

## Original Article



# Identifying and Monitoring Urban Growth and Expansion Changes Using Spectral Unmixing of Remote Sensing Imagery and Geographic Information Systems Techniques at the Micro Level, (A Case Study of Amol City)

Sedigheh Lotfi<sup>1\*</sup> and Tohid Alizadeh<sup>2</sup>

## Affiliation

1. Prof. of Department of Geography and Urban Planning, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran
2. Ph.D. Student, Department of Geography and Urban Planning, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran

## ABSTRACT

**Introduction:** Land is a vital natural resource for human survival and the basis of all ecosystem services. However, land degradation through land use and land cover changes has become a serious global issue. Rural-urban migration in developing countries, along with the conversion of nearby villages into urban areas, has largely driven the rapid increase in urban settlements. Evidence shows that northern Iran has been experiencing rapid land use changes, which have endangered the region's stability over the last three decades. This article aims to identify and compare the growth and expansion changes of Amol city, located in Mazandaran province, over three decades from 1986 to 2016. Urban growth is defined by the absolute increase in the population living in cities, while urban sprawl is defined by changes in land cover over time.

**Materials and Methods:** To produce images of land cover changes in different years, Landsat time series image data (TM, ETM+, and OLI/TIRS sensors) were used. A linear unmixing model based on the extraction of end members was employed, identifying two classes of land: urban and non-urban. To verify the classification accuracy, high-resolution images from Google Earth and field observations using GPS were employed. Moran's spatial autocorrelation analysis tool was used to analyze the spatial distribution of land cover, and the trend analysis tool in ArcGIS software was employed to analyze the trend of spatial changes in urban land.

**Results and Discussion:** The findings show that the city's population doubling over these three decades has not only been accompanied by a 60% horizontal expansion into surrounding green and open lands but also increased building density and the number of floors. Validation of land cover classification, using the ambiguity error matrix, with an overall accuracy of over 90% and a kappa coefficient of over 80% for the obtained images, indicates high accuracy. Based on Moran's spatial autocorrelation analysis, the development of Amol City follows a cluster structure. Calculating the difference in land cover data over the 20 years from 1996 to 2016 revealed that 28 percent of the total city area, equivalent to 890 hectares, has undergone significant changes, including fundamental alterations in land use and land cover. The expansion of Amol City has generally occurred from the center to the periphery, with the least changes in the central parts and the most changes in the northern and eastern parts of the city.

**Conclusion:** Population growth and urban expansion not only lead to the destruction of natural resources and the environment but also exacerbate urban management problems in providing infrastructure and services. Therefore, the goal of planning should be to achieve optimal development that prevents increased migration from villages to cities. This can be achieved both at the macro level, by distributing urban roles complementarily and strengthening the role of villages, and at the local level, by emphasizing the balanced distribution of the city's population and endogenous growth.

**Keywords:** Land use and cover changes (LULC), spectral unmixing method, end members, Moran's index, ambiguity error matrix, trend analysis, Amol city.

**Citation:** Lotfi, S. and Alizadeh, T., Identifying and Monitoring Urban Growth and Expansion Changes Using Spectral Unmixing of Remote Sensing Imagery and Geographic Information Systems Techniques at the Micro Level, (A Case Study of Amol City), *Iran J Remote Sens GIS*. 16(3):147-164.

\* Corresponding Author: s.lotfi@umz.ac.ir  
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2023.103727>

Received: 2023.02.04  
Accepted: 2023.07.03



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



# شناسایی و پایش تغییرات رشد و گسترش شهری با استفاده از اختلاط‌زدایی طیفی تصاویر سنجش‌از‌دور و فنون سامانه اطلاعات جغرافیایی در سطح خرد (مطالعه موردی شهر آمل) صدیقه لطفی<sup>۱\*</sup> و توحید علی‌زاده<sup>۲</sup>

سمت

۱. استاد، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه مازندران، مازندران، ایران
۲. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه مازندران، مازندران، ایران

## چکیده

**سابقه و هدف:** زمین یک منبع طبیعی حیاتی برای بقای انسان و اساس همه خدمات بوم‌سازگان است. باین‌حال، تخریب اراضی در قالب تغییر کاربری و پوشش زمین، مشکلی جدی در جهان بوده است. مهاجرت روستایی به شهر در کشورهای در حال توسعه و همچنین تبدیل بسیاری از روستاهای مجاور به مناطق شهری، تا حد زیادی باعث افزایش سریع وسعت سکونتگاه‌های شهری شده است. شواهد نشان می‌دهد شمال ایران در حال تجربه تغییرات سریع کاربری اراضی است که پایداری منطقه را در طول سه دهه اخیر به خطر انداخته است. این مقاله با هدف شناسایی و مقایسه تغییرات رشد و گسترش شهر آمل واقع در استان مازندران در سه دهه از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ انجام شد. رشد شهری با افزایش مطلق جمعیتی که در شهرها زندگی می‌کنند و گسترش شهری با تغییرات پوشش زمین در طول زمان تعریف می‌شود.

**مواد و روش‌ها:** برای تولید تصاویر تغییرات پوشش زمین در سال‌های مختلف، با استفاده از داده‌های تصاویر سری زمانی لندست (سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI/TIRS)، از مدل اختلاط‌زدایی خطی براساس استخراج اعضای انتهایی استفاده شده و دو طبقه اراضی شهری و غیرشهری برای هر مقطع زمانی شناسایی شده است. برای بررسی صحت طبقه‌بندی، به‌صورت توأم از تصاویر با وضوح بالای ارائه‌شده در نرم‌افزار گوگل ارت و مشاهده میدانی با استفاده از GPS استفاده شده است. به‌منظور تحلیل توزیع فضایی پوشش اراضی از ابزار تحلیل خودهمبستگی فضایی موران و به‌منظور تحلیل روند تغییرات فضایی اراضی شهری از ابزار تحلیل روند در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است.

**نتایج و بحث:** یافته‌ها نشان می‌دهد افزایش دوبرابری جمعیت شهر در این سه دهه، نه‌تنها با گسترش افقی به میزان ۶۰ درصد در اراضی سبز و باز پیرامونی همراه بوده است، بلکه افزایش تراکم ساختمانی و تعداد طبقات را نیز در پی داشته است. صحت‌سنجی طبقه‌بندی پوشش اراضی، با استفاده از ماتریس خطای ابهام با محاسبه صحت کلی بالای ۹۰ درصد و ضریب کاپای بالای ۸۰ درصد برای تصاویر به‌دست‌آمده، دقت بالا و بسیار خوبی را نشان می‌دهد. براساس یافته‌های تحلیل خودهمبستگی فضایی موران، توسعه شهر آمل به‌طور کامل از ساختاری خوشه‌ای تبعیت می‌کند. با محاسبه اختلاف داده‌های پوشش زمین در دوره ۲۰ ساله ۱۳۷۵-۱۳۹۵ مشخص شد، ۲۸ درصد از مساحت کل شهر معادل ۸۹۰ هکتار، بیشترین تغییر را که شامل تغییرات بنیادین در کاربری و پوشش زمین می‌شود، داشته است. گسترش شهر آمل نیز به‌طور کلی از مرکز به پیرامون بوده است، به‌طوری که کمترین تغییرات در قسمت‌های مرکزی شهر و بیشترین تغییرات نیز در قسمت‌های شمالی و شرقی شهر رخ داده است.

**نتیجه‌گیری:** رشد جمعیت و گسترش شهری نه‌تنها، تخریب منابع طبیعی و محیط‌زیست را در پی دارد، بلکه با افزایش مشکلات مدیریت شهری در تأمین زیرساخت‌ها و خدمات نیز همراه است. از همین‌رو، هدف برنامه‌ریزی باید دستیابی به توسعه بهینه‌ای باشد که هم در سطح کلان، با توزیع نقش‌های شهری به‌صورت مکملی و تقویت نقش روستاها، از افزایش مهاجرت از روستاها به شهرها جلوگیری کند و هم در سطوح محلی، بر توزیع متوازن جمعیت شهر و رشد درون‌زا تأکید کند.

**واژه‌های کلیدی:** تغییرات کاربری و پوشش زمین (LULC)، روش اختلاط‌زدایی طیفی، اعضای انتهایی، شاخص موران، ماتریس خطای ابهام، تحلیل روند، شهر آمل.

**استناد:** لطفی، ص. و علی‌زاده، ت.، شناسایی و پایش تغییرات رشد و گسترش شهری با استفاده از اختلاط‌زدایی طیفی تصاویر سنجش‌از‌دور و فنون سامانه اطلاعات جغرافیایی در سطح خرد (مطالعه موردی شهر آمل)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳: ۱۴۴-۱۴۷.



## ۱- مقدمه

زمین یک منبع طبیعی حیاتی برای بقای انسان و اساس تمام خدمات بوم‌سازگانی است؛ درحالی‌که تخریب زمین در قالب تغییرات کاربری و پوشش زمین (LULC)<sup>۱</sup> به مشکلی جدی در سطح جهانی بدل شده است. تغییرات کاربری و پوشش زمین که نتیجه برهم‌کنشی چندبعدی میان پویایی‌های نهادی، اجتماعی-اقتصادی و محیطی است، به دلیل ارتباط با شرایط آب‌وهوایی محلی، منطقه‌ای و جهانی، چرخه کربن، پایداری تنوع زیستی، آب پاک، کشاورزی و امنیت غذایی نقش مهمی در ثبات مکانی و زمانی محیط‌زیستی ایفا می‌کند. ازاین‌رو درک فرایند آن، اهمیت بسیاری در بهبود شرایط و استانداردهای زندگی در راستای توسعه پایدار دارد (Abebe et al, 2021). این تغییرات تا حد زیادی معلول افزایش شدت شهرنشینی و اندازه شهرهاست که در قرن اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. سال ۲۰۱۰ برای نخستین بار، جمعیت شهری جهان با ۳/۵ میلیارد نفر، از مرز ۵۰ درصد گذشت و به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه از جمله آفریقا و آسیا به رشد خود ادامه داد. در ایران نیز برتری نسبت سهم شهرنشینی به روستانشینی حتی زودتر رخ داده است و نخستین بار در سرشماری سال ۱۳۶۵ (۱۹۸۶) میزان شهرنشینی از مرز ۵۰ درصد گذشته است. جریان‌های مهاجرت از روستا به شهر و همچنین تبدیل بسیاری از روستاها به شهر تا حد زیادی موجب افزایش سریع اندازه شهرها به‌لحاظ وسعت و جمعیت و به‌تبع آن تحمیل ساخت‌وسازهای جدید در زمین‌های سبز و باز پیرامونی شهرها و محیط‌های طبیعی شده است.

در خصوص افزایش اندازه شهرها، لازم است دو اصطلاح پرکاربرد که اغلب در محافل دانشگاهی و سیاست‌گذاری اشتباه گرفته می‌شوند، شناسایی و تفاوت بین آن‌ها معرفی شوند. نخست، اصطلاح «رشد شهری»<sup>۲</sup> که به افزایش مطلق جمعیتی اطلاق می‌شود که در شهرها زندگی می‌کنند، سرعت رشد جمعیت

شهری به افزایش طبیعی جمعیت شهری، جمعیت واردشده از طریق مهاجرت و تبدیل روستاها به شهرها بستگی دارد (UNICEF, 2012). دوم اصطلاح «گسترش شهری»<sup>۳</sup> که نشان‌دهنده بزرگ شدن اندازه فضایی یا کالبدی مناطق ساخته شده است. اوینگ (Ewing, 1994) گسترش شهری را فرایند تبدیل زمین از کاربری‌های غیرساخته‌شده به کاربری‌های توسعه‌یافته ساخته‌شده در طول زمان تعریف می‌کند.

گسترش یک شهر الزاماً با رشد آن شهر همسو و همراه نیست. یک شهر می‌تواند رشد داشته باشد، ولی گسترش نیابد؛ در واقع، در محدوده موجود و به‌صورت درون‌زا، جمعیت‌پذیری داشته باشد. بالعکس، یک شهر می‌تواند با تراکم جمعیتی کمتر، گسترش کالبدی بیشتری داشته باشد که در این حالت، بدیهی است که گسترش شهر می‌تواند اثرات زیان‌بار محیط زیستی بر منابع طبیعی و زمین‌های پیرامونی شهرها وارد کند. ازهمین‌رو، کنترل گسترش افقی شهرها و جلوگیری از ساخت‌وسازهای بی‌رویه در حومه‌های شهری، همواره باید مورد توجه برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران شهری قرار گیرد. گسترش افقی شهرها و ساخت‌وساز بی‌رویه حتی خارج از محدوده شهرها و روستاها در دهه‌های اخیر به‌خصوص در استان مازندران رشد چشمگیری داشته است. شهر آمل نیز در همین راستا، هم به‌لحاظ جمعیتی و هم به‌لحاظ وسعت، رشد و گسترش چشمگیری را تجربه کرده است. البته، نرخ رشد و گسترش شهر در طول دهه‌های اخیر، یکسان نبوده است. ازهمین‌رو، این مقاله قصد دارد روند تغییرات رشد و گسترش شهری را در سه دهه از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۵ به‌صورت مقایسه‌ای شناسایی و تحلیل کند. مطالعات و پژوهش‌هایی که به مسئله گسترش شهری می‌پردازند، غالباً نیازمند داده‌ها و اطلاعات به‌روز از سطح زمین هستند. بسیاری از این مطالعات از

1. land Use and Land Cover  
2. urban growth  
3. urban expansion

استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، بلال و مغنم (Belal & Moghanm, 2011) از روش تشخیص تغییر فراطبقه‌بندی<sup>۳</sup> داده‌های سنجنده‌های MSS و TM و حسن و همکاران (Hassan et al., 2016) از روش تشخیص تغییر فراطبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌های لندست ۵ (TM) و اسپات ۵ استفاده کرده‌اند. مهاجین و همکاران (Mohajane et al., 2018) با استفاده از سری داده‌های سنجنده‌های لندست (TM, MSS)، ETM+ و OLI) و روش‌های طبقه‌بندی NDVI و طبقه‌بندی حداکثر شباهت<sup>۴</sup> به توصیف تغییرات پوشش گیاهی در کاربری و پوشش زمین در جنگل آرزو، در اطلس میانی مرکزی مراکش پرداختند. چمپلینگ و برا (Chamling & Bera, 2020) به‌منظور شناسایی الگوهای مکانی- زمانی تغییر کاربری و پوشش زمین و همچنین عابیه و همکاران (Abebe et al., 2021) به‌منظور شناسایی الگوهای مکانی- زمانی تغییر کاربری و پوشش زمین از روش طبقه‌بندی حداکثر شباهت با استفاده از تصاویر سنجنده‌های ماهواره لندست استفاده کرده‌اند. مصطفی و همکاران (Mostafa et al., 2021)، به‌منظور پایش و پیش‌بینی گسترش شهری، از تصاویر سری زمانی لندست برای تحلیل تغییر تاریخی کاربری و پوشش زمین بین سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۱۸ و برای پیش‌بینی تغییر کاربری و پوشش زمین تا سال‌های ۲۰۳۳ و ۲۰۴۸، از مدل رگرسیون لجستیک و زنجیره مارکوف استفاده کرده‌اند. داس و انگادی (Das & Angadi, 2022) نیز با تأکید بر سطح خرد در کشور هند، به شناسایی تغییر پوشش کاربری اراضی و پایش رشد شهری با استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر شباهت براساس تصاویر سنجنده‌های لندست (MSS، TM و ETM+) و روش فراطبقه‌بندی پرداختند.

نقشه‌های پایه شهری استفاده می‌کنند که از طریق نقشه‌برداری زمینی یا عکس‌های هوایی و به‌دلیل هزینه بالا معمولاً در مقاطع زمانی بلندمدت تهیه می‌شوند. از همین‌رو، استفاده از تصاویر سری زمانی سنجش‌ازدور امکان مطالعه روندی بازه‌های زمانی چند دهه اخیر و همچنین انجام مطالعات به‌روز را فراهم می‌سازند؛ البته به‌دلیل دقت کمتر این تصاویر با توجه به محدودیت رزولوشن سنجنده‌ها، استفاده از روشی که به‌طور نسبی دارای کمترین خطا در شناسایی عوارض زمینی باشد، یکی از دغدغه‌های اصلی در طبقه‌بندی پوشش اراضی شهر و به‌طور کلی حل مسائل شهری به‌شمار می‌آید. بسیاری از مطالعات پیشین حوزه شهری برای بهره‌برداری از این داده‌ها، شاخص‌هایی همچون شاخص تفاوت نرمال‌شده گیاهی (NDVI)<sup>۱</sup> یا شاخص تفاوت نرمال‌شده ساختمانی (NDBI)<sup>۲</sup> را برای طبقه‌بندی تصاویر به‌کار می‌گیرند که از باندهای محدود و معادلات ثابت برای کل کره زمین استفاده می‌کنند و می‌توانند در زمان و مکان متفاوت با توجه به شرایط آب‌وهوایی نتایج متفاوتی را به‌همراه داشته باشند. بنابراین در مقاله حاضر، به‌منظور دستیابی به تصاویری با کمترین خطا، از روش اختلاط‌زدایی طیفی استفاده شده است. این روش که کمتر در مطالعات حوزه شهری به‌کار گرفته شده است، تغییرات پوشش زمین یک محدوده را براساس محاسبه اعضای انتهایی نمونه‌هایی که از سطح همان محدوده معرفی می‌شوند، مطالعه می‌کند.

## ۲- پیشینه و ادبیات موضوع

شناسایی تغییرات کاربری و پوشش زمین به‌عنوان یکی از عوامل اصلی گسترش شهری، همواره یکی از دغدغه‌های اصلی در برنامه‌ریزی نواحی شهری بوده است. بسیاری از صاحب‌نظران با کمک فنون زمین‌فضایی از جمله سنجش‌ازدور و سایر داده‌های موجود در شهرها، تلاش‌های بسیاری در تشخیص این تغییرات و پیامدهای آن انجام داده‌اند. به‌منظور مطالعه و ارزیابی رشد شهری و تغییرات کاربری و پوشش زمین با

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Normalized Difference Built-up Index
3. Post-classification change detection technique
4. Maximum likelihood classification method

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- معرفی محدوده مورد مطالعه

شهر آمل در مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. براساس اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای، ارتفاع متوسط این شهر از سطح دریاهای آزاد برابر ۹۳ متر است؛ حداقل ارتفاع ۴۹ متری به قسمت شمالی شهر و حداکثر ارتفاع ۱۵۲ متری به قسمت جنوبی شهر اختصاص دارد و دارای شیب ملایم ۱/۲ درصدی از جنوب به شمال است. شهر آمل واقع در قسمت میانی استان مازندران و به‌عنوان مرکز شهرستان آمل، از شمال با شهرستان محمودآباد، از جنوب با شهرستان تهران، از شرق با شهرستان بابل و از غرب با شهرستان نور ارتباط دارد. شکل ۱، موقعیت شهر آمل را در تقسیمات سیاسی کشور نشان می‌دهد. شهر آمل که محدوده ۳۱۷۷ هکتاری آن در این مقاله مطالعه شده است، در پهنه جلگه‌ای استان و در اقلیم معتدل و مرطوب استقرار دارد. جمعیت شهر براساس آمار سرشماری نفوس و مسکن کشور در سال ۱۳۶۵ معادل ۱۱۸۲۴۲ نفر، در سال ۱۳۷۵ معادل ۱۵۹۰۹۲ نفر، در سال ۱۳۸۵ معادل ۱۹۹۶۹۸ نفر و در سال ۱۳۹۵ معادل ۲۳۷۵۲۸ نفر گزارش شده است.

#### ۳-۲- روش پژوهش

##### ۳-۲-۱- منابع داده و پیش‌پردازش

داده‌های رصد زمین، مانند تصاویر لندست به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای به دست آوردن اطلاعات در مورد ویژگی‌های سطح زمین در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف، به‌طور گسترده‌ای برای مشاهده تغییرات کاربری و پوشش زمین شهری استفاده شده‌اند (Zhu, 2018; Mohajane et al., 2017; Zhu et al., 2019). این مقاله سعی بر این است تا با استفاده از فنون سنجش‌ازدور در پلتفرم گوگل ارت انجین (GEE)<sup>۱</sup>،

قابلیت در دسترس بودن این پایگاه‌های داده یکی از مزایای اصلی مطالعات یادشده به شمار می‌آید. اما یکی از معایب آن رزولوشن‌های متفاوت در داده‌های سری زمانی سنجنده‌های مورد استفاده در برخی مطالعات است که می‌تواند تحلیل را با مشکلاتی مواجه سازد.

مطالعاتی که از روش اختلاط‌زدایی طیفی براساس استخراج اعضای انتهایی برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای بهره برده‌اند، کمتر به مسائل تحولات گسترش شهری و بیشتر به‌صورت نظری و بنیادی به این روش پرداخته‌اند. با این حال ولمن و همکاران (Wellmann et al., 2021) با استفاده از تصاویر سری زمانی لندست (TM, ETM+ و OLI) در دوره ۳۰ ساله از مدل اختلاط‌زدایی طیفی با استفاده از رگرسیون kernel ridge برای طبقه‌بندی سطوح دارای پوشش گیاهی و فاقد پوشش گیاهی استفاده کرده‌اند. آلبرتی و همکاران (Alberti et al., 2024) نیز به‌منظور تحلیل تغییر پوشش زمین، یک رویکرد طبقه‌بندی نظارت‌شده را با یک رویکرد اختلاط‌زدایی طیفی برای طبقه‌بندی تصاویر سری زمانی لندست (TM و ETM+) ترکیب کرده‌اند.

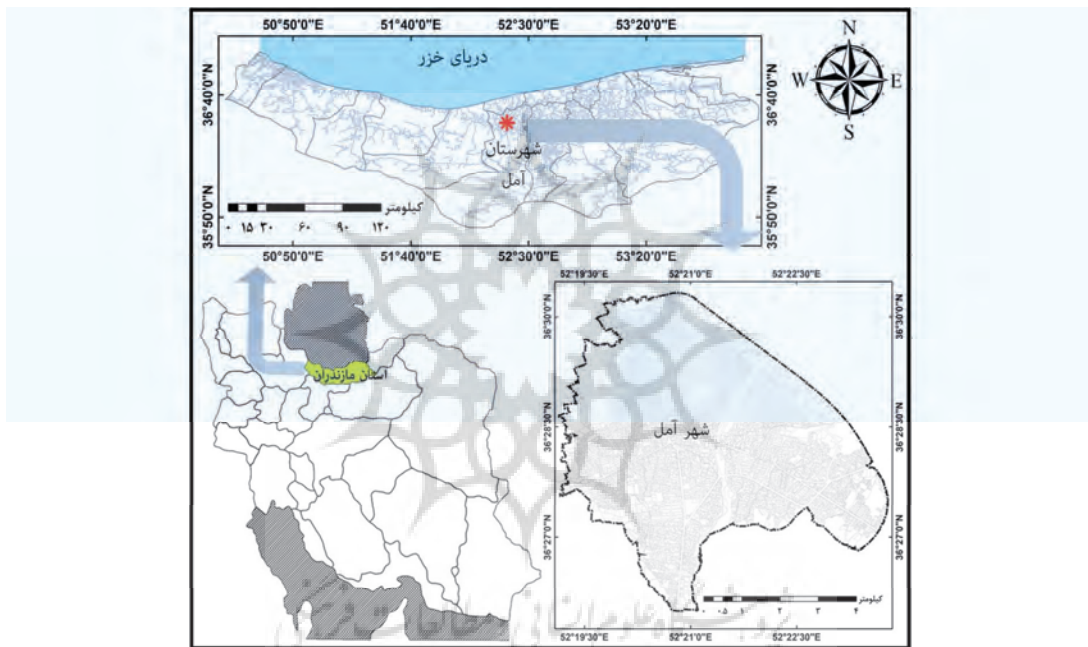
از میان پژوهش‌هایی که به مسئله روند توسعه فضایی در مورد مطالعاتی شهر آمل پرداخته‌اند، سیف‌الدینی و همکاران (Seifolddini et al., 2011) در راستای تبیین پراکنش و فشردگی فرم شهری در آمل با رویکرد فرم شهری پایدار از مدل‌های آنتروپی شانون، هلدردن و آماره موران و داده‌هایی شامل داده‌های سرشماری نفوس و مسکن مرکز آمار ایران و نقشه پایه شهر آمل استفاده کرده‌اند. رهنما و بلوری (Rahnama & Bolori, 2022) نیز به‌منظور تجزیه و تحلیل اثرات رشد شهر آمل بر محیط پیرامون به مطالعه تغییرات رشد جمعیت با استفاده از داده‌های جمعیتی مرکز آمار ایران و تحولات کالبدی شهر با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و ۵ پرداخته‌اند. مدل حداکثر شباهت نیز برای طبقه‌بندی تغییرات کاربری زمین در محیط‌های شهری و روستایی استفاده شده است.

1. Google Earth Engine



ابرنایکی داشته، انتخاب شده است. برای کاهش اثرات نوبز و دستیابی به داده‌های با اطمینان بیشتر، باید مقادیر متوسط هر پیکسل در تصاویر به دست آمده محاسبه شود. برای تعیین مقدار متوسط، زمانی که داده‌ها مقادیر بسیار زیاد یا کم را شامل می‌شوند میانه معیار بهتری از میانگین است. بنابراین میانه تصاویری هر سال با حداکثر ۱۰ درصد ابرناکی، در پلتفرم گوگل اِرت انجین محاسبه شده است. جدول ۱، جزئیات منابع داده‌های به کاررفته در تحلیل حاضر را نشان می‌دهد.

داده‌های مکانی و زمانی تغییرات پوشش زمین در محدوده مطالعاتی شهر آمل، فراخوانی و از طریق آن، گسترش شهری تحلیل شود. به منظور تجزیه و تحلیل تغییرات پوشش زمین در سال‌های مختلف، از داده‌های تصاویر سری زمانی لندست و سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI/TIRS استفاده شده است. تمامی تصاویر استخراج شده از این سنجنده‌ها در طول هر سال مورد بررسی، با حداکثر ۱۰ درصد ابرناکی فیلتر شده است. به عبارت دیگر، تصاویری که کمتر از ۱۰ درصد



شکل ۱. موقعیت شهر آمل در تقسیمات سیاسی کشور

(منبع: نگارندگان)

جدول ۱. جزئیات منابع داده‌های به کاررفته در تحلیل

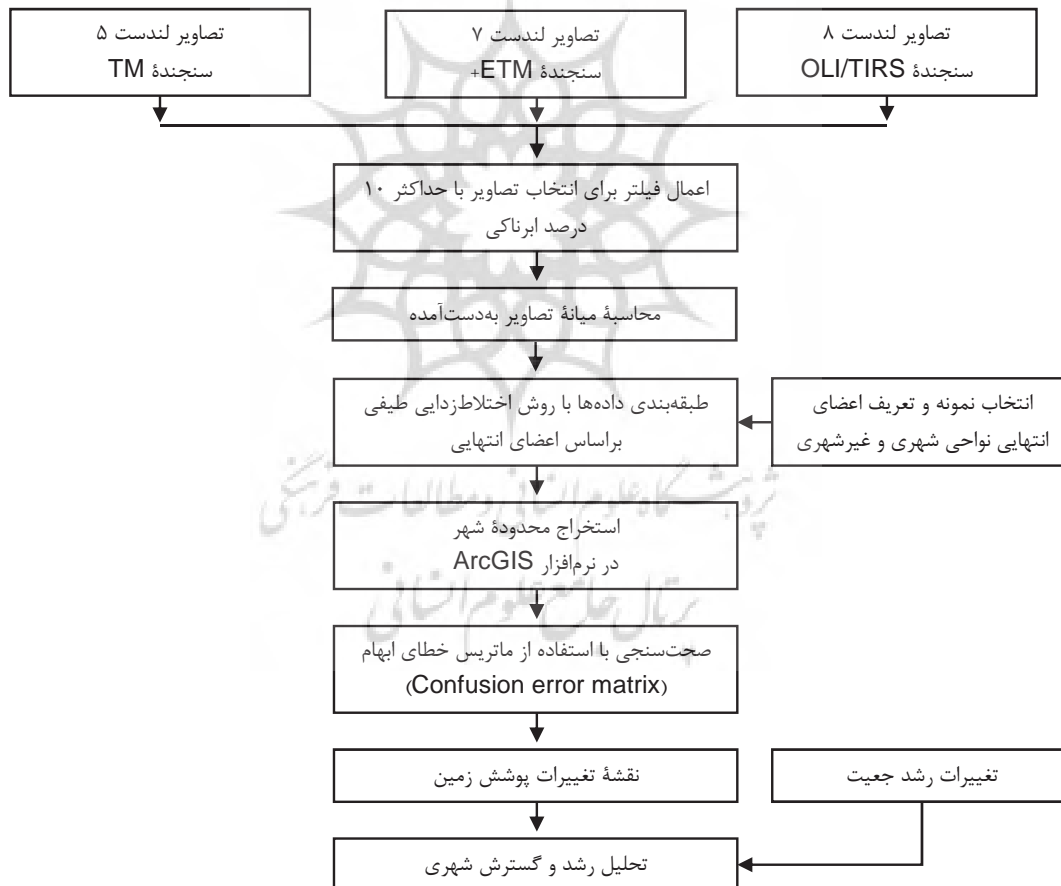
فرمت	باندهای استفاده شده	رزولوشن حداکثر ابرناکی	سنجنده	ماهواره	سال مورد بررسی
		تصاویر مکانی			
TIFF	B1 (Coastal aerosol), B2 (Blue), B3 (Green), B4 (Red), B5 (Near infrared), B6 (Shortwave infrared 1), B7 (Shortwave infrared 2), B8 (Panchromatic), B9 (Cirrus).	۱۰٪ ۳۰ متر	OLI/TIRS	Landsat 8	۱۳۹۵
TIFF	B1 (Blue), B2 (Green), B3 (Red), B4 (Near infrared), B5 (Shortwave infrared 1), B7 (Shortwave infrared 2), B8 (Panchromatic).	۱۰٪ ۳۰ متر	ETM+	Landsat 7	۱۳۸۵
TIFF	B1 (Blue), B2 (Green), B3 (Red), B4 (Near infrared), B5 (Shortwave infrared 1), B7 (Shortwave infrared 2).	۱۰٪ ۳۰ متر	TM	Landsat 5	۱۳۷۵
TIFF	B1 (Blue), B2 (Green), B3 (Red), B4 (Near infrared), B5 (Shortwave infrared 1), B7 (Shortwave infrared 2).	۱۰٪ ۳۰ متر	TM	Landsat 5	۱۳۶۵

(منبع: نگارندگان)

### ۲-۲-۳- طبقه‌بندی پوشش زمین

تشخیص تغییرات کاربری و پوشش اراضی سطح زمین برای دستیابی به اطلاعات مستمر و دقیق در مورد نحوه گسترش شهری منطقه مورد مطالعه برای هر نوع برنامه‌ریزی توسعه بسیار مهم است. سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و فناوری‌های سنجش از دور دارای قابلیت‌های بسیار خوبی برای حل مسائل مطالعاتی مانند تغییر کاربری و پوشش زمین هستند. از همین رو، برای تولید تصاویر تغییرات پوشش زمین در این مقاله، از روش اختلاط‌زدایی طیفی<sup>۱</sup> با استخراج اعضای انتهایی<sup>۲</sup> ( Zortea & Plaza, 2009; Shao et al., 2018; )

(Quintano et al., 2012) بر روی تصاویر سنجنده‌های لندست استفاده شده است. پس از فراخوانی و طبقه‌بندی داده‌ها در پلتفرم گوگل ارت انجین، داده‌های مربوط به محدوده شهر آمل براساس برش مکانی تصاویر در نرم‌افزار ArcGIS استخراج شده است. تمامی لایه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS، براساس سیستم تصویر UTM زون ۳۹ درجه شمالی و مبنای WGS1984 استفاده شده است. پس از صحت‌سنجی طبقه‌بندی داده‌ها با استفاده از ماتریس خطای ابهام<sup>۳</sup>، به‌منظور تحلیل رشد و گسترش شهری، تغییرات پوشش زمین در دوره‌های مختلف در مقایسه با تغییرات رشد جمعیت تحلیل شده است (شکل ۲).



شکل ۲. مراحل انجام کار

1. spectral unmixing
2. endmembers
3. confusion error matrix

پیکسل با ترکیبی خطی از اعضای انتهایی تقریب می‌یابد. وی و وانگ (Wei & Wang, 2020) روش‌های خطی اختلاط‌زدایی طیفی را به چهار دسته تقسیم می‌کنند: روش هندسی، فاکتورگیری ماتریس غیرمنفی (NMF)<sup>۶</sup>، روش بی‌زی<sup>۷</sup> و رگرسیون پراکنده<sup>۸</sup>. روش‌های هندسی رأس یک جسم را به‌عنوان اعضای انتهایی در نظر می‌گیرند. بنابراین، عمدتاً برای استخراج اعضای انتهایی به کار گرفته می‌شوند. در این روش، اعضای انتهایی با توجه به ویژگی‌های توزیع پیکسل‌ها در فضای هندسی استخراج و سپس تصاویر اختلاط‌زدایی می‌شود. در طبقه‌بندی زیرپیکسلی<sup>۹</sup> مانند مدل‌های اختلاط‌زدایی، تعیین دقیق پیکسل‌های خالص یا اعضای انتهایی برای تعریف کسرهای تصویر و تجزیه پیکسل‌های مختلط ضروری است (Quintano et al., 2012). استخراج اعضای انتهایی، فرایند انتخاب مجموعه‌ای از طیف‌های اثر خالص<sup>۱۰</sup> از مواد موجود در یک تصویر سنجش‌از‌دور است (Shao et al., 2018). به این منظور، در مقاله حاضر ابتدا نمونه‌هایی از سطوح توسعه شهری و غیرشهری در پلتفرم گوگل ارت انجین در نقاط مختلف شهر آمل تعیین شده‌اند که اعضای انتهایی طیفی را تعریف می‌کنند. به‌منظور انجام مدل اختلاط‌زدایی خطی براساس روش هندسی لازم است داده‌های باندهای مورد استفاده در هر پایگاه داده در هر سال مورد بررسی در یک لایه تجمیع شوند. پس از تجمیع باندها برای هر سال مورد بررسی، طبقه‌بندی داده‌ها با روش اختلاط‌زدایی طیفی براساس اعضای انتهایی صورت گرفته است. به این صورت که براساس طیف‌های اثر خالص پیکسل‌های هر نمونه، به شناسایی

اختلاط‌زدایی طیفی فرایندی است که امکان تجزیه بازتاب پیکسل‌های مختلط و شناسایی زیرپیکسل‌ها را فراهم می‌کند. شائو و همکاران (Shao et al., 2018)، این فرایند را این‌گونه توضیح می‌دهند که اجسام زمینی سیگنال‌های طیفی مختلفی دارند که اجزای اصلی سیگنال طیفی پیکسل هستند. اگر یک پیکسل فقط شامل یک شیء زمینی باشد، پیکسل یک پیکسل خالص است؛ اما اگر یک پیکسل شامل چندین شیء از زمین باشد، پیکسل یک پیکسل مختلط است. هر پیکسل مختلط در مجموعه‌ای از طیف‌های اثر خالص، «اعضای انتهایی» نامیده می‌شود و درصدهای مربوطه را «فراوانی» می‌نامند. هدف اختلاط‌زدایی طیفی تجزیه طیف پیکسل‌های مختلط به مجموعه‌ای از طیف‌های تشکیل‌دهنده یا اعضای انتهایی و مجموعه‌ای از کسرهای متناظر یا فراوانی است که نسبت اعضای انتهایی پیکسل را نشان می‌دهد. البته الگوریتم اختلاط‌زدایی طیفی به ایجاد مدل اختلاط<sup>۱</sup> بستگی دارد. مدل اختلاط برای توصیف نحوه تعامل مواد در تصویر با یکدیگر برای تشکیل یک طیف ترکیبی در پیکسل استفاده می‌شود (Wei & Wang, 2020). مدل‌های اختلاط را می‌توان در دو دسته مدل اختلاط طیفی خطی (LSMM)<sup>۲</sup> یا مدل اختلاط طیفی غیرخطی (NLSMM)<sup>۳</sup> دسته‌بندی کرد. مدل اختلاط طیفی خطی بر این فرض استوار است که طیف دریافتی از عوارض مختلف داخل پیکسل به‌صورت خطی ترکیب می‌شوند. معادله (۱)، نحوه محاسبه این مدل را نشان می‌دهد (Shao et al., 2018; Quintano et al., 2012).

$$X = Mf + e \quad \text{رابطه (۱)}$$

در معادله بالا، M ماتریس اعضای انتهایی، f ماتریس فراوانی و e نیز ماتریس خطا یا خطای باقی‌مانده را نشان می‌دهد.

اختلاط‌زدایی طیفی در مقاله حاضر براساس مدل اختلاط‌زدایی خطی<sup>۴</sup> مبتنی بر روش هندسی<sup>۵</sup> انجام شده است. در یک مدل اختلاط‌زدایی خطی، هر

1. Mixing model
2. Linear spectral mixing model
3. Nonlinear spectral mixing model
4. Linear spectral unmixing
5. Geometric Method
6. Nonnegative matrix factorization
7. Bayesian method
8. Sparse regression
9. Sub-pixel classification
10. Pure signature spectra



شناسایی و تحلیل روابط و روندهای موجود توزیع جمعیت و الگوی فضایی پدیده‌های مرتبط با جمعیت، به‌عنوان یکی از گام‌های بسیار مهم تحلیل فضایی در پژوهش‌های جغرافیای انسانی، شهرسازی و برنامه‌ریزی شهری شناخته می‌شود. بدین منظور، تصاویر به‌دست‌آمده از سنجنده‌های نام‌برده، در نرم‌افزار ArcGIS وارد و پس از استخراج داده‌های اراضی واقع در داخل محدوده شهر و طبقه‌بندی پوشش اراضی، تغییرات مساحت دو طبقه اراضی شهری و غیرشهری محاسبه شده است. روند این تغییرات، با روند تغییرات جمعیتی به‌دست‌آمده از اطلاعات سرشماری نفوس و مسکن از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۵ در نرم‌افزار Excel با استفاده از نمودارهای خطی و پراکندگی، مقایسه و تحلیل شده است. به‌منظور تحلیل توزیع فضایی پوشش اراضی شهری و مقایسه میزان خوشه‌ای بودن آن در دوره‌های مختلف، شاخص آماره موران (Moran, 1950) با استفاده از ابزار تحلیل خودهمبستگی فضایی موران<sup>۳</sup> در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه شده است. این ابزار، با اندازه‌گیری موقعیت و مقادیر عارضه‌ها به‌طور هم‌زمان، ارزیابی می‌کند که آیا الگوی بیان‌شده خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی است. آماره موران درجه همبستگی فضایی را در داده‌های ترتیبی و فاصله‌ای اندازه‌گیری می‌کند؛ در واقع خودهمبستگی فضایی کلی مجموعه داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. معادله رابج آماره موران به‌صورت زیر است (Chen, 2013):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij}(x_i - \mu)(x_j - \mu)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن عناصر یک ماتریس مجاورت فضایی را نشان می‌دهد. مقادیر حاصل، از تقریباً -۱ (پراکندگی کامل) تا +۱ (همبستگی کامل) متغیر است. در این

کل پیکسل‌های محدوده شهر می‌پردازد. در واقع این مدل، با استفاده از آستانه‌هایی که در نمونه‌های معرفی شده در همان محدوده در نظر می‌گیرد، تصاویری با اطمینان بیشتر از پوشش زمین ارائه می‌دهد؛ بنابراین، تصاویر به‌دست‌آمده از این مدل نسبت به برخی شاخص‌ها همچون شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI) یا شاخص تفاوت نرمال شده ساختمانی (NDBI) که از باندهای محدود و معادلات ثابت برای کل کره زمین استفاده می‌کنند، از اطمینان بیشتری برخوردار است. NDVI و NDBI، به ترتیب در معادله‌های (۲) و (۳) توضیح داده شده است. NIR مبین باند مادون قرمز نزدیک<sup>۱</sup>، SWIR مبین باند مادون قرمز طول موج کوتاه<sup>۲</sup> و Red مبین باند قرمز است.

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{NDBI} = (\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR})$$

به‌طور کلی، اختلاط‌زدایی طیفی حتی با اولین قانون جغرافیای والدو تابلر (Tobler, 1970) مبنی بر اینکه «همه چیزها - پدیده‌های جغرافیایی - با هم در ارتباط‌اند، اما چیزهای نزدیک نسبت به چیزهای دور از ارتباطات بیشتری برخوردارند» نیز همخوانی بیشتری دارد. در اجرای مدل اختلاط‌زدایی خطی در محدوده شهر آمل، به‌دلیل اهمیتی که اراضی شهری برای تحلیل حاضر دارد، تنها دو طبقه اراضی شهری و غیرشهری برای هر سال مورد بررسی، شناسایی شده است. سطوح ساخته‌شده شهری که کمترین قابلیت نفوذ آب را دارند، در طبقه اراضی شهری و سایر سطوح در طبقه اراضی غیرشهری طبقه‌بندی شده‌اند. البته این مدل در تصاویر منطقه‌ای، قابلیت تفکیک اراضی آبی، جنگلی و انواع پوشش گیاهی را دارد؛ اما در این مقاله با توجه به اهمیت اراضی شهری برای پژوهش، مقیاس خرد محلی و نبود عناصر متنوع گیاهی با مقیاس بزرگ، طبقه اراضی غیرشهری شامل انواع پوشش گیاهی و آبی و به‌طور کلی فضاهای باز فاقد ساختمان به‌صورت یکپارچه تحلیل شده است.

1. Near infrared
2. Shortwave infrared
3. Spatial AutoCorrelation Morans

غیرشهری با چه دقتی انجام شده است. نتیجه ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی‌شده با محاسبه صحت کلی (OA)<sup>۳</sup>، دقت کاربر (UA)<sup>۴</sup>، دقت تولیدکننده (PA)<sup>۵</sup> و ضریب کاپا<sup>۶</sup> (K) که معادلات مربوط به آن در شکل ۳ ارائه شده است، به دست می‌آید (Foody, 2002; Das & Angadi, 2022). ضریب کاپا اندازه‌گیری پیچیده‌ای است که ارزیابی بهتری نسبت به صحت کلی برای صحت‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای ارائه می‌دهد. هرچه رقم این ضریب بالاتر باشد به معنای توافق قوی‌تر و هرچه به صفر نزدیک‌تر شود به معنای توافق ضعیف‌تر است. صحت‌سنجی طبقه‌بندی داده‌ها برای تصاویر پوشش زمین به دست آمده با استفاده روش اختلاط‌زدایی طیفی در سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۵، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ به‌طور مجزا انجام شده است.

#### ۴- یافته‌ها و بحث

یافته‌ها نشان می‌دهد جمعیت شهر آمل در طول سه دهه مورد مطالعه، رشدی ۲ برابری داشته است. این در حالی است که اراضی ساخته‌شده شهری در این دوره، ۱/۶ برابر افزایش یافته است؛ بنابراین افزایش جمعیت شهر آمل در این دوره، نه تنها با گسترش افقی به میزان ۶۰ درصد همراه بوده است، بلکه افزایش تراکم ساختمانی و تعداد طبقات را نیز در پی داشته است. در این سه دهه، گسترش شهر آمل به‌طور کلی از مرکز به پیرامون و در همه جهات به‌صورت یکپارچه رخ داده است (شکل ۴). عمده ساخت‌وسازهای جدید متأثر از اجرای الگوی شعاعی پیشنهادی شهر در طرح‌های توسعه شهری (طرح تفصیلی مصوب ۱۳۶۴، طرح جامع مصوب ۱۳۷۹ و طرح تفصیلی مصوب ۱۳۸۵) ابتدا در حاشیه محورهای اصلی و سپس در بافت‌های میانی و سایر شبکه‌های دسترسی گسترش یافته است (موقعیت شبکه ارتباطی پیشنهادی شهر در شکل ۶ در پیوست ارائه شده است).

تحلیل Z-score که نشان‌دهنده تعداد انحراف معیارها از میانگین است نیز محاسبه می‌شود. زمانی که Z-score صفر باشد، مبین الگوی تصادفی است و در صورتی که مقادیر Z-score مثبت و بالا به دست آید، خوشه‌بندی فضایی دارای ارزش بالا است. اگر Z-score منفی و پایین به دست آید، خوشه‌بندی فضایی دارای ارزش پایین است. در پایان، روند تغییرات فضایی ۲۰ ساله اراضی شهری براساس اختلاف دو تصویر در سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۹۵ در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه و با استفاده از ابزار تحلیل روند<sup>۱</sup> نمایش داده شده است.

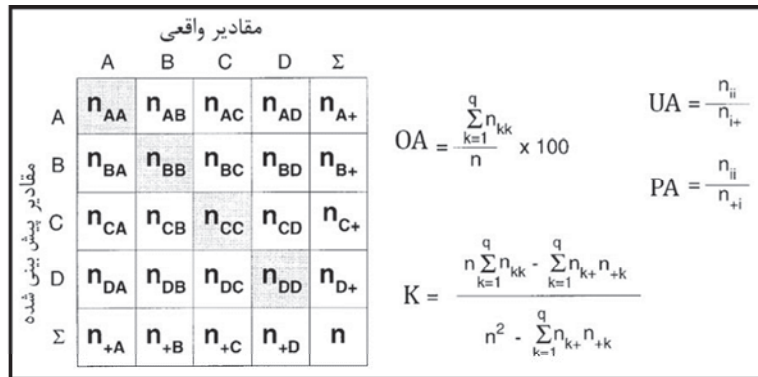
#### ۳-۲-۳- صحت‌سنجی با استفاده از ماتریس خطا

پس از تهیه و طبقه‌بندی نقشه‌های پوشش زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، برآورد صحت آن‌ها امری ضروری است. برای بررسی صحت طبقه‌بندی، به‌صورت توأم از تصاویر با وضوح بالایی ارائه‌شده در نرم‌افزار گوگل ارت و مشاهده میدانی با استفاده از GPS، به‌منظور اعتبارسنجی تصاویر طبقه‌بندی‌شده استفاده شده است. حجم نمونه مورد صحت‌سنجی، با استفاده از معادله کوکران (Cochran, 1977) محاسبه شده است (معادله ۵). در این معادله، مقدار  $Z^2$  یک مقدار ثابت است که به فاصله اطمینان و سطح خطا ( $\alpha$ ) بستگی دارد. معمولاً سطح خطا ۵ درصد یا ۱ درصد در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که سطح خطا یا سطح معناداری<sup>۲</sup> برابر ۵ درصد در نظر گرفته شود، سطح اطمینان برابر با ۹۵ درصد خواهد بود و مقدار Z با توجه به جدول آماری، ۱/۹۶ خواهد بود. مقدار p برابر با نسبتی از جامعه است که دارای صفت مورد مطالعه هستند. مقدار e نیز براساس همان سطح خطا یا برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$n = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

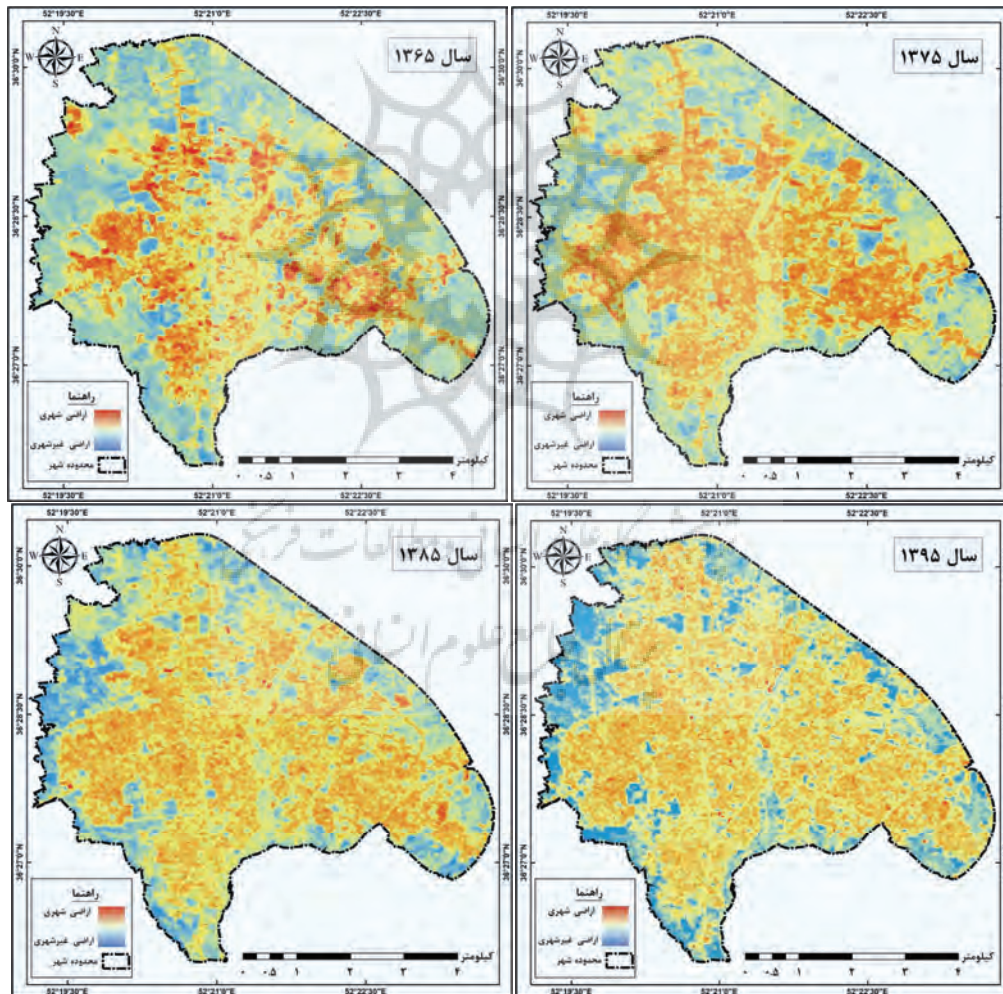
پس از تعیین حجم نمونه، صحت‌سنجی تصاویر با جدول ماتریس خطای ابهام اندازه‌گیری شده است. این ماتریس با مقایسه نتیجه واقعی و پیش‌بینی‌شده طبقه‌بندی نشان می‌دهد که طبقه‌بندی اراضی در دو طبقه شهری و

1. Trend Analysis
2. Significant Level
3. Overall Accuracy
4. User's Accuracy
5. Producer's Accuracy
6. Kappa Coefficient



شکل ۳. ماتریس خطای ابهام و برخی معادلات رایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی

(منبع: Foody, 2002)



شکل ۴. تغییرات پوشش زمین در سه دهه از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ با استفاده از شاخص اعضای انتهایی

(منبع: نگارندگان)

نشریه سنجش از دور و GIS ایران

سال ۱۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳

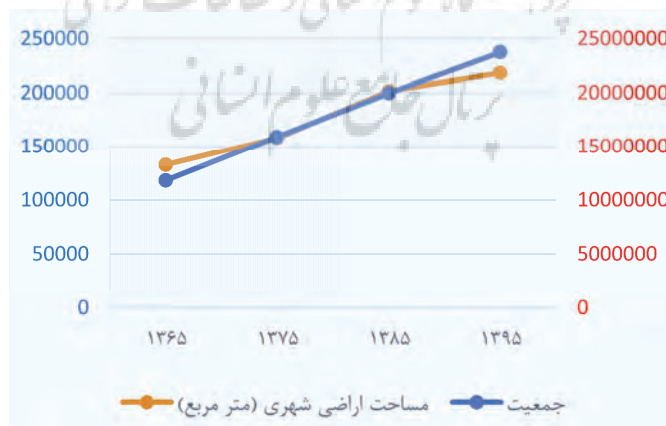
با توجه به میزان درصد تغییرات کمتر مساحت اراضی ساخته شده شهری نسبت به افزایش جمعیت، می توان گفت در این دوره فشرده شدن شهر بیشتر شده است. به منظور اطمینان از صحت طبقه بندی انجام شده، صحت سنجی تصاویر با بررسی نمونه های نقطه ای در سطح شهر انجام شده است. با انتخاب ۳۸۴ نقطه (۱۹۲ محدوده مورد بررسی و مقایسه واقیعت زمینی با داده های طبقه بندی شده تصاویر ماهواره های به دست آمده، صحت سنجی با استفاده از ماتریس خطای ابهام انجام شده است (جدول ۳). صحت کلی ۹۰/۳۶ درصد، ۹۱/۶۷ درصد، ۹۱/۹۳ درصد و ۹۶/۶۱ درصد

تغییرات جمعیتی و مساحت اراضی شهری به تفکیک دهه های مورد بررسی (جدول ۲) نشان می دهد، بیشترین افزایش جمعیت به میزان ۳۴/۵ درصد، در بین سال های ۱۳۶۵ و ۱۳۷۵ در حالی رخ داده است که اراضی شهری با سرعت کمتری افزایش یافته است. این شرایط در بین سال های ۱۳۷۵ و ۱۳۸۵ با شکلی متفاوت ادامه یافته است. در این دهه، افزایش اراضی شهری به میزان ۲ درصد بیشتر از افزایش جمعیت شهر رخ داده است. در واقع بیشترین پراکنده رویی و گسترش افقی شهر در همین دهه اتفاق افتاده است. در بین سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵، میزان تغییرات جمعیت و مساحت اراضی شهری کمتر از دهه های قبلی بوده است.

جدول ۲. تغییرات جمعیت و مساحت طبقات پوشش زمین از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵

سال		۱۳۶۵		۱۳۷۵		۱۳۸۵		۱۳۹۵	
جمعیت		۱۱۸۲۴۲		۱۵۹۰۹۲		۱۹۹۶۹۸		۲۳۷۵۲۸	
تغییرات رشد جمعیت		-		۳۴/۵۵٪		۲۵/۵۲٪		۱۸/۹۴٪	
پوشش زمین		مساحت (مترمربع) سهم (درصد)		مساحت (مترمربع) سهم (درصد)		مساحت (مترمربع) سهم (درصد)		مساحت (مترمربع) سهم (درصد)	
اراضی غیرشهری		۱۸۴۹۶۱۷۶ ۵۸/۲۱		۱۵۹۶۷۸۳۳ ۵۰/۲۶		۱۱۶۰۹۲۹۴ ۳۶/۵۴		۹۹۴۱۵۴۱ ۳۱/۲۹	
اراضی شهری		۱۳۲۷۷۰۴۷ ۴۱/۷۹		۱۵۸۰۵۳۹۰ ۴۹/۷۴		۲۰۱۶۳۹۲۹ ۶۳/۴۶		۲۱۸۳۱۶۸۲ ۶۸/۷۱	
تغییرات رشد اراضی شهری		-		۱۹/۰۴٪		۲۷/۵۸٪		۸/۲۷٪	

(منبع: نگارندگان با استفاده از اطلاعات جمعیتی مرکز آمار ایران<sup>۱</sup> و تصاویر ماهواره ای)



نمودار ۱. تغییرات جمعیت و مساحت طبقات پوشش زمین از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵

(منبع: نگارندگان)

با وجود نرخ بالای افزایش جمعیت در طول سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۵، گسترش شهر به دلیل گرایش بیشتر جمعیت به تمرکزگرایی تا حدودی خوشه‌ای‌تر شده است. در حالی که از سال ۱۳۷۵ به بعد رفته‌رفته به سمت توسعه پراکنده گرایش داشته است. در طول سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵، به دلیل ساخت‌وسازهای بیشتر، به ویژه در نواحی حومه‌ای و پیرامونی شهر و همچنین پر شدن فضاهای خالی نواحی مرکزی، خوشه‌ای بودن توسعه شهر کاهش یافته است. به منظور تأیید این روند، تحلیل خودهمبستگی فضایی برای سال ۱۴۰۰ نیز انجام شده است که یافته‌ها نشان می‌دهد در طول این ۵ سال، شهر با توسعه پراکنده‌تری روبه‌رو بوده است و به میزان چشمگیری از خوشه‌ای بودن توسعه شهر کاسته شده است. البته طبق ارقام به دست آمده، ساختار خوشه‌ای توسعه شهر با مقادیر بالا همچنان حفظ شده است. (پایگاه داده استفاده شده برای سال ۱۴۰۰ نیز همان سنجنده مورد استفاده در سال ۱۳۹۵ است).

به ترتیب برای سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۵، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ به دست آمده است که دقت بالایی را نشان می‌دهد. دقت تولیدکننده و کاربر برای همه سال‌ها بالاتر از ۸۸ درصد به دست آمده است که نشان می‌دهد توافق بین طبقه‌بندی تصاویر براساس اختلاط‌زدایی طیفی و طبقه‌بندی واقعیت زمینی دارای رابطه‌ای قوی (Congalton, 1991) است. ضریب کاپا نیز برای تصاویر هر چهار سال به ترتیب ۸۰/۷۳ درصد، ۸۳/۳۳ درصد، ۸۳/۸۵ درصد و ۹۳/۲۳ درصد به دست آمده است که به معنی رابطه قوی و توافق تقریباً کامل (Rwanga & Ndambuki, 2017; Congalton, 1991) است. به طور کلی، نتایج صحت‌سنجی دقت بالا و بسیار خوبی را نشان می‌دهد که تأییدکننده روش مورد استفاده در این مقاله است.

براساس یافته‌های تحلیل خودهمبستگی فضایی موران، توسعه شهر آمل به طور کامل از ساختاری خوشه‌ای تبعیت می‌کند (جدول ۴). البته شاخص‌های آماره موران و Z-score در طول دهه‌های مختلف مورد مطالعه، روند خطی نداشته‌اند و روندهای متفاوتی بر ساختار پراکندگی اراضی شهری حاکم بوده است.

جدول ۳. صحت سنجی طبقه‌بندی تصاویر براساس ماتریس خطای ابهام

طبقه‌بندی	1365		1375		1385		1395	
	دقت تولیدکننده (%)	دقت کاربر (%)	دقت تولیدکننده (%)	دقت کاربر (%)	دقت تولیدکننده (%)	دقت کاربر (%)	دقت تولیدکننده (%)	دقت کاربر (%)
اراضی شهری	۸۸/۵۴	۹۱/۸۹	۹۰/۶۳	۹۲/۵۵	۹۳/۲۳	۹۰/۸۶	۹۷/۴۰	۹۵/۹۰
اراضی غیرشهری	۹۲/۱۹	۸۸/۹۴	۹۲/۷۱	۹۰/۸۲	۹۰/۶۳	۹۳/۰۵	۹۵/۸۳	۹۷/۳۵
صحت کلی (%)	۹۰/۳۶		۹۱/۶۷		۹۱/۹۳		۹۶/۶۱	
ضریب کاپا (%)	۸۰/۷۳		۸۳/۳۳		۸۳/۸۵		۹۳/۲۳	

(منبع: نگارندگان)

جدول ۴. تحلیل خودهمبستگی فضایی در دوره‌های مختلف

سال	۱۳۶۵	۱۳۷۵	۱۳۸۵	۱۳۹۵	۱۴۰۰
آماره موران	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۸۳
Z-score	۲۶۴	۲۶۷	۲۶۳	۲۵۴	۲۴۷

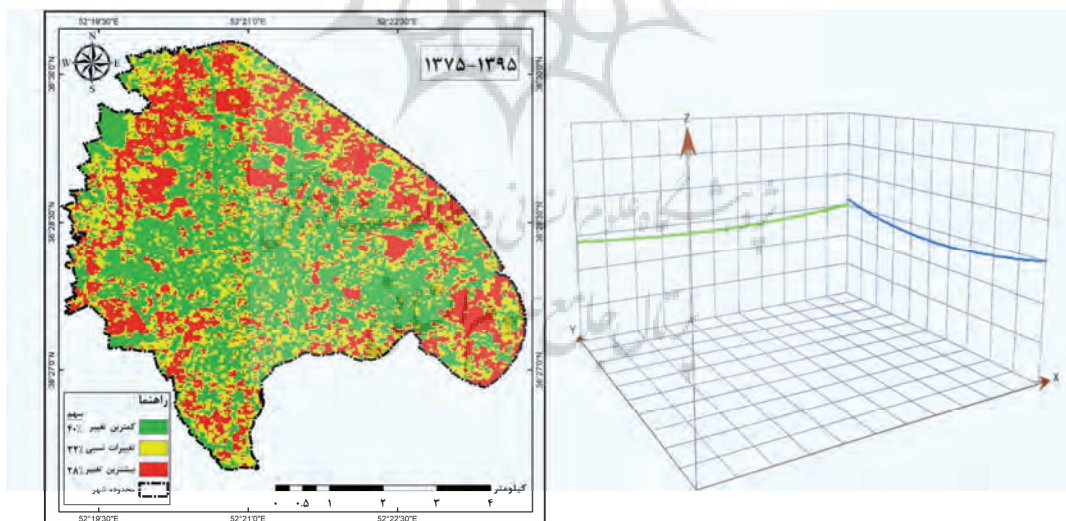
(منبع: نگارندگان)



### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تغییرات مکانی و زمانی پوشش زمین شهر در طول سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵، با تمرکز بر شناسایی روند تغییرات رشد و گسترش شهر آمل و با استفاده از داده‌های سنجنش از دور بررسی شده است. در طول سه دهه مورد بررسی، کاربری‌های ساخته شده شهر حدود ۶۰ درصد افزایش یافته است که به رغم توسعه فشرده شهر در سال‌های اخیر، گسترش چشمگیری در طول این دهه‌ها در شهر شکل گرفته است. از سوی دیگر، جمعیت شهر آمل نیز در این مدت رشدی دو برابری داشته است. رشد جمعیت و گسترش شهری نه تنها، تخریب منابع طبیعی و محیط زیست را در پی دارد، بلکه با افزایش مشکلات مدیریت شهری در تأمین زیرساخت‌ها و خدمات نیز همراه است. از همین رو، هدف برنامه‌ریزی باید دستیابی به توسعه بهینه‌ای باشد که هم در سطح کلان، با توزیع نقش‌های

با محاسبه اختلاف داده‌های پوشش زمین در دوره ۲۰ ساله ۱۳۷۵-۱۳۹۵ در نرم‌افزار ArcGIS مشخص شد، ۲۸ درصد از مساحت کل شهر معادل ۸۹۰ هکتار از محدوده شهر آمل، در طول این دو دهه بیشترین تغییر را که شامل تغییرات بنیادین در کاربری و پوشش زمین می‌شود، داشته است. همچنین، تحلیل روند تغییرات فضایی شهر از جنوب به شمال در محور Y و از غرب به شرق در محور X برای دوره ۲۰ ساله ۱۳۷۵-۱۳۹۵ نشان می‌دهد تغییرات پوشش زمین از مرکز به سمت قسمت‌های شمالی و شرقی شهر، افزایش بیشتری نسبت به قسمت‌های جنوبی و غربی شهر داشته است. بیشترین تغییرات نیز در شمال شهر رخ داده است. در واقع رشد شهر در طول دو دهه مورد بررسی، بیشتر به سمت قسمت‌های شمالی شهر گرایش داشته است. قسمت مرکزی شهر نیز کمترین تغییرات را نشان می‌دهد.



شکل ۵. تحلیل روند تغییرات فضایی گسترش شهر آمل از سال ۱۳۷۵ تا سال ۱۳۹۵. سمت چپ: اختلاف تصاویر دوره ۲۰ ساله و سمت راست: نمودار تحلیل روند (محور Y: از جنوب به شمال شهر، محور X: از غرب به شرق شهر و محور Z: میزان تغییرات را نشان می‌دهد) (منبع: نگارندگان)

می‌کند که نتیجه گرفتند رشد چشمگیر جمعیت و وسعت شهر در طول ادوار گذشته هم با توسعه پراکنده پیرامونی شهر در زمین‌های سبز و باز و هم با افزایش تراکم در قسمت‌های مرکزی شهر همراه بوده است.

#### منابع

- Abebe, G., Getachew, D., & Ewunetu, A., 2021, **Analysing land use/land cover changes and its dynamics using remote sensing and GIS in Gubalafito district**, Northeastern Ethiopia, SN Applied Sciences, 4(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04915-8>
- Alberti, M., Weeks, R., & Coe, S., 2004, **Urban land-cover change analysis in central Puget Sound**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(9), 1043-1052. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.70.9.1043>
- Belal, A. A., & Moghanm, F. S., 2011, **Detecting urban growth using remote sensing and GIS techniques in Al Gharbiya governorate, Egypt**, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 14(2), 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.09.001>
- Chamling, M. & Bera, Biswajit., 2020, **Spatio-temporal Patterns of Land Use/Land Cover Change in the Bhutan-Bengal Foothill Region Between 1987 and 2019: Study Towards Geospatial Applications and Policy Making**, Earth Systems and Environment. 4. 10.1007/s41748-020-00150-0. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00150-0>
- Chen, Y., 2013, **New approaches for calculating Moran's index of spatial autocorrelation**, PloS one, 8(7), e68336. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068336>
- Cochran, W.G., 1977, **Sampling Techniques**, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York. ISBN: 978-0-471-16240-7
- Congalton, R.G., 1991, **A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data**, Remote Sensing of Environment, 37, 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-b](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-b)

شهری به صورت مکملی و تقویت نقش روستاها، از افزایش مهاجرت از روستاها به شهرها جلوگیری کند و هم در سطوح محلی، بر توزیع متوازن جمعیت شهر و رشد درون‌زا تأکید کند.

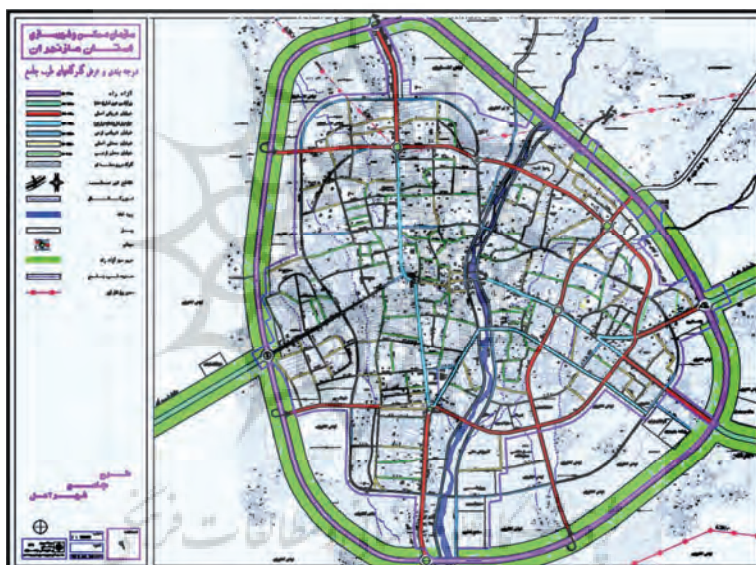
استفاده از روش اختلاط‌زدایی طیفی با استخراج اعضای انتهایی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، به‌عنوان روشی نو در جمع‌آوری داده‌ها به‌منظور تحلیل روند تغییرات پوشش زمین، کمتر در پژوهش‌های مرتبط با مسائل شهری به آن پرداخته شده است. نتایج صحت‌سنجی این روش، با استفاده از ماتریس خطای ابهام با محاسبه صحت کلی بالای ۹۰ درصد، دقت تولیدکننده و کاربر بالای ۸۸ درصد و ضریب کاپای بالای ۸۰ درصد برای تصاویر به‌دست‌آمده در سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۵، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵، دقت بالا و بسیار خوبی را نشان می‌دهد که تأییدکننده روش مورد استفاده در این مقاله است. ارزیابی مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های پیشین را می‌توان این‌گونه بیان کرد که نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های ولمن و همکاران (۲۰۲۰)، داس و انگادی (۲۰۲۲)، چملینگ و برا (۲۰۲۰)، حسن و همکاران (۲۰۱۶) و بلال و مغنم (۲۰۱۱)، همسو و هم‌جهت بوده است، چراکه این پژوهش‌ها نیز با بررسی رابطه بین جمعیت و تغییرات کاربری و پوشش زمین در مقیاس‌های زمانی-مکانی با استفاده از فنون سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، نشان داده‌اند که افزایش جمعیت در مناطق مورد مطالعه، با هزینه پوشش گیاهی طبیعی، رشد شهری افقی را در پی داشته است و تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان باید در جهت پایدار ساختن شهرها، حفظ منابع طبیعی، افزایش فضاهای سبز شهری و رشد فشرده و عمودی شهری را برای بهینه‌سازی کاربری‌ها در نظر بگیرند. همچنین از میان پژوهش‌هایی که به مسئله روند توسعه فضایی در مورد مطالعاتی شهر آمل پرداخته‌اند، مقاله حاضر پژوهش‌های سیف‌الدینی و همکاران (۱۳۹۱) و رهنما و بلوری (۱۴۰۰) را تأیید

- Das, S., & Angadi, D. P., 2022, **Land use land cover change detection and monitoring of urban growth using remote sensing and GIS techniques: a micro-level study**, *GeoJournal*, 87(3), 2101-2123. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10359-1>
- Ewing, R., 1994, **Causes, characteristics, and effects of sprawl: a literature review**, *Environmental and Urban Issues* 21(2): pp. 1-15. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5\\_34](https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_34)
- Foody, G. M., 2002, **Status of land cover classification accuracy assessment**, *Remote sensing of environment*, 80(1), 185-201. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00295-4)
- Hassan, Z., Shabbir, R., Ahmad, S. S., Malik, A. H., Aziz, N., Butt, A., & Erum, S., 2016, **Dynamics of land use and land cover change (LULCC) using geospatial techniques: a case study of Islamabad Pakistan**, *SpringerPlus*, 5(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2414-z>
- Iran Statistics Center, **population and housing census of 1365, 1375, 1385 and 1395**. <https://amar.org.ir/statistical-information/catid/3005>
- Mohajane, M., Essahlaoui, A., Oudija, F., Hafyani, M. E., Hmaidi, A. E., Ouali, A. E., ... & Teodoro, A. C., 2018, **Land use/land cover (LULC) using landsat data series (MSS, TM, ETM+ and OLI) in Azrou Forest, in the Central Middle Atlas of Morocco**, *Environments*, 5(12), 131. <https://doi.org/10.3390/environments5120131>
- Mostafa, E., Li, X., Sadek, M., & Dossou, J. F., 2021, **Monitoring and Forecasting of Urban Expansion Using Machine Learning-Based Techniques and Remotely Sensed Data: A Case Study of Gharbia Governorate, Egypt**, *Remote Sensing*, 13(22), 4498. <https://doi.org/10.3390/rs13224498>
- Quintano, C., Fernández-Manso, A., Shimabukuro, Y. E., & Pereira, G., 2012, **Spectral unmixing**, *International Journal of Remote Sensing*, 33(17), 5307-5340. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.661095>
- Rahnama, M. R., & bolori, Z., 2022, **Analysis of the growth effects of Amol city on the surrounding environment using remote sensing and geographic information system**, *Political Organizing of Space*, 4 (4): 288-302. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26455145.2022.4.4.1.7>
- Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M., 2017, **Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS**, *International Journal of Geosciences*, 8(04), 611. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>
- Seifoddini, F., Ziari, K., Pourahmad, A., & Nikpour, A., 2011, **Explanation of Dispersion and Compactness of Urban Form in Amol City, Considering Sustainable Urban Form**, *Human Geography Research*, 44(80), 155-176. <https://doi.org/10.22059/JHGR.2012.24606>
- Shao, Y., Lan, J., Zhang, Y., & Zou, J., 2018, **Spectral unmixing of hyperspectral remote sensing imagery via preserving the intrinsic structure invariant**, *Sensors*, 18(10), 3528. <https://doi.org/10.3390/s18103528>
- Tobler, W. R., 1970, **A computer movie simulating urban growth in the Detroit region**, *Economic geography*, 46(sup1), 234-240. <https://doi.org/10.2307/143141>
- UNICEF Annual Report, 2012, **World Population Prospects The 2012 Revision, Volume II: Demographic Profiles**, New York. <https://reliefweb.int/attachments/>
- Wei, J., & Wang, X., 2020, **An overview on linear unmixing of hyperspectral data**, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2020/3735403>
- Wellmann, T., Schug, F., Haase, D., Pflugmacher, D., & van der Linden, S., 2020, **Green growth? On the relation between population density, land use and vegetation cover fractions in a city using a 30-years Landsat time series**, *Landscape and Urban Planning*, 202, 103857.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103857>  
 Zhu, Z., 2017, **Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 130, 370–384.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>

Zhu, Z., Wulder, M. A., Roy, D. P., Woodcock, C. E., Hansen, M. C., Radeloff, V. C., et al., 2019, **Benefits of the free and open Landsat data policy**, Remote Sensing of Environment, 224, 382–385.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.016>  
 Zortea, M., & Plaza, A., 2009, **Spatial preprocessing for endmember extraction**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(8), 2679-2693.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2014945>

پیوست



شکل ۶. شبکه ارتباطی پیشنهادی شهر در طرح جامع سال ۱۳۷۹