازها و تمرکز جمعیت را تا حد امکان در زمین‌های غیر کشاورزی و باغات قرار داد. با توجه به پیش بینی انجام شده در این مقاله، در صورت عدم برنامه‌ریزی مناسب با توجه به اراضی مساعد جهت گسترش فیزیکی در پیرامون این منطقه، در آینده‌ای نه چندان دور، شاهد از بین رفتن اراضی کشاورزی با وسعت بیشتر و تبدیل آنها به مناطق شهری و مسکونی خواهیم بود. بنابراین نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان هشدار برای برنامه‌ریزان شهری باشد که بتوانند با انجام برنامه‌ریزی‌های مناسبی از جمله سیاست‌های عمودی‌سازی از گسترش بی‌برنامه این منطقه جلوگیری نمایند.

## منابع

- امیدوار، کمال؛ نارنگی فرد، مهدی؛ عباسی، حجت الله (۱۳۹۴). آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در شهر یاسوج با استفاده از سنجش از دور. *جغرافیا و آمایش شهری - منطقه ای* (۱۶). ۱۱۱-۱۲۶.
- حیدریان، پیمان؛ رنگرن، کاظم؛ ملکی، سعید؛ تقی زاده، ایوب (۱۳۹۲). پایش تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش مقایسه پس از طبقه بندی تصاویر ماهواره لندست (مطالعه موردی: اراضی شهر تهران). *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۴(۴). ۱-۱۰.
- خوش‌لهجه، مهدی؛ برنجگر، بابک؛ مقیمی؛ بهشتی فر، سارا؛ مقصودی، یاسر؛ محمدزاده، علی (۱۳۹۸). مروری بر روشها و مدل‌های مورد استفاده در شناسایی تغییرات کاربری اراضی با تکیه بر سنجش از دور و GIS (با تاکید بر مطالعات صورت گرفته در کشور ایران). *نشریه علمی علوم و فنون نقشه برداری*، ۹ (۲). ۲۲۵-۲۴۲.
- سبزقبایی، غلامرضا؛ جعفرزاده، کاوه؛ دشتی، سیده سولماز؛ یوسفی خانقاه، شهرام؛ بزم آرا بلشتی، مزگان (۱۳۹۶). آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان قائم شهر). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۱۹ (۳). ۱۵۷-۱۴۴.
- فارسی، جواد و یوسفی، مریم (۱۳۹۲). آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: دشت بجنورد). *فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۲ (۷). ۵۹-۱۰۶.
- مجرد، کامران و کمانرودی موسی (۱۳۹۷). آشکارسازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی (منطقه مورد مطالعه: استان مازندران). *مجله کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در برنامه‌ریزی*، ۹ (۱). ۱-۱۰.

Al-shalabi, M., Billa, L., Pradhan, B., Mansor, S., & Al-Sharif, A. A. (2013). Modelling urban growth evolution

- and land-use changes using GIS based cellular automata and SLEUTH models: the case of Sana'a metropolitan city, Yemen. *Environmental earth sciences*, 70(1), 425-437.
- Billa, M. A. L. (2013). Modelling urban growth evolution and land-use changes using GIS based cellular automata and SLEUTH models: The case of Sana'a metropolitan city, Yemen. *Environmental Earth Sciences*, 70(1), 425-437.
- Bolca, M., Turkyilmaz, B., Kurucu, Y., Altinbas, U., Esetlili, M. T., & Gulgun, B. (2007). Determination of impact of urbanization on agricultural land and wetland land use in Balçovas' Delta by remote sensing and GIS technique. *Environmental monitoring and assessment*, 131(1-3), 409-419.
- Bolca, M., Turkyilmaz, B., Kurucu, Y., Altinbas, U., Esetlili, M. T., & Gulgun, B. (2007). Determination of impact of urbanization on agricultural land and wetland land use in Balçovas' Delta by remote sensing and GIS technique. *Environmental monitoring and assessment*, 131(1-3), 409-419.
- Deng, J. S., Wang, K., Hong, Y., & Qi, J. G. (2009). Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and urban planning*, 92(3-4), 187-198.
- El Garouani, A., Mulla, D. J., El Garouani, S., & Knight, J. (2017). Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data: Case of Fez, Morocco. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 160-169.
- Fenta, A. A., Yasuda, H., Haregeweyn, N., Belay, A. S., Hadush, Z., Gebremedhin, M. A., & Mekonnen, G. (2017). The dynamics of urban expansion and land use/land cover changes using remote sensing and spatial metrics: the case of Mekelle City of northern Ethiopia. *International journal of remote sensing*, 38(14), 4107-4129.
- Halefom, A., Teshome, A., Sisay, E., & Ahmad, I. (2018). Dynamics of Land Use and Land Cover Change Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Debre Tabor Town, South Gondar, Ethiopia. *Journal of Geographic Information System*, 10(02), 165.
- Kumar, S., & Khan, N. (2018). Application of remote sensing and GIS in land resource management. *Journal of Geography and Cartography*, 1(3), 1-4.
- Masser, I. (2001). Managing our urban future: the role of remote sensing and geographic information systems. *Habitat international*, 25(4), 503-512.
- Mosammam, H. M., Nia, J. T., Khani, H., Teymouri, A., & Kazemi, M. (2017). Monitoring land use change and measuring urban sprawl based on its spatial forms: The case of Qom city. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 103-116.
- Mosammam, H. M., Nia, J. T., Khani, H., Teymouri, A., & Kazemi, M. (2017). Monitoring land use change and measuring urban sprawl based on its spatial forms: The case of Qom city. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 103-116.
- Mundia, C. N., & Aniya, M. (2005). Analysis of land use/cover changes and urban expansion of Nairobi city using remote sensing and GIS. *International journal of Remote sensing*, 26(13), 2831-2849.
- Pirnazar, M., Ostad-Ali-Askari, K., Eslamian, S., Singh, V., Dalezios, N., Ghane, M., & Qasemi, Z. (2018). Change Detection of Urban Land Use and Urban Expansion Using GIS and RS, Case Study: Zanjan Province, Iran. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering*, 4(10.20431), 2454-8693.
- Prabu, P., & Dar, M. A. (2018). Land-use/cover change in Coimbatore urban area (Tamil Nadu, India)—a remote sensing and GIS-based study. *Environmental monitoring and assessment*, 190(8), 445.
- Ramachandra, T., Bharath, H., & Sowmyashree, M. (2013). Analysis of spatial patterns of urbanisation using geoinformatics and spatial metrics. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, 8(4), 5-24.
- Rawat, J. S., Biswas, V., & Kumar, M. (2013). Changes in land use/cover using geospatial techniques: a case study of Ramnagar town area, district Nainital, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(1), 111-117.
- Saaty, T.L. Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process, "pittsburgh RWS publication" (2000).
- Shaw, R., & Das, A. (2018). Identifying peri-urban growth in small and medium towns using GIS and remote sensing technique: A case study of English Bazar Urban Agglomeration, West Bengal, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(2), 159-172.
- Shaw, R., & Das, A. (2019). Identifying peri-urban growth in small and medium towns using GIS and remote sensing technique: A case study of English Bazar Urban Agglomeration, West Bengal, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(2), 159-172.
- United Nations (2012) World urbanization prospects: the 2011 revision. Accessed on 25 July 2015 from <http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm>.
- United Nations (2015) World urbanization prospects: the 2014 revision. Highlights (ST/ESA/SER. A/352). Accessed on 28 Sept 2015 from <http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf>.
- United Nations (2015) World urbanization prospects: the 2014 revision. Highlights (ST/ESA/SER. A/352).

Accessed on 28 Sept 2015 from <http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf>.

Weng, Q. (2001). A remote sensing? GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International journal of remote sensing*, 22(10), 1999-2014.